

Modifier passivement l'angle de calage grâce à des pales flexibles d'éolienne bio-inspirées.

V. COGNET^{a,b}, S. COURRECH DU PONT^b, B. THIRIA ^a

a. Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (PMMH), UMR CNRS 7636, PSL - ESPCI Paris, Sorbonne Université - UPMC - Univ. Paris 06, Sorbonne Paris Cité - UPD - Univ. Paris 07, 10 rue Vauquelin 75005 Paris, France. (vincent.cognet@espci.fr)

b. Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, UMR 7057 CNRS-UPD Paris 7, Bât.

Condorcet, 10 rue Alice Domon & Léonie Duquet, 75013 Paris, France

(sylvain.courrech@univ-paris-diderot.fr)

Résumé :

L'éolien est un des secteurs clé des énergies renouvelables. Profitant des améliorations technologiques, l'éolienne est un moyen de plus en plus efficace de récupérer la puissance du vent. Cependant la recherche d'un haut rendement maximal oblige les éoliennes à fonctionner sur une plage étroite de vent ou de vitesse de rotation. Ainsi une variation de ces paramètres entraîne une chute drastique de l'efficacité. Dans cet article nous proposons un moyen de conserver un fort rendement maximal tout en élargissant la plage de hauts rendement en utilisant des pales flexibles selon la corde. Cette recherche est inspirée des précédents travaux sur le vol des insectes et la reconfiguration des plantes. En effet la flexibilité des ailes d'insectes leur permet de rediriger la propulsion et d'augmenter l'efficacité de vol. Quand aux plantes ou aux algues, leur déformation diminue la force de traînée qui s'exerce sur elles et menace de les déraciner. Dans cet article nous proposons une étude expérimentale de l'éolienne en faisant varier les paramètres d'entrée que sont : la vitesse de vent U , le couple résistant C , l'angle de calage initial θ_0 et le module de courbure de la pale B . L'angle de calage de la pale flexible varie en fonctionnement sans apport extérieur d'énergie. Ce comportement est expliqué par l'action conjointe des forces aérodynamiques et centrifuge qui dominant respectivement à faible et à grande vitesse de rotation.

Abstract :

Wind energy is one of key sectors of the renewable energies. Taking advantage of technological improvements, wind turbines are more and more effective to collect wind power. However optimising for a maximal high efficiency require wind turbines to work on a narrow range of wind velocity or rotation speed. Thus a variation of these parameters from the nominal point leads to a drastic fall of the efficiency. In this article we explore a way to keep a high maximal efficiency while widening the high efficiency range by using chordwise flexible blades. This research is inspired by previous works on insects flight and plants reconfiguration. The flexibility of insects wings allows them to redirect the propulsion and to increase flight performance. Concerning plants and seaweeds, bending is a way to decrease the drag force. In this article we expose an

experimental study of the wind turbine by making vary four input parameters : the incoming wind velocity U , the resistive torque C , the initial pitch angle θ_0 and the bending modulus of the blade B . The pitch angle of the flexible blade is changing during operation without extra energy input. This behaviour is explained by the coaction of aerodynamic and centrifugal forces which respectively dominate at low and high rotation rates.

Mots clefs : Eolien, interaction fluide structure, reconfiguration, optimisation, flexibilité.

Introduction

L'éolien est un secteur d'avenir des énergies renouvelables. Cependant les rapports de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) ou de l'Organisation pour la Coopération et le Développement Economique (OCDE) estiment que l'éolien serait une potentielle source de 12% de l'électricité produite sur la planète en 2050. Or ce secteur n'en produit aujourd'hui que 4%, ce qui signifie que l'effort principal dans le développement de cette filière reste encore à fournir. Les défis sont nombreux : amélioration des performances, mais aussi agrandissement des éoliennes et des fermes.

Cependant l'optimisation des éoliennes dans le but d'atteindre des rendements toujours plus grands a conduit à rétrécir leur plage de fonctionnement [1, 2]. Ainsi les pales sont conçues pour fonctionner avec un certain angle d'attaque, et une variation de vitesse de vent ou de vitesse de rotation fait drastiquement chuter le rendement. Pour répondre à cet inconvénient une multitude de solutions ont été envisagées, allant des volets en bord d'attaque, en bord de fuite, en bout de pale et un changement motorisé en fonctionnement de l'angle de calage [2, 3]. Dans cet article nous proposons d'étudier une solution entièrement passive à l'aide de pales flexibles suivant la corde. Sous l'effet des forces aérodynamiques (portance et trainée) et centrifuge, la pale flexible plie respectivement de façon à augmenter ou à réduire son angle de calage.

