Science Arts & Métiers (SAM)
is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: https://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/6725

To cite this version :

Gérard BOIS, Sophie SIMONET, Annie-Claude BAYEUL-LAINÉ - Etude numérique instationnaire d'une micro-éolienne à axe vertical - 2010

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu

ETUDE NUMERIQUE INSTATIONNAIRE D'UNE MICRO-EOLIENNE A AXE VERTICAL

Annie-claude BAYEUL-LAINÉ [a], Gérard BOIS [a], Sophie SIMONET [a]

[a] LML, UMR CNRS 8107, Arts et Metiers PARISTECH, LILLE

annie-claude.bayeul@ensam.eu

Résumé

Bien que les éoliennes soient une forme très ancienne d'exploitation du vent, ces dernières quarante dernières années ont vu leur évolution et un développement important de leur conception dans le cadre du développement durable. Le présent article propose de présenter le résultat d'une collaboration entre le Laboratoire de Mécanique de Lille et une entreprise en cours de développement Windisplay. Cette entreprise est à l'origine de la création d'une éolienne, support d'affichage publicitaire original. L'intérêt de ce type de support est de fournir un éclairage d'origine éolienne au support publicitaire. L'originalité de cette turbine est la rotation de chaque pale autour de son propre axe qui permet une surface d'affichage deux fois plus grande, mais qui améliore également les performances d'une telle éolienne. De par cette combinaison de mouvements, l'écoulement autour de cette éolienne est fortement instationnaire et nécessite une modélisation adaptée, en particulier pour tenir compte des positions initiales des pales. Le but est de présenter cette modélisation et de donner un certain nombre de résultats tels que des cartes instantanées de vecteurs vitesse ou des contours de pression, mais aussi des résultats plus globaux tels que des couples ou des coefficients de performance.

Mots Clés : Eolienne, axe vertical, voilure tournante, pales tournantes

1. Introduction

Les éoliennes peuvent être classées en deux grandes familles (D. le Gouriérès [2008], E. Hau [2000], D.J. Malcom [2003], J. Martin [1987]) :

- Les turbines à axe horizontal (HAWVTs)
- Les turbines à axe vertical (VAWTs) .

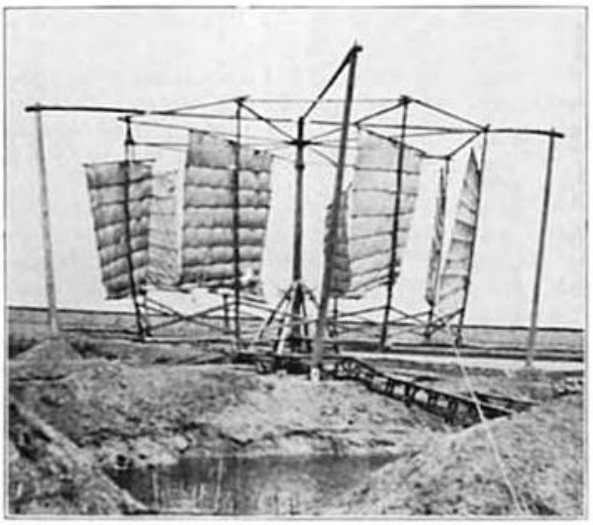


Fig. 1 *VAWT Chinoise (F.H. KING [2004])*

L'origine connue des turbines à axe horizontal est Georges Darrieus qui a déposé un brevet en 1929, bevet qui couvre l'ensemble de toutes les éoliennes à axe vertical. Toutefois les premiers moulins à vent sont apparus il y a plus d'un millénaire en Chine et en Perse, bien avant la découverte de l'électricité. Ces moulins servaient à pomper l'eau, à moudre le grain,

à scier du bois… Les premiers modèles étaient constitués d'une voilure fixée à un axe vertical tel que le montre la photo en figure 1, modèle du début du XXème siècle (F.H. KING [2004]). De nos jours, le terme « «éolienne Darrieus » est parfois restreint aux éoliennes à pales courbées alors que le brevet couvre l'ensemble des éoliennes à axe vertical (D.J. Malcom [2003]).

Les nombres sans dimension, utilisés pour caractériser l'ensemble des éoliennes sont les suivants :

- Rendement du rotor ou encore coefficient de puissance C_p

$$C_p = \frac{P_{eff}}{\frac{\rho S V_0^3}{2}} \tag{1}$$

Où P_{eff} est la puissance capturée par la turbine et $\frac{\rho S V_0^3}{2}$ est la puissance cinétique totale traversant la turbine, S étant la surface balayée par le vent. (Figure 4).

- Rapport des vitesses

$$\lambda = \frac{\omega R_t}{V_O} \tag{2}$$

Où ω est la vitesse angulaire de la turbine, R_t est le rayon de l'extrémité de pale et V_0 la vitesse du vent.

Le coefficient de puissance maximum est limité par le principe de la conservation de la quantité de mouvement autour d'une hélice (éolienne à axe horizontal essentiellement). Ce coefficient de puissance maximum a été établi par Betz en 1919. Sa limite est $C_{p\max} = 0.593$.

