



**HAL**  
open science

# ETUDE D'UN CONTROLE-COMMANDE DE CALAGE DE PALE POUR UNE EOLIENNE OFFSHORE A AXE DE ROTATION VERTICAL

Hubert Branger, B. Paillard, C Luneau, D Bourras, S Roy, J J Lasserre

► **To cite this version:**

Hubert Branger, B. Paillard, C Luneau, D Bourras, S Roy, et al.. ETUDE D'UN CONTROLE-COMMANDE DE CALAGE DE PALE POUR UNE EOLIENNE OFFSHORE A AXE DE ROTATION VERTICAL. 16 èmes Journées de l'Hydrodynamique, Nov 2018, Marseille, France. hal-02081418

**HAL Id: hal-02081418**

**<https://hal.science/hal-02081418>**

Submitted on 27 Mar 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## 16<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydrodynamique

27-29 novembre 2018 - Marseille



### ETUDE D'UN CONTROLE-COMMANDE DE CALAGE DE PALE POUR UNE EOLIENNE OFFSHORE A AXE DE ROTATION VERTICAL

### *STUDY OF A VARIABLE PITCH CONTROL SYSTEM FOR AN OFFSHORE VERTICAL AXIS WIND TURBINE*

H. BRANGER<sup>(1)</sup>, B. PAILLARD<sup>(2)</sup>, C. LUNEAU<sup>(3)</sup>, D. BOURRAS<sup>(4)</sup>, S. ROY<sup>(5)</sup>,  
J.J. LASSERRE<sup>(6)</sup>

[branger@irphe.univ-mrs.fr](mailto:branger@irphe.univ-mrs.fr)

<sup>(1)</sup> Institut de Recherche sur les phénomènes Hors-Equilibre, UMR 7342, Aix-Marseille-Université, CNRS, ECM.

<sup>(2)</sup> EOLFI, Bordeaux et Paris, <sup>(3)</sup> Institut Pytheas, Marseille, <sup>(4)</sup> Mediterranean Institute of Oceanography, Marseille

<sup>(5)</sup> Curtin University Sarawak Malaysia, <sup>(6)</sup> Dantec Dynamics, Nozay

#### Résumé

Dans le cadre du contrat Région PACA AEROPITCH et du projet SpinFloat porté par EOLFI, nous avons étudié les effets que pourraient apporter le contrôle-commande du calage des pales (pitch) pour une éolienne à axe de rotation verticale, à trois pales, destinée à terme à être posée en mer sur un support flottant. Nous avons construit une maquette à l'échelle que nous avons testée dans la grande soufflerie air-mer de l'Institut Pythéas sur Luminy à Marseille. Nous avons conçu un système de servomoteurs permettant de tourner de façon indépendante les trois pales de l'éolienne pour ajuster au mieux l'angle d'attaque des pales par rapport au vent incident à chaque instant de la rotation. Nous avons mesuré les efforts, les vitesses de rotation, et l'écoulement d'air autour des pales par un système d'imagerie de particules (PIV) avec un large système d'ensemencement de particules. Nous avons optimisé des lois de pitch pour atteindre des vitesses de rotation maximales en utilisant une boucle automatique d'optimisation de paramètres par algorithme génétique. Nous avons ensuite développé des simulations numériques CFD prenant en compte le pitchage des pales pendant la rotation. Les résultats numériques sont discutés par comparaison aux mesures PIV.

#### Summary

In the framework of the PACA Region AEROPITCH contract and the EOLFI project SpinFloat, we have studied the potential benefits of pitching the blades for an offshore vertical axis wind turbine. We built an experimental scale model with a system of three servomotors able to change continuously the angle of wind attack of the three blades continuously during the turbine rotation. Experiments were conducted in the large air-sea wind tunnel of Pytheas Institute in Luminy-Marseille. We have measured the forces, moments, and the rotational speed. We used a particle imaging system (PIV) to characterize the air flow around the blades by a particle imaging system (PIV) with a large seeding particles system. We succeeded to optimize the pitch-control laws to achieve maximum rotational speeds by using a loop optimizer based on genetic algorithm. We then developed CFD numerical simulations taking into account the blade pitching. Numerical results are discussed in comparison with PIV measurements.