Cette recherche est motivée par des travaux précédents portant sur la reconfiguration des plantes et algues, et sur le vol des insectes. En pliant les structures déformables diminuent la force de trainée qui s'exerce sur elles [4, 5, 6]. Dans le cas des insectes, la flexibilité de leurs ailes leur permet de rediriger la force de poussée afin d'accroître leur propulsion sans apport d'énergie supplémentaire [7, 8, 9].

La déformation des pales d'éolienne a souvent été considérée comme un problème : à mesure que la taille des turbines augmente, la pale est soumise à des instabilités de plus en plus contraignantes à éviter [10, 2, 11]. Néanmoins certaines études récentes proposent de considérer la flexibilité comme un atout pour augmenter les performances du rotor [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. Cependant ces études ne considèrent pas l'angle de calage comme un paramètre clé. Or le principal effet de la flexibilité est de changer l'angle de calage sous l'effet conjoint des forces aérodynamiques et centrifuge qui dominant respectivement à basse et grande vitesse de rotation. Nous proposons ici une étude expérimentale sur un espace des paramètres pertinent. Le résultat principal de l'ajout de pales d'éolienne flexibles adaptées est de maintenir le système à un haut niveau d'efficacité même lorsqu'il n'est pas au point de fonctionnement optimal. Cet

effet permet entre autres une augmentation de 35% du rendement dans la bande passante, obtenue à partir de mécanismes passifs, sans apport d'énergie.