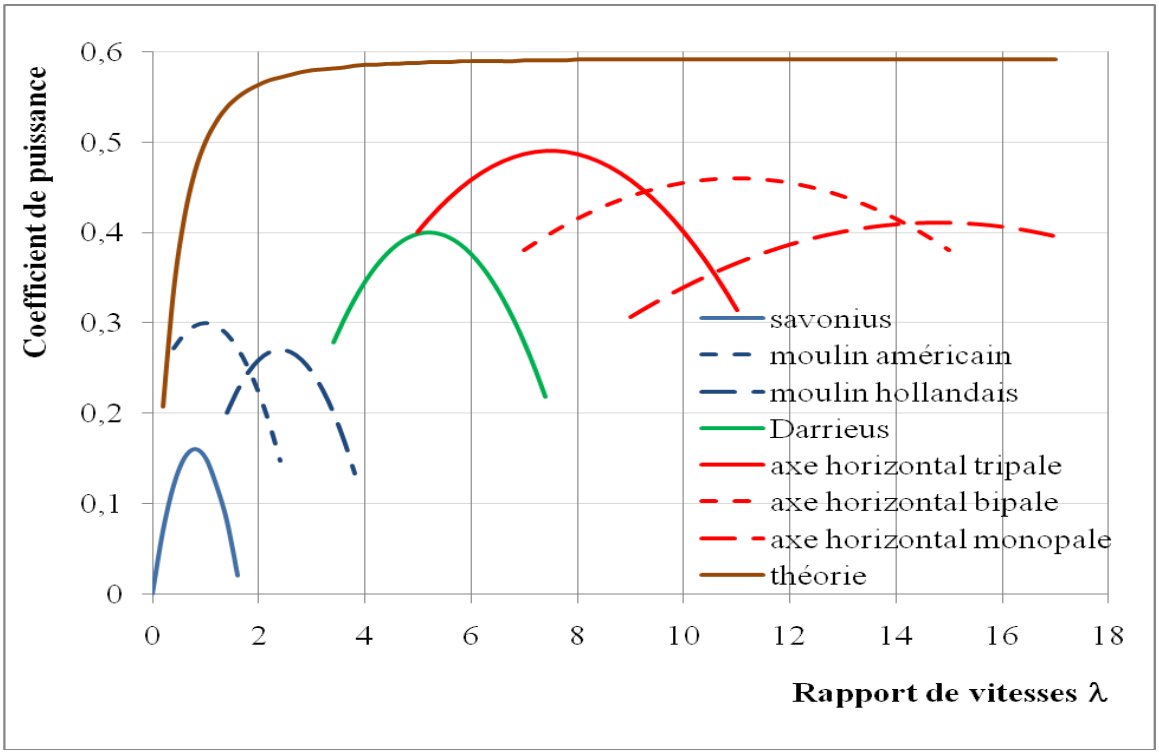


Fig. 2. *Comparaison du coefficient de puissance des différentes éoliennes d'après Hau[2000]*

La figure 2 montre les coefficients de performance des différents types d'éolienne. On peut constater que les éoliennes à axe vertical fonctionnent à faible rapport de vitesse.

La présente étude concerne une micro-éolienne à axe vertical dans laquelle chaque pale combine deux rotations: une rotation autour de son axe propre et une rotation autour de l'axe de la turbine. La bibliographie sur les turbines à axe vertical est très riche (Hayashi et al. [2009], Kiwata et al [2007], Leconte et al [2001], Malcom [2003], Paraschiviou [2002]…) mais peu de travaux ont été publiés sur les turbines à axe vertical à pales tournantes.

Kiwata et al. [2007], Pawsey [2002] ont travaillé sur des micro-éoliennes à axe vertical dont l'angle de calage des pales varie au cours d'une révolution mais les pales ne tournent pas complètement autour d'elles-mêmes. Les auteurs ont montré que le coefficient de performance d'une telle turbine est meilleur que celui obtenu avec des éoliennes à pales rigides et que ce coefficient dépend de l'angle de calage, de la taille de la turbine, du nombre d'pales et de la forme des pales.

Dieudonné [2006] a déposé un brevet en 2006 pour une turbine à pales tournantes. C'est la marche d'un voilier qui a inspiré à cet inventeur français, l'idée de l'éolienne à voilure tournante. Les pales, sont reliées au mât vertical par des bras horizontaux. L'ensemble pales et bras pivotent sur le mât sous l'effet du vent. L'originalité vient de ce que les pales sont constamment orientées par rapport à la direction du vent pour avoir une efficacité maximum, comme un voilier bien réglé. Aucun résultat concret n'a, par contre, été publié.

Cooper et Kennedy [2005] de l'université de wollongong en Australie ont travaillé sur une éolienne similaire, connue sous le nom de « éolienne wolongong », mis au point par un inventeur local J. Boothman. Des investigations ont été menées dans le cadre de projets de fin d'études et de thèses. Des premiers résultats viennent d'être publiés par Cooper [2010]. Il a été démontré que le coefficient de performance maximum est de l'ordre de 0,25 et que le dispositif avait un couple de démarrage élevé.

En 2008, F. Penet, P. de Bodinat et J. Valette ont gagné un prix d'innovation pour une idée de micro-éolienne basée sur ce principe et utilisée pour faire un panneau publicitaire dont la source d'éclairage est fournie par le vent. Depuis, ils ont créé la société Windisplay pour mettre au point et développer ce produit.

La présente étude est le fruit d'une collaboration entre cette société et l'Ensam. Son but est de fournir certains résultats tels que des contours d'isovaleurs de pression ou des champs de vitesse et de montrer l'intérêt d'une telle éolienne dans des domaines d'application plus larges que ceux de la société Windisplay.