## I – Introduction

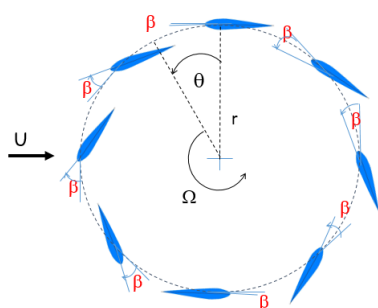
L'éolien offshore flottant est en plein essor au niveau mondial, et particulièrement au niveau Français. Une éolienne flottante, prototype de 2 MW est en test sur le site d'expérimentation SEM-REV de l'Ecole Centrale Nantes au Croisic alimentant déjà le réseau électrique, et quatre parcs pilotes sont prévus à court terme sur les côtes Françaises. Les projets d'éolien flottant concernent exclusivement des turbines « classiques » à axe horizontal de rotation (HAWT pour Horizontal Axis Wind Turbine) car toutes les éoliennes de grandes dimensions depuis des années sont à axe horizontal, et le retour sur expérience est beaucoup plus important pour ce genre de machines. Pourtant les turbines à axe vertical de rotation (VAWT pour Vertical Axis Wind Turbine) restent des candidats potentiellement attractifs pour l'éolien flottant car a) leur centre de gravité est nettement plus bas que celui des HAWT et à puissance équivalente, les flotteurs peuvent être 20% moins volumineux [10, 11]; b) elles peuvent fonctionner à des angles de gîte plus importants [5]; c) leur turbine n'a pas à tourner lorsque la direction du vent change ; c) en configuration « parc », à puissance équivalente, le nombre de machines par km<sup>2</sup> peut être plus important que celui des HAWT, car justement leur proximité permet un meilleur rendement collectif [23]. Les VAWT ont cependant des désavantages connus : elles ne démarrent pas toutes seules [2, 6], elles peuvent s'emballer, les fatigues des structures semblent plus importantes car d'une part le couple de rotation verticale,  $M_z$ , n'est pas constant pendant une rotation et d'autre part les pales passent dans le sillage turbulent des autres pales.

Un des moyens de diminuer tous ces effets néfastes est de « pitcher » les pales pendant la rotation, c'est-à-dire de caler au mieux l'angle d'attaque du vent sur la pale, en orientant continuellement le mieux possible les pales de telle manière à avoir à chaque instant une meilleure force tangentielle facilitant la rotation de l'ensemble. Pitcher les pales peut théoriquement servir à a) faire démarrer l'éolienne à vent très faible, b) l'arrêter par vent très fort, et c) obtenir un meilleur rendement.

C'est dans ce contexte et dans le cadre du projet SpinFloat d'éolienne flottante de 6MW, que la société EOLFI, en collaboration avec IRPHE et la société CORETI, a lancé une étude visant à construire une maquette d'éolienne à axe de rotation vertical, à pales pitchées, et à la tester en soufflerie en essayant de trouver des lois optimales de pitch.

Dans la section 2 nous décrivons les notations principales et l'état de l'art sur les VAWT à pales pitchées. La section 3 décrit les caractéristiques géométriques de l'éolienne et les choix électroniques pour le contrôle-commande des pitches, ainsi que l'approche d'optimisation stochastique utilisée pour trouver les meilleures lois de pitch. La section 4 donne les résultats sur l'accroissement de la vitesse de rotation. La section 5 présente les écoulements fluides autour des pales avec et sans pitch.

## II – Notations, et état de l'art sur les pitch



$U$  : vent incident  
 $\theta$  : azimut  
 $\Omega$  : vitesse de rotation  
 $\beta$  : angle de pitch  
 $r$  : rayon  
 $\lambda = \Omega r / U$  : tip speed ratio

**Figure 1. Vue de dessus, notations.**

Les conventions d'angles et les notations sont indiquées sur la Figure1. Sans pitch, quand l'éolienne tourne, par construction géométrique, on peut montrer que l'angle d'attaque du vent sur la

pale est égal à :  $\alpha_{attaque} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}\right) - \beta$ . Ici  $\theta$  est l'azimut,  $\lambda$  le tip speed ratio et  $\beta$  le pitch. La stratégie de pitch pour accélérer la rotation de de l'éolienne va dépendre essentiellement de l'azimut et du tip speed ratio. Lorsque  $\lambda < 1$ , la vitesse des pales est inférieure au module de la vitesse du vent. Sur une moitié de cercle, le vent apparent viendra de l'arrière de la pale, et dans ce cas il faut pitcher pour augmenter la traînée qui fera alors avancer la pale dans la bonne direction. Sur l'autre moitié de cercle, il faudra diminuer la traînée. Lorsque  $\lambda > 1$ , la stratégie consiste généralement à essayer de diminuer la traînée et d'augmenter la portance dans le but d'augmenter la force tangentielle moteur de la rotation. Quand  $\lambda > 2$ , le vent apparent se situe à des angles plus petits, et la stratégie consiste à pitcher la pale pour augmenter partout la portance en se mettant le plus proche possible de l'angle d'attaque correspondant au pic bien marqué de portance visible sur les polaires de portance des pales (Figure 5 par exemple).