1 Dispositif expérimental.

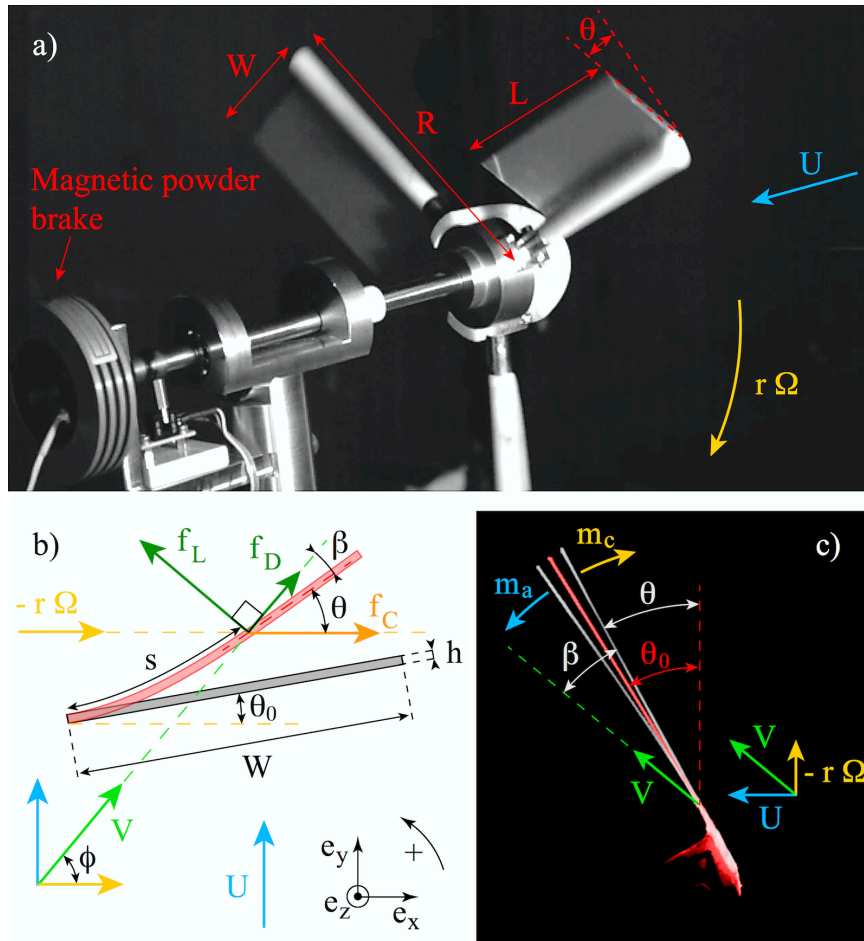


Figure 1: (a) Eolienne utilisée pour les expériences. (b) Schéma des forces agissant sur la pale flexible (en rouge) : les forces aérodynamiques de portance f_L et de traînée f_D augmentent l'angle de calage θ par rapport à l'angle de calage initial θ_0 , tandis que la composante ortho-radiale de la force centrifuge f_C pousse la pale à réduire l'angle de calage vers 0 degré. (c) Superposition de trois photos de la pale vues du bout de pale : sans vent ni rotation (rouge), $\theta = \theta_0 = 28^\circ$; sous une vitesse de vent $U = 13 \text{ m.s}^{-1}$ et faible vitesse de rotation $\lambda = 0.25$, le moment aérodynamique m_a domine et $\theta = 30.8^\circ$; sous une vitesse de vent $U = 13 \text{ m.s}^{-1}$ et grande vitesse de rotation $\lambda = 2.35$, le moment centrifuge m_c domine et $\theta = 25.3^\circ$.

Les expériences ont été menées sur un modèle réduit présenté sur la figure 1(a). Il s'agit d'une éolienne de hauteur de mât $H = 20 \text{ cm}$, de rayon $R = 14.6 \text{ cm}$, dont chacune des trois pales est composée d'une tige radiale rigide, sur laquelle est encastrée une plaque de longueur $L = 10 \text{ cm}$ et de largeur $W_f = 3.5 \text{ cm}$. Trois rigidités de plaque sont testées : les plaques RB , composées de 1 cm de résine synthétique, sont considérées comme rigides ; les plaques F_1 et F_2 , composées respectivement de $250 \mu\text{m}$ et $125 \mu\text{m}$ de PET (poly-téréphtalate d'éthylène), sont flexibles et la variation d'angle moyen ne dépassent pas respectivement 6° et 15° dans les conditions de

vent auxquelles nous les avons soumises. Du fait de leur encastrement, les pales flexibles se déforment principalement suivant la corde. Dans cet article, les performances de l'éolienne à pales de différentes flexibilités sont étudiées et comparées avec celles de l'éolienne à pales rigides.