2. Géométries et cas tests

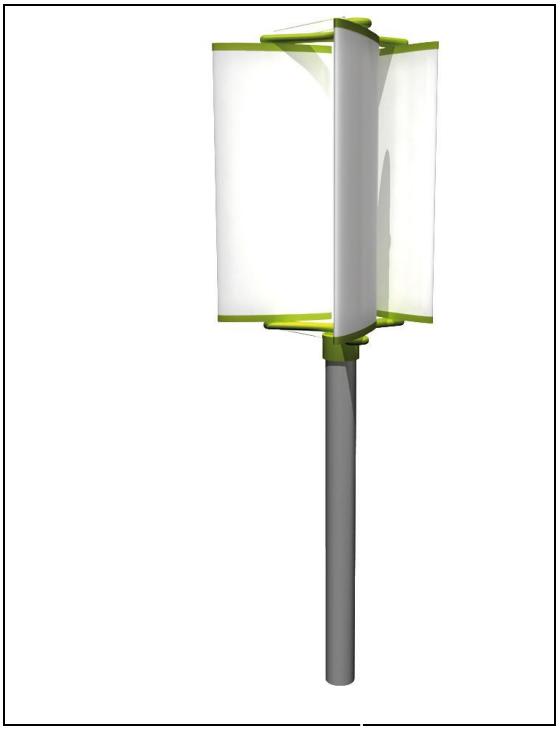
L'éolienne étudiée est présentée en figure 3. Les pales sont droites et de forme elliptique, relativement hautes. C'est pourquoi un modèle 2D a été adopté. Le domaine de calcul autour de l'éolienne est suffisamment grand comme on peut le voir sur les figures 4 et 5. L'axe des pales est situé sur un rayon de 620 mm. Chaque pale comporte un petit axe de 150 mm et un grand axe de 1050 mm.

Les conditions aux limites sont :

- Vitesse à l'entrée pour simuler la vitesse du vent de 8 m/s (R_e=5,6e^5)

- plans de symétries pour les parties droites et gauches du domaine

-pression de sortie pour la partie supérieure du domaine



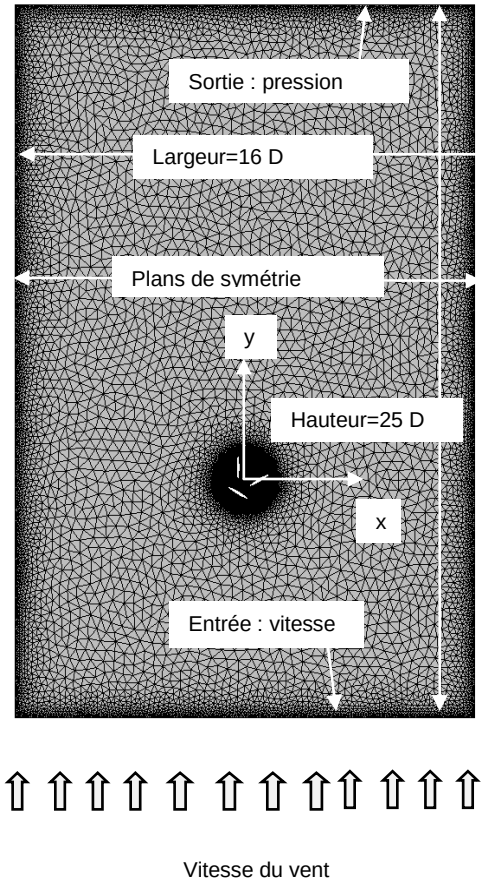


Fig. 3. *Modèle de l'éolienne étudiée*

Fig. 4 *Maillage*

Le modèle contient 5 zones : la zone extérieure à l'éolienne, trois zones pales et une zone intermédiaire entre la zone extérieure et les zones pales, appelée zone éolienne. La zone éolienne a un diamètre D, égal à la somme de R (rayon des centres), du grand rayon de l'ellipse des pales et d'un jeu, nécessaire au glissement entre les zones. Les zones pales et la zone intermédiaire sont en mouvement. Quatre interfaces entre ces zones ont été créées : une interface entre la zone éolienne et chaque zone pale et une interface entre la zone éolienne et la zone extérieure. Le détail de ces zones est précisé en figure 5

On appelle angle de calage, l'angle initial (au temps t=0) entre l'axe x et la corde de la pale 1. Des calculs préliminaires, pour quelques angles de calage spécifiques, ont montré que l'écoulement autour de l'éolienne est fortement instationnaire. De ce fait, les résultats présentés ici concernent les résultats obtenus pour un rapport de vitesse de 0,4 pour lequel une bonne périodicité de l'écoulement a pu être observée. Dans le cas de ce type d'éolienne, le rapport de vitesses a été calculé sur la base d'un rayon correspondant au rayon des centres des pales qui est constant, ce qui n'est pas le cas du rayon correspondant à l'extrémité des pales. Ainsi, dans l'équation (2), R est égal à 620 mm.

Le maillage a été raffiné près des interfaces et des pales. Des maillages prismatiques ont été utilisées près des pales. Le maillage résultant est donc un maillage non structuré triangulaire comprenant environ 60 000 cellules (voir fig. 4).

Un pas de temps, correspondant à une rotation de 1 millième de tour a été choisi de façon à ne pas déformer trop rapidement le maillage près des interfaces et à éviter les cellules négatives. Le maillage est recalculé à chaque pas de temps.