De nombreux articles ont été publiés récemment sur les bénéfices du pitchage de pale pour les VAWT, les approches étant théoriques, numériques ou expérimentales. Le plus souvent le pitch est établi à partir de systèmes mécaniques à base d'arbres à cames, type bielle-manivelle, et la loi de pitch est alors simplement de type cycloïdal, du type  $\beta = \beta_0 + \beta_1 \sin \theta$ ,  $\beta_0$  et  $\beta_1$  étant des constantes. Avec ce type de loi, le couple moyen et le coefficient de puissance sont significativement plus forts que sans loi de pitch [9, 15]. Un simple pitch constant ( $\beta = \beta_0$ ) augmente de 7% le coefficient de puissance et diminue les efforts sur les pales [20]. Une loi de pitch en sinus de l'azimut permet d'avoir un gain 19% supérieur par rapport à la même éolienne qui tourne sans pitch. Cela a été montré numériquement [24], et expérimentalement [8].

D'autres auteurs [12] obtiennent un rendement 30% meilleur avec pitch que sans pitch, et dans certains cas très particuliers, la puissance électrique produite peut-être supérieure de 60% à celle produite sans pitch. Un des avantages du pitch est d'induire moins de turbulence, et de permettre ainsi de diminuer la fatigue occasionnée lorsque les pales sous le vent passent dans le sillage des pales au vent. La diminution de turbulence a été montrée à l'aide de simulations CFD [22]. Un simple modèle de bilan de flux à travers l'éolienne peut théoriquement prédire que des valeurs de pitch très importants, de l'ordre de  $35^\circ$ , peuvent améliorer de façon très significative le rendement pour des éoliennes VAWT de petite taille pour les faibles vitesses de vent [13]. Le pitch est utile au self démarrage : il suffit d'augmenter la traînée de la pale recevant le vent par l'arrière pour démarrer l'éolienne [6, 16].

Des lois de pitch un peu plus complexes ont été publiées montrant bien leur efficacité : avec une loi de la forme  $\beta = \beta_0 + \beta_1 \sin \theta + \beta_2 (\sin \theta)^2$ , une simple modélisation DMST (Double Multiple Stream Tubes), prévoit un gain 20% plus fort sur le rendement [25]. Une loi de la forme  $\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}\right) - \beta_3 \sin \theta$ , permet d'obtenir une nette augmentation du couple moyen sur une rotation [17]. Une loi polynomiale en  $\sin(\theta)$  du type :  $\beta = \sum_i \beta_i \sin^i(\theta)$ , montre que, la puissance électrique délivrée peut-être supérieure à 30% à une loi de type cycloïde [19], les coefficients  $\beta_i$  étant obtenus par des algorithmes génétiques utilisant des optimisations stochastiques. Dans [1], les auteurs ont conduit une étude numérique et expérimentale sur l'utilisation de pitches optimisés à l'aide de « look-up tables » et de réseaux de neurones, avec un résultat net d'augmentation de 25% de la puissance. Très récemment, dans la publication [14], les auteurs ont implanté un algorithme récursif adaptatif SPRC (Subspace Predictive Repetitive Control) pour pitcher les pales de telle manière à réduire de façon significative les turbulences induites et les charges sur les pales pendant leur rotation.

Mais souvent les études précitées ne concernent que des éoliennes de petite ou moyenne emprise, pas forcément en relation avec des éoliennes offshore de grandes dimensions. De plus la plupart des études ne sont que théoriques ou numériques, et pas expérimentales. Ici, pour le projet Aéropitch, nous sommes partis sur une construction « maquette » d'une éolienne de très grande envergure relative au projet Eolfi Spinfloot, c'est-à-dire avec trois pales, un rapport de solidité assez faible (surface des pales petite par rapport à l'emprise totale de l'éolienne). Nous avons fait aussi des

simulations numériques. Bien qu'elle soit antérieure et avec nettement moins de moyens financiers et techniques, notre démarche est finalement assez identique à la très récente construction de la maquette éolienne de l'Institut Politecnico di Milano construite pour élaborer des tests aérodynamiques liés à l'offshore flottant [3].