2 Caractérisation de l'éolienne.

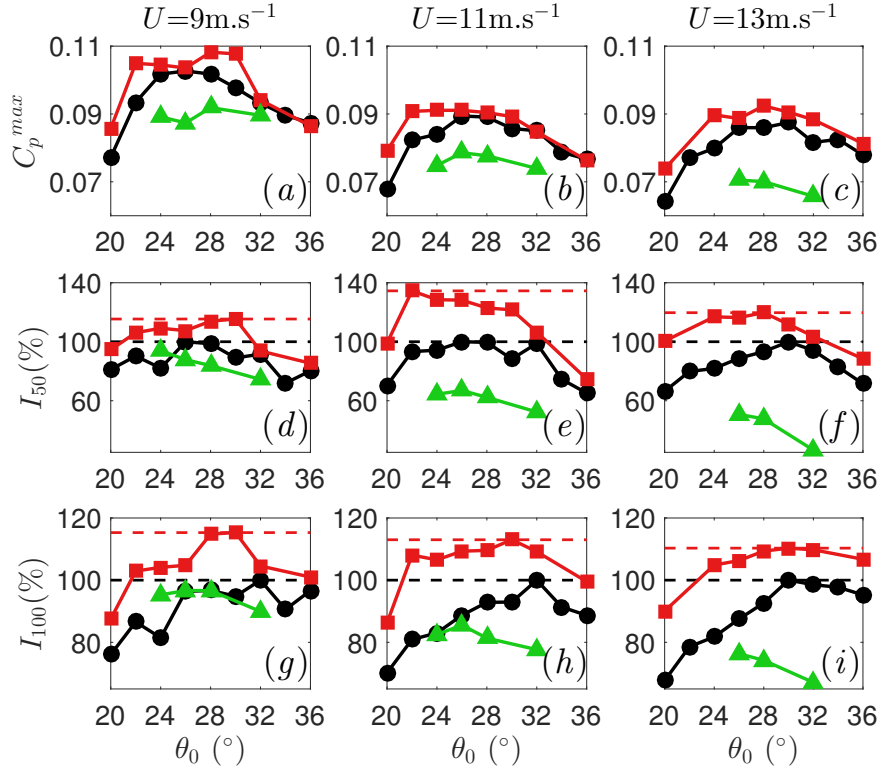


Figure 2: Quantités caractéristiques des courbes $C_P(C)$ effectuées à différentes vitesses de vent incident U , pour différents angles de calage initiaux θ_0 et différentes rigidités de pales (noir : RB , rouge : F_1 et vert : F_2). Sont représentés : le maximum C_P^{max} de chaque courbe (première ligne), l'intégrale I_{50} de la courbe $C_P(\lambda)$ sur la plage de rendements supérieurs à 50% de C_P^{max} (deuxième ligne), et l'intégrale I_{100} de la courbe $C_P(C)$ sur toute la plage de rendements (troisième ligne). Chaque intégrale est normalisée par l'intégrale maximale obtenue avec des pales rigides RB à la vitesse de vent U considérée.

Afin de caractériser cette éolienne (figure2), nous avons fait varier l'angle de calage initial θ_0 (sans rotation et sans vent), la vitesse de vent incident U , et pour chaque rigidité de pale (RB : noir, F_1 : rouge, F_2 : vert), la vitesse de rotation angulaire Ω a été mesurée en fonction du couple résistant C appliqué par un frein à poudre magnétique. Ce frein simule l'action de la génératrice qui s'oppose au mouvement de rotation de l'éolienne. À partir de ces mesures, on calcule le rendement C_P défini de la manière suivante :

$$C_P = \frac{C\Omega}{0.5\rho_{air}U^3\pi R^2}, \quad (1)$$

où ρ_{air} est la masse volumique de l'air. Chaque courbe $C_P(C)$ est tracée (voir figure3(b)) et trois grandeurs caractéristiques sont extraites : le maximum de la courbe C_P^{max} , l'intégrale du rendement sur la plage où le rendement est supérieur à 50% du rendement maximal I_{50} , et

l'intégrale du rendement sur toute la plage de fonctionnement I_{100} . Chaque intégrale est normalisée par l'intégrale maximale obtenue avec les pales rigides, à la vitesse de vent considérée. Ces trois grandeurs correspondent aux trois lignes de graphes de la figure 2.

Quelque soit la grandeur caractéristique considérée, la vitesse de vent incidente ou l'angle de calage, les courbes obtenues avec les pales F_1 ont un rendement supérieur à celui de leur équivalent rigides. L'augmentation de I_{50} et de I_{100} monte respectivement jusqu'à 35% et 15%. Notons également que les graphes mettent en lumière un optimum de performances en fonction de l'angle de calage initial autour de $\theta_0 = 28^\circ$. Nous reviendrons en détails sur cet optimum dans la suite. Enfin remarquons que le cas F_2 fournit de faibles rendements, dans la plupart des cas inférieurs au cas RB .