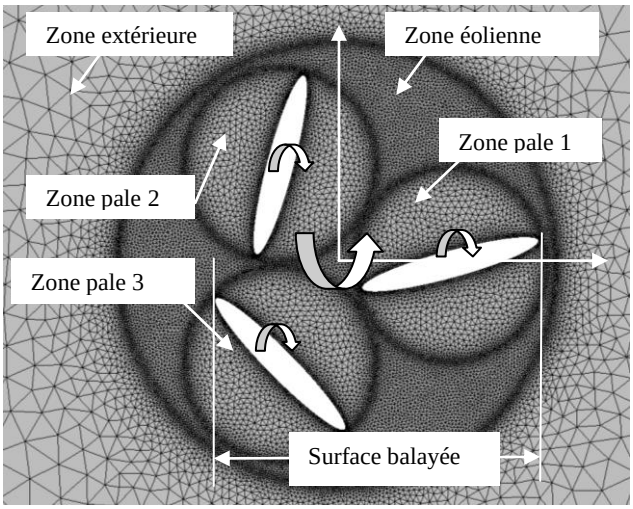


Fig. 5. *zoom du maillage*.

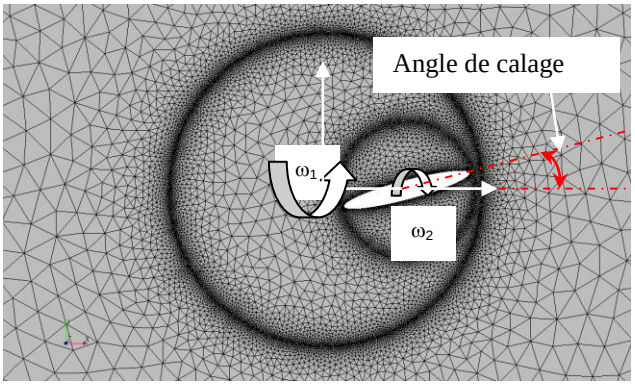


Fig. 6 *détail du maillage pour un modèle à une pale*

Cas étudiés	*Nombre de pales*	*Vitesse relative des pales*	*Angle de calage (degrés)*
a15s	1	non	15
a15i	1	oui	15
b15s	3	non	15
b-30i	3	oui	-30
b0i	3	oui	0
b15i	3	oui	15
b30i	3	oui	30

Tableau 1 *Cas étudiés*

Les résultats pour quatre angles de calage initiaux (-30, 0, 15 et 30 degrés) sont présentés ici .

En vue de montrer l'intérêt des pales tournantes, des calculs avec une seule pale pour un angle de calage de 15 degrés et un rapport de vitesse de 0,4 avec (cas a15i) et sans rotation des pales (a15s) ont également été réalisés. Le détail du maillage pour un modèle à une pale est représenté figure 6.
Toutes les simulations ont été réalisées avec le code de calcul STAR CCM+ avec un modèle de turbulence (k-ε).
Dans une première partie, les résultats pour un angle de calage de 15 degrés sont présentés (cas a15s, b15s, a15i et b15i)
Dans une seconde partie, les cas b-30i, b0i, b15i and b30i sont comparés et discutés.

3. Calcul des paramètres : couples et rendement

Dans ce type d'éolienne, chaque pale est entrainée mécaniquement et consomme donc de l'énergie pour tourner autour de son axe, c'est pourquoi la puissance fournie par l'éolienne doit être corrigée. Le code fournit le couple M_t autour de l'axe de l'éolienne pour chaque pale ainsi que les forces de pression et de viscosité. Donc, pour chaque pale, le moment autour de l'axe de l'éolienne est donné par :

$$M_{ti} = \iint_{S\,aube\,i} O\vec{G}_i \wedge d\vec{f} + \iint_{S\,aube\,i} G_i\vec{M} \wedge d\vec{f} \qquad (3)$$

Où O est le centre de l'éolienne, G_i le centre de l'axe de rotation de la pale i et $d\vec{f}$ est la force élémentaire sur la pale i de pression et de viscosité, ainsi :

$$M_{ti} = C_{1i} + C_{2i} \qquad (4)$$

Où

$$C_{1i} = C_1\,aube\,i = \iint_{S\,aube\,i} O\vec{G}_i \wedge d\vec{f} \qquad (5)$$

Et

$$C_{2i} = C_2\,aube\,i = \iint_{S\,aube\,i} G_i\vec{M} \wedge d\vec{f} \qquad (6)$$

La puissance réellement récupérée par l'éolienne est donc :

$$P_{eff} = \sum_{i=1,2,3} M_{ti}\,\omega_1 + \sum_{i=1,2,3} C_{2i}\,\omega_2 \qquad (7)$$

Où ω_1 est la vitesse angulaire de l'éolienne et ω_2 est la vitesse angulaire relative de chaque pale autour de son axe propre.

Comme $\omega_2 = {-\omega_1}/{2}$ (8)

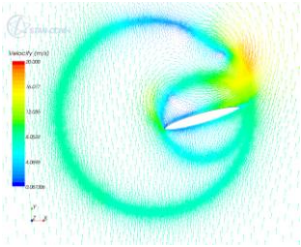
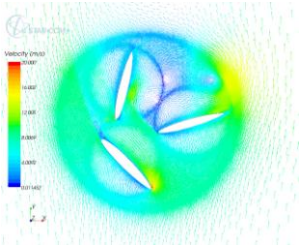
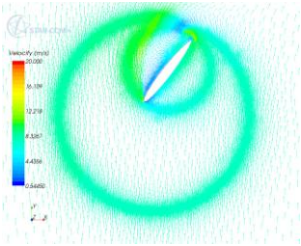
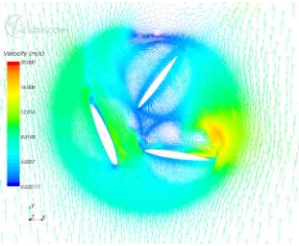
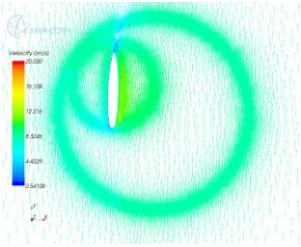
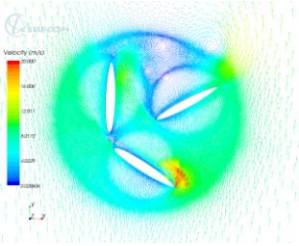
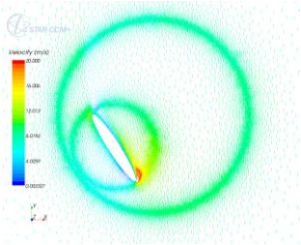
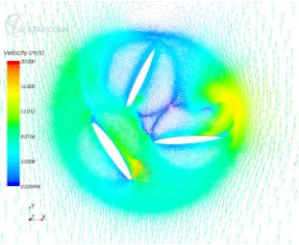
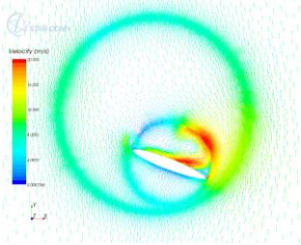
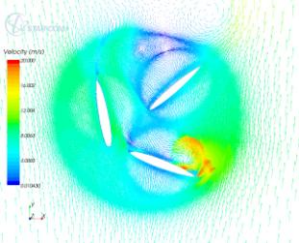
$$P_{eff} = \sum_{i=1,2,3} \left(M_{ti} + C_{1i}\right)\frac{\omega_1}{2} \qquad (9)$$

Et le coefficient de puissance est donné par l'équation (1) dans laquelle la surface balayée est celle représentée figure 5 et est définie pour les cas comportant 3 pales.

4. Résultats

4.1. Calage 15 degrés

Le champ de vitesses est représenté figures 7 à 11 pour le modèle à une pale et figures 12 à 16 pour le modèle à 3 pales et uniquement dans le cas des pales tourantes (cas a15i et b15i).Une même échelle a été choisie, la vitesse variant de 0 à 20 m/s. De même les contours d'isopression sont représentés figures 17 à 21 pour le modèle à une pale (cas a15i) et 22 à 26 pour le modèle à 3 pales avec une même échelle comprise ente -200 et 100 Pascal. Les résultats graphiques de champs de vitesse et de contours de pression pour les modèles à pales « fixes » ne sont pas donnés ici, mais seront commentés.
Les résultats globaux de coefficient de puissance en fonction de l'angle azimutal sont représentés figures 27 et 28.
Pour un angle intial de 15 degrés, pour les cas a15s, a15i et b15i, les résultats sont périodiques dès la 2ème période de calcul et on a pu constater, sur plusieurs révolutions, qu'aucune instabilité forte n'a été observée.
La figure 27 montre que le coefficient de puissance obtenu avec une pale « fixe » n'est pas du tout encourageant comme on pouvait s'y attendre. Il n'est, de plus, positif que pour des angles azimutaux compris entre 250 et 374 degrés. Si on compare l'allure de ce coefficient de puissance à celle du coefficient de puissance obtenu pour une pale tourante, on peut constater que ce dernier est supérieur au précédent et positif sur un plus grand secteur angulaire (entre 180 et 480 degrés).
Les résultats obtenus avec le cas b15s, pour trois pales à mouvement relatif fixe, montrent une forte instationarité (Cf. figure 28) et la périodicité apparait difficilement. Dans ce cas, l'interaction entre les pales est très importante et a pu être observée grâce aux champs de vitesse et aux champs de pression. Chaque pale face au vent agit comme un bouclier pour la pale suivante. Il s'ensuit que le coefficient de puissance obtenu est supérieur à celui obtenu avec une seule pale comme on peut le voir en comparant les figures 27 et 28. Toutefois, le coefficient de puissance obtenu pour l'ensemble des trois pales reste faible. L'augmentation du nombre de pales pourrait problabement augmenter ce coefficient, mais ce n'était pas l'objet de cette étude, les modèles à pales « fixes » servant uniquement à montrer le gain de la rotation de la pale autour de son axe.
Les figures 7-11 et 17 à 21 montrent les champs de vitesse et les contours de pression pour le cas a15i, à une seule pale tournante. L'ensemble des champs de vitesse observé est très intéressant. Pour une large échelle de l'angle azimutal compris entre 90 et 270 degrés, la pale semble glisser dans le flux d'air et ne perturbe pas trop l'écoulement du vent et confirme la théorie évoquée par Dieudonné [2006]. La figure 27 montre que le coefficient de puissance fourni par une pale est négatif sur une très faible échelle de l'angle azimutal, ce qui est intéressant et montre la nécessité d'avoir au moins deux pales.
En ce qui concerne le cas à trois pales, la périodicité est divisée par trois comme on peut le constater sur la figure 29. Si on compare les figures 7 à 11 aux figures 12 à 16, on peut constater, en comparant l'écoulement autour de la pale 1 (dans le cas de trois pales) à l'écoulement autour de la seule pale (figures à gauche) qu'il y a peu de différences. L'examen des contours de pression confirme cette remarque : l'écoulement autour d'une pale est peu influencé par la présence des autres Toutefois, contrairement aux pales "fixes", le coefficient de puissance par pale pour trois pales est légèrement plus petit comme on peut le constater figure 27.