3 Variation passive de l'angle de calage.

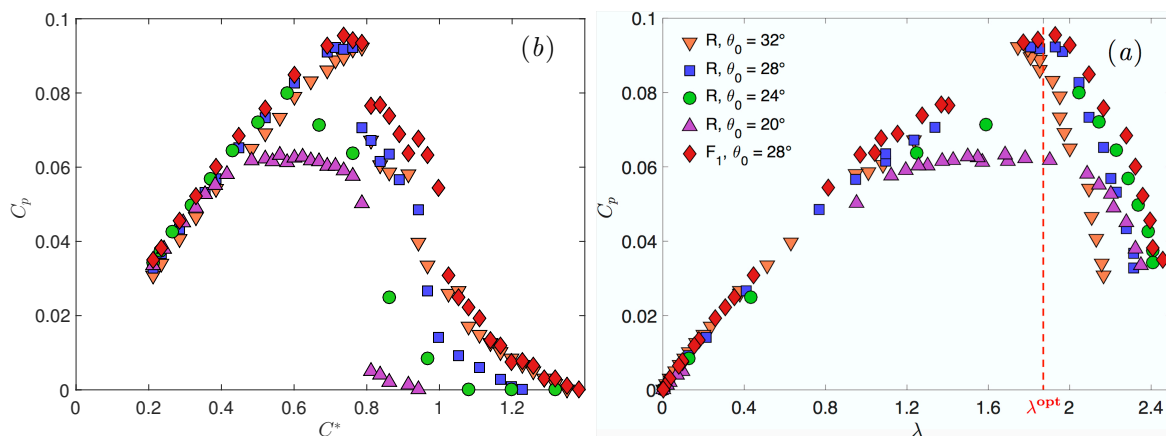


Figure 3: (a) Courbes du rendement C_P en fonction de la vitesse spécifique de rotation λ , à $U = 13 \text{ m.s}^{-1}$, avec la pale semi-flexible F_1 à $\theta_0 = 28^\circ$, et pour comparaison avec la pale rigide RB à différents angles de calage initiaux $\theta_0 = 20^\circ, 24^\circ, 28^\circ, 32^\circ$. (b) Courbes du rendement C_P présentées dans la figure (a) en fonction du couple résistant adimensionné C^* . L'incertitude est principalement due aux appareils de mesure et reste de l'ordre de grandeur des marqueurs. (*remplacer R par RB et inverser (a) et (b))

Afin de mieux comprendre les mécanismes à l'oeuvre dans l'interaction entre l'air et la plaque flexible, la courbe de rendement du cas F_1 fournissant le plus haut rendement ainsi que la plus grande intégrale I_{50} à $U = 13 \text{ m.s}^{-1}$ ($\theta_0 = 28^\circ$) a été comparé avec différentes courbes obtenues avec des pales rigides ($\theta_0 = 20^\circ, 24^\circ, 28^\circ, 32^\circ$). Les graphes sont rassemblés dans la figure 3(a). La courbe F_1 atteint le même maximum que la courbe RB au même angle de calage initial $\theta_0 = 28^\circ$. Cependant à grand couple résistant $C^* \geq 1$, c'est-à-dire à faible vitesse de rotation, le rendement du cas F_1 à $\theta_0 = 28^\circ$ tend vers celui du rigide RB à $\theta_0 = 32^\circ$. Le mode de représentation $C_P(C)$ a tendance à tasser les courbes à faible couple résistant C^* . Afin de visualiser ce domaine qui correspond aux grandes vitesses de rotation, le rendement C_P des courbes de la figure 3(a) est représenté en fonction de la vitesse spécifique de rotation $\lambda = \frac{R\Omega}{U}$ sur la figure 3(b). À grandes vitesses de rotation $\lambda \geq 2.2$, le rendement du cas F_1 à $\theta_0 = 28^\circ$ tend vers celui du rigide RB à $\theta_0 = 24^\circ$.

Des photos du bout de pale de l'éolienne ont été prises à l'arrêt et à divers points de fonctionnement. La figure 1(c) montre la photo de la pale à l'arrêt sans vent $\theta = \theta_0 = 28^\circ$ (en rouge) et

deux photos correspondant (de gauche à droite) à $\lambda = 0.25$, $\theta = 31.8^\circ$ et à $\lambda = 2.35$, $\theta = 25.3^\circ$. Ainsi à faible vitesse de rotation, la pale se plie de manière à augmenter l'angle de calage et ainsi augmenter le rendement par rapport à une pale rigide au même angle de calage initial. À l'inverse, lorsque l'éolienne tourne rapidement, la pale se plie en sens inverse de façon à diminuer l'angle de calage, mais à augmenter le rendement par rapport à une pale rigide au même angle de calage initial. Dans le cas F_1 , l'angle de calage de la pale flexible décroît avec la vitesse de rotation λ , ce qui a pour effet à augmenter le rendement de l'éolienne de part et d'autre du maximum en rendement.

Le démarrage de l'éolienne constitue un point de fonctionnement particulier de l'éolienne. Parce