 Fig. 7. *Champ de vitesses, θ=0 degré, a15i*	 Fig. 12. *Champ de vitesses, θ=0 degré, b15i*
 Fig. 8. *Champ de vitesses, θ=72 degrés, a15i*	 Fig.13. *Champ de vitesses, θ=72 degrés, b15i*
 Fig. 9. *Champ de vitesses ,θ=144 degrés, a15i*	 Fig. 14. *Champ de vitesses, θ=144 degrés, b15i*
 Fig. 10. *Champ de vitesses, θ=216 degrés, a15i*	 Fig. 15. *Champ de vitesses, θ=216 degrés, b15i*
 Fig. 11. *Champ de vitesses, θ=288 degrés, a15i*	 Fig. 16. *Champ de vitesses, θ=288 degrés, b15i*

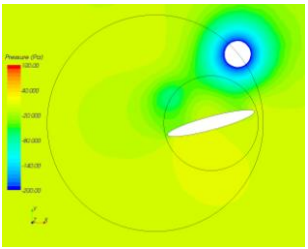


Fig. 17. *contours de pression, θ=0 degré, a15i*

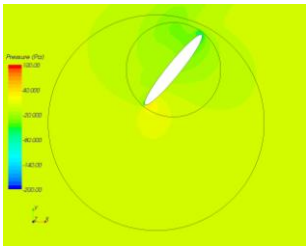


Fig. 18. *contours de pression, θ=72 degrés, a15i*

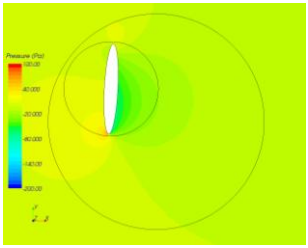


Fig. 19. *contours de pression, θ=144 degrés, a15i*

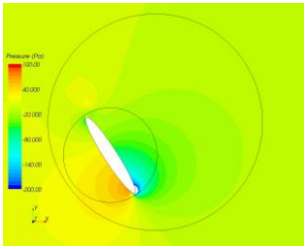


Fig. 20. *contours de pression,θ=216 degrees, a15i*

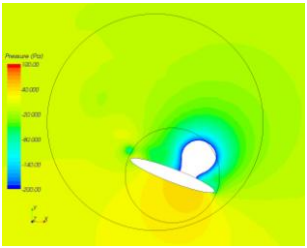


Fig. 21. *contours de pression,θ=288 degrees, a15i*

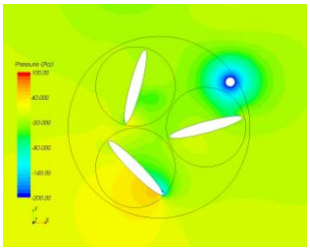


Fig. 22. *contours de pression, θ= 0 degré, b15i*

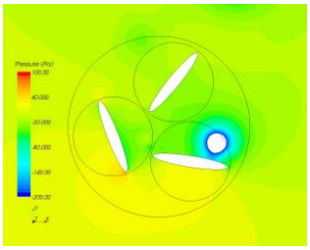


Fig. 23. *contours de pression, θ= 72 degrés, b15i*

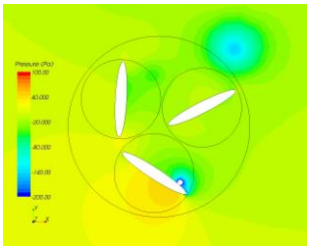


Fig. 24. *contours de pression,* θ= 144 degrés, b15i

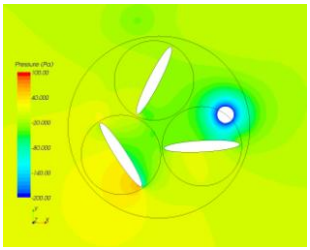


Fig. 25. *contours de pression,θ= 216 degrees, b15i*

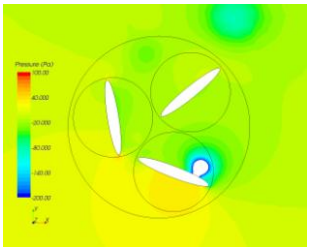


Fig. 26. *contours de pression,θ= 288 degrees, b15i*

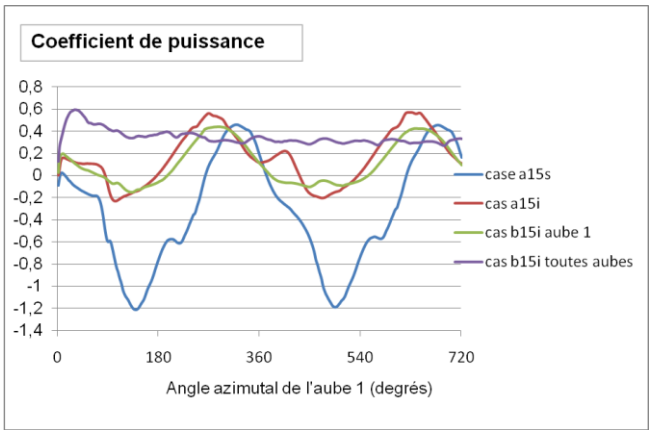


Fig. 27. *Coefficient de puissance pour deux cycles, angle de calage de 15 degrés*

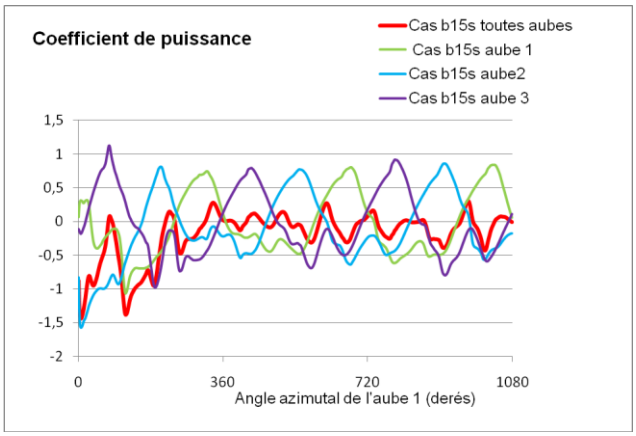


Fig. 28. *Coefficient de puissance pour trois cycles, angle de calage de 15 degrés, cas b15s*

4.2. Autres calages

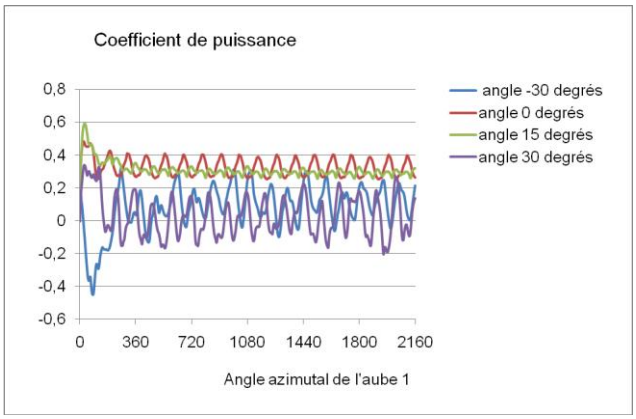


Fig. 29. *Coefficient de puissance pour six cycles et différents angles de calage*

L'intéret de la rotation des pales sur elles-mêmes a été montrée dans la première partie de cette étude. Dans cette deuxième partie, on présente les résultats pour quatre angles de calage différents (-30, 0, 15 et 30 degrés). Seuls les résultats globaux sont discutés. La figure 29 montre le coefficient de puissance en fonction de l'angle azimutal de la première pale pour les

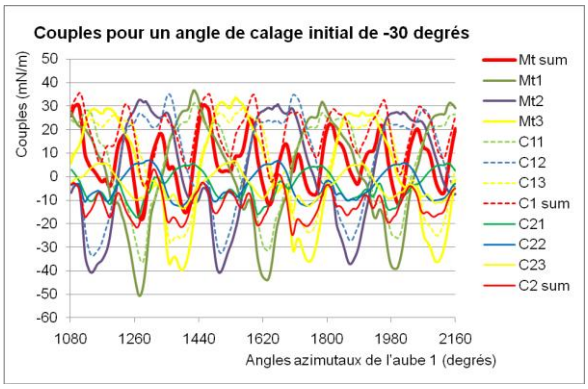


Fig. 30. Couples, cas b-30i

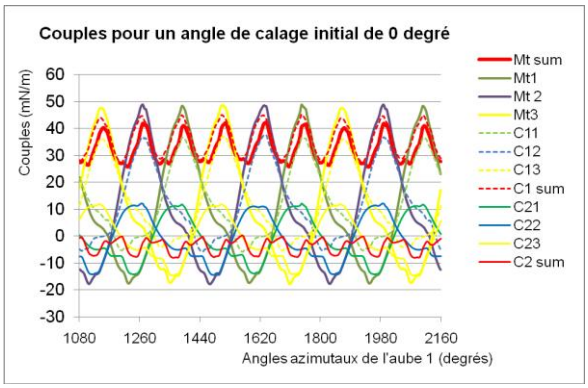


Fig. 31. Couples, cas b0i

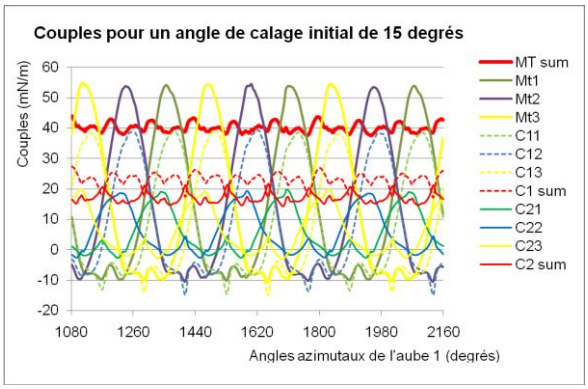


Fig. 32. Couples, cas b15i

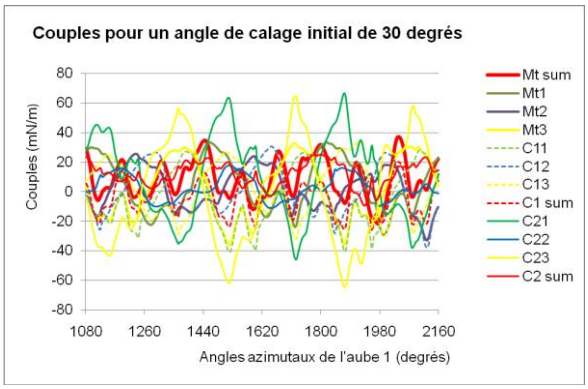


Fig. 33. Couples, cas b30i

quatre angles de calage étudiés. Les figures 30 à 33 représentent l'évolution des différents moments dans chaque cas. L'examen de ces résultats met en évidence une très grande instabilité pour les angles de calage de -30 et 30 degrés et un coefficient de performance médiocre. Au contraire, les résultats pour des angles de calage de 0 et 15 degrés sont très encourageants : une bonne periodicité avec une amplitude de variation, en fonction de l'azimut, faible est observée.

Le coefficient de performance moyen (moyenne sur trois rotations) est donné figure 34. Ce graphique montre que le coefficient de performance est maximum pour un angle d'incidence compris entre 0 et 15 degrés.