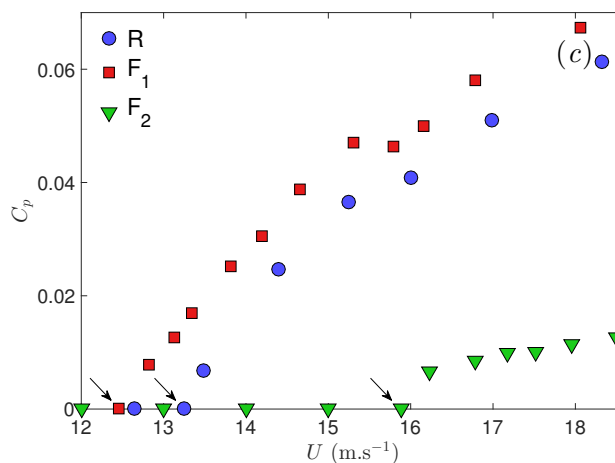


Figure 4: Courbes du rendement C_P en fonction de la vitesse de vent incident U , pour un angle de calage initial $\theta_0 = 30^\circ$, pour les trois rigidités de pale RB , F_1 et F_2 , pour un couple résistant $C = 90.9 \text{ mN.m}$. Une flexibilité modérée de pale permet un démarrage précoce du système. (*enlever (c) et remplacer R par RB)

qu'il se situe loin du point de fonctionnement nominal, le système n'est souvent pas optimisé dans cette région. Comme la pale flexible a pour principal effet d'améliorer les performances de l'éolienne lorsque celle-ci n'est pas optimisée, le démarrage en bénéficie significativement. La figure 4 présente des courbes de rendement C_P en fonction de la vitesse de vent incidente U pour un couple résistant fixé $C = 90.9 \text{ mN.m}$ pour les trois rigidités de pale (RB : bleu, F_1 : rouge, F_2 : vert), à l'angle de calage initial optimal pour la pale rigide $\theta_0 = 30^\circ$. La flexibilité modérée F_1 diminue la vitesse de démarrage de 0.8 m.s^{-1} par rapport à une éolienne à pales rigides. Et après le démarrage, le rendement est bien supérieur de la pale F_1 . À l'extrême, une flexibilité trop grande retarde de démarrage et conduit à de faibles rendements.

4 Etude des forces sur la pale.

La pale flexible étant encastrée dans une tige radiale rigide, la déformation suivant le rayon est négligeable devant sa déformation suivant la corde. Ainsi la pale flexible est modélisée par une série de tiges flexibles de type Euler-Bernoulli, encastrées à un bout et libres à l'autre extrémité. Les forces agissant sur un élément de poutre sont le chargement aérodynamique d'une part, à travers les forces de portance f_L et de trainée f_D , et la force centrifuge d'autre part, dont la composante normale à la pale exerce un moment m_c autour de la tige opposé au moment m_a dû

aux forces aérodynamiques. Dans une approche quasi-stationnaire, l'équation adimensionnée régissant la variation de l'angle de calage est la suivante :

$$\frac{\partial^3 \theta}{\partial s^3} = C_Y(1 + \lambda^2) [C_L(\beta(s)) \cos(\beta(s)) + C_D(\beta(s)) \sin(\beta(s))] - C_C \lambda^2 \sin(\theta(s)) \int_0^s \cos(\theta(s')) ds' \quad (2)$$

avec les conditions aux limites $\theta(0) = \theta_s(1) = \theta_{ss}(1) = 0$. C_Y et C_C sont respectivement appelés les nombres de Cauchy et centrifuge :

$$C_Y = \frac{\rho U^2 W^3}{2B} \quad (3)$$

$$C_C \lambda^2 = \frac{\rho_{blade} \Omega^2 h W^4}{B}. \quad (4)$$

Au démarrage, $\lambda = 0$ et il ne subsiste que le premier terme du membre de droite dans l'équation 2 : l'angle de calage effectif θ est supérieur à l'angle de calage initial θ_0 , ce qui est en accord avec les observations de la figure 1(c) et 3(a). À l'inverse, à grande vitesse de rotation, le terme issu de la force centrifuge joue un rôle dominant et l'angle de calage effectif θ peut devenir inférieur à l'angle de calage initial θ_0 , attestant les observations de la figure 1(c) et 3(b). Expérimentalement sur la photo de la figure 1(c), $(C_Y, C_C) = (0.54, 0.51)$, ce qui permet aux deux effets de dominer suivant la vitesse de rotation.

Conclusion.

Cette étude porte sur une éolienne réduite, dotée de pales flexibles capables de se déformer suivant la corde. Ses performances sont comparées avec le même système doté de pales rigides. En explorant quatre paramètres d'entrée que sont la vitesse de vent incident U , le couple résistant C , l'angle de calage θ_0 et le module de courbure de la pale B , nous avons montré qu'il existe une plage de flexibilité de pale qui permet d'améliorer de manière significative le rendement de l'éolienne lorsque celle-ci n'est pas au point de fonctionnement optimum, et en particulier au démarrage en diminuant notablement la vitesse de démarrage. L'amélioration des performances est due à une modification passive de l'angle de calage durant le fonctionnement, sous l'effet des forces centrifuge et aérodynamiques (forces de portance et de trainée). Cette modification passive de l'angle de calage est gouvernée par deux nombres adimensionnés, à savoir le nombre de Cauchy et le nombre centrifuge, dont la valeur peut être contrôlée à partir de la densité du matériau ρ_{blade} , l'épaisseur de la pale h , et le module de courbure B .

References

- [1] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*. Routledge, 2015.
- [2] P. J. Schubel and R. J. Crossley, "Wind Turbine Blade Design," *Energies*, vol. 5, no. 9, pp. 3425–3449, 2012.
- [3] D. Castaignet, T. Barlas, T. Buhl, N. Poulsen, J. Wedel-Heinen, N. Olesen, C. Bak, and T. Kim, "Full-scale test of trailing edge flaps on a Vestas V27 wind turbine: active load reduction and system identification," *Wind Energ.*, vol. 17, no. 4, pp. 549–564, 2014.

-
- [4] S. Vogel, “Drag and Reconfiguration of Broad Leaves in High Winds,” *J. Exp. Bot.*, vol. 40, no. 8, pp. 941–948, 1989.
- [5] E. de Langre, “Effects of Wind on Plants,” 2008.
- [6] F. Gosselin, E. de Langre, and B. A. Machado-Almeida, “Drag reduction of flexible plates by reconfiguration,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 650, pp. 319–341, 2010.
- [7] B. Thiria and R. Godoy-Diana, “How wing compliance drives the efficiency of self-propelled flapping flyers,” *Phys. Rev. E*, vol. 82, no. 1, p. 015303, 2010.
- [8] S. Ramananarivo, R. Godoy-Diana, and B. Thiria, “Rather than resonance, flapping wing flyers may play on aerodynamics to improve performance,” *PNAS*, vol. 108, no. 15, pp. 5964–5969, 2011.
- [9] C. Marais, B. Thiria, J. E. Wesfreid, and R. Godoy-Diana, “Stabilizing effect of flexibility in the wake of a flapping foil,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 710, pp. 659–669, 2012.
- [10] M. Jureczko, M. Pawlak, and A. Meżyk, “Optimisation of wind turbine blades,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, no. 2–3, pp. 463–471, 2005.
- [11] F. L. Ponta, A. D. Otero, L. I. Lago, and A. Rajan, “Effects of rotor deformation in wind-turbine performance: The Dynamic Rotor Deformation Blade Element Momentum model (DRD–BEM),” *Renewable Energy*, vol. 92, pp. 157–170, 2016.
- [12] M. R. Motley, Z. Liu, and Y. L. Young, “Utilizing fluid–structure interactions to improve energy efficiency of composite marine propellers in spatially varying wake,” *Composite Structures*, vol. 90, no. 3, pp. 304–313, 2009.
- [13] E. Hoogedoorn, G. B. Jacobs, and A. Beyene, “Aero-elastic behavior of a flexible blade for wind turbine application: A 2d computational study,” *Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 778–785, 2010.
- [14] M. Puterbaugh and A. Beyene, “Parametric dependence of a morphing wind turbine blade on material elasticity,” *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 466–474, 2011.
- [15] D. MacPhee and A. Beyene, “A flexible turbine blade for passive blade pitch control in wind turbines,” in *2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM)*, vol. 1, pp. 196–199, 2011.
- [16] P. Krawczyk, A. Beyene, and D. MacPhee, “Fluid structure interaction of a morphed wind turbine blade,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 37, no. 14, pp. 1784–1793, 2013.
- [17] D. W. MacPhee and A. Beyene, “Experimental and Fluid Structure Interaction analysis of a morphing wind turbine rotor,” *Energy*, vol. 90, Part 1, pp. 1055–1065, 2015.
- [18] D. W. MacPhee and A. Beyene, “Fluid–structure interaction analysis of a morphing vertical axis wind turbine,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 60, pp. 143–159, 2016.