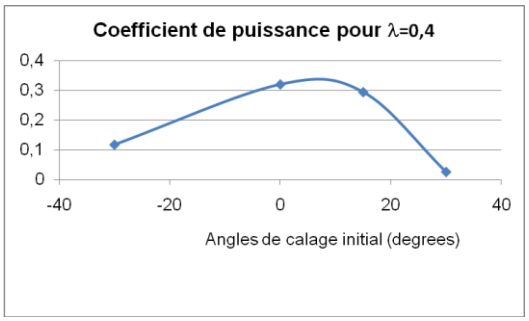


Fig. 24. Coefficient de puissance moyen en fonction de l'angle de calage

5. **Conclusion**

Des modélisations numériques sur la micro-éolienne à axe vertical et à pales tournantes ont été réalisées en vue de déterminer ses performances. On a pu observer :

- Que la performance de ce type d'éolienne est très bon comme on l'espérait et meilleur que celui des éoliennes à axe vertical et à pales fixes
- Chaque pale semble glisser dans le flux comme le préconisait Dieudonné [2005] : chaque pale est constamment orientée par rapport à la direction du vent pour une efficacité maximum tel un voilier bien réglé.
- Le coefficient de puissance moyen maximum pour λ=0,4 est d'environ 32% (coefficient théorique hors pertes mécaniques)

Beaucoup de travail reste bien évidemment à faire :

- L'aspect développement technologique déjà bien entrepris entre l'Entreprise et l'Ecole.
- L'étude de l'influence du nombre de pales pour confirmer une faible influence d'une pale sur les autres et pour déterminer le nombre de pales optimum.
- L'étude de l'influence des paramètres géométriques tels que le rayon des axes des pales, la forme et la dimension des pales en n'oubliant pas que ce type d'éolienne est un support publicitaire
- Confirmer ces résultats numériques par un dispositif expérimental

D'ores et déjà, la collaboration entre l'Entreprise et l'Ecole continue au travers de projets d'élèves.

Il s'avère également que d'autres jeunes entrepreneurs travaillent sur le même principe d'éolienne mais pour fournir de l'énergie aux habitations.

6. Remerciements

Les auteurs remercient F. Penet, P. de Bodinat and J. Valette (Windisplay) pour leur avoir confié cette étude et pour avoir autorisé la publication des résultats et Olivier Bachman (CD Adapco) pour l'aide dans la simulation de star CCM+.

7. Nomenclature

C_p coefficient de puissance (sans unité)

C_{eff} Couple réel (mN)

D diamètre de la zone éolienne (m)

G_i Centre de rotation de la pale i

M_{ti} Couple de chaque pale par rapport au centre de l'éolienne, mN

O centre de rotation de l'éolienne dans le modèle 2D

P_{eff} puissance réelle

R rayon des axes des pales, =0.62 m

R_e nombre de Reynolds basé sur la longueur de la pale

R_t rayon des extrémités de pale, m

S surface balayée, m^2

V_0 vitesse du vent, =8 m/s

λ rapport des vitesses (sans unité)

ρ masse volumique de l'air, kg/m^3

θ angle azimutal de la pale 1(degrés)

ω_1 vitesse angulaire de l'éolienne (rad/s)

ω_2 vitesse angulaire des pales (rad/s)

i indice d'pale

Références

[1] P. Cooper, O. Kennedy, "Development and analysis of a novel Vertical Axis Wind Turbine", 2005, http://www.datataker.com/public_domain/PD71%20Development%20and%20analysis%20of%20a%20novel%20vertical%20axis%20wind%20turbine.pdf, consulté en septembre 2010

[2] P. Cooper , « Wind Power Generation and wind Turbine Design », chapitre 8, WIT Press, ISBN 978-1-84564-205-1, 2010

[3] P.A.M. Dieudonné, « Eolienne à voilure tournante à fort potentiel énergétique », Demande de brevet d'invention FR 2 899 286 A1, brevet INPI 0602890, 03 avril 2006

[4] D. le Gouriérès, “Les éoliennes, théorie, conception et calcul pratique”, *Editions du Moulin Cadiou*, mars 2008, ISBN 9782953004106
[5] E. Hau, « Wind turbines », Springer, Germany, 2000
[6] T. Hayashi, Y. Hara, T. Azui, I.S. Kang, “Transient response of a vertical axis wind turbine to abrupt change of wind speed”, *EWEC 2009*
[7] F.H. King, “Farmers of Forty Centuries : Organic Farming in china, Korea, and Japan, Courier Dover Publications, 2004
[8] T. Kiwata, S. Takata, T. Yamada, N. Komatsu, T. Kita, S. Kimura and M. Elkhoury, “Performance of a vertical-axis wind turbine with variable-pitch straight blades”, *the eighteenth International Symposium on Transport phenomena*, 27-30 August 2007, Daejeon, Korea
[9] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi “Eoliennes”, *Techniques de l’ingénieur* BM 4 640,, pp 1-24, 2001
[10] David J. Malcom « Market, Cost, and technical analysis of vertical and horizontal axis wind turbines », *Global Energy concepts, LLC*, May 2003
[11] J. Martin, “Energies éoliennes”, *Techniques de l’ingénieur* B 8 585, pp 1-21, 1987
[12] I. Paraschivoiu, « Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept », *Polytechnic International Press*, 2002
[13] Pawsey N.C.K., “Development and evaluation of passive variable-pitch vertical axis wind turbines, PhD Thesis, Univ. New South Wales, Australia, 2002.