Les buts que nous nous sommes fixés, sont a) la construction complète par nos propres moyens d'une maquette VAWT à pitch individuels commandés par des servomoteurs programmables en temps réel, b) la recherche de lois de pitch optimales pour d'une part améliorer le démarrage, et d'autre part augmenter la vitesse de rotation, et c) la mesure de l'écoulement d'air autour des pales pendant la rotation de celles-ci.

### **III – Maquette éolienne à pales pitchées.**

Les essais ont été conduits dans la soufflerie IRPHE/PYTHEAS sur le site de Luminy à Marseille (<https://www.osupytheas.fr/?-LASIF-Grande-Soufflerie-air-eau-de-Luminy->). En absence d'eau dans le canal, la section aérienne est de 40m de long, 3m de large, 2.5m de haut. Le vent est au maximum de 10 m/s avec une intensité de turbulence en entrée de veine inférieure à 1%.

Nous avons tout d'abord utilisé une approche Double Multi Stream Tubes (DMST) associée à une Lifting Line Theorie (LLT) à l'aide des logiciels open source Xfoil et QBlade [4, 18] pour définir les principales géométries de la turbine (solidité, rapport d'aspect, choix des pales, etc.), pour des nombres de Reynolds, basés sur la corde, maximum de  $R_e = 1.6 \cdot 10^5$ . En rapport avec le projet de départ Aéropitch, les multiples simulations avec des critères basées sur l'obtention d'un bon coefficient de puissance nous ont finalement conduit à construire une maquette éolienne de diamètre 1.60 m, à trois pales d'envergure 0.90m et de corde 0.09 m (Figure 2). Le coefficient de blocage est inférieur à 20%, ce qui nous convient pour l'étude [21].

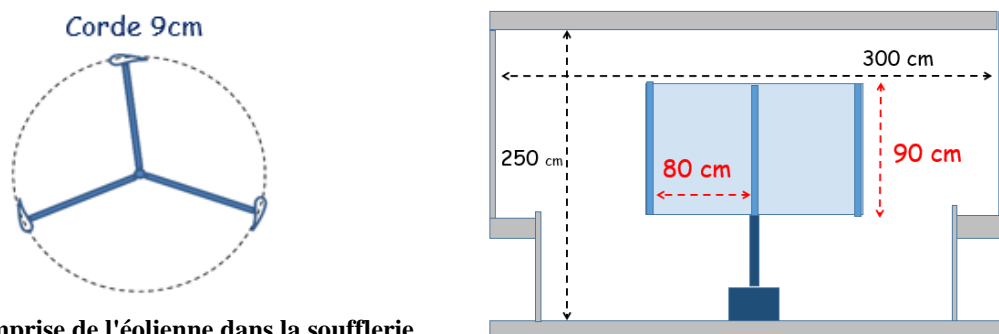


Figure 2. Emprise de l'éolienne dans la soufflerie

Différents types de pales ont été testées. Nous avons testé des profils Naca série 4, Naca série 5, et Selig. Les ailes asymétriques ou cambrées ont un moins bon rendement que les pales symétriques pour les VAWT [7]. Finalement nous avons opté pour un profil Selig 1046, qui a globalement une meilleure portance, une moins bonne traînée mais au final une meilleure finesse que les profils Naca à cambrure équivalente (Figure 3). Le rapport de solidité finalement choisi est  $\sigma = \text{Nbre de pales} * \text{corde} / \text{Diametre} = 0.17$  (Figure 4).

Nous avons mesuré, grâce à une balance d'effort, les polaires de portance et de traînée pour les angles d'attaque du vent de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ . Les résultats illustrent que la portance de la Selig est meilleure que celle des NACA, surtout pour un angle d'attaque optimum de  $10^\circ$  (Figure 5).

L'éolienne (Figure 6) a donc été conçue, fabriquée et assemblée par notre consortium. Pour pitcher les pales de façons individuelles, nous avons choisi des servomoteurs performants, capables d'induire une rotation de  $60^\circ$  en 0.1 seconde, en supportant un couple important avec une précision statique de  $0.1^\circ$ . Le pitch est transmis aux pales par des bras inférieurs secondaires (Figure 7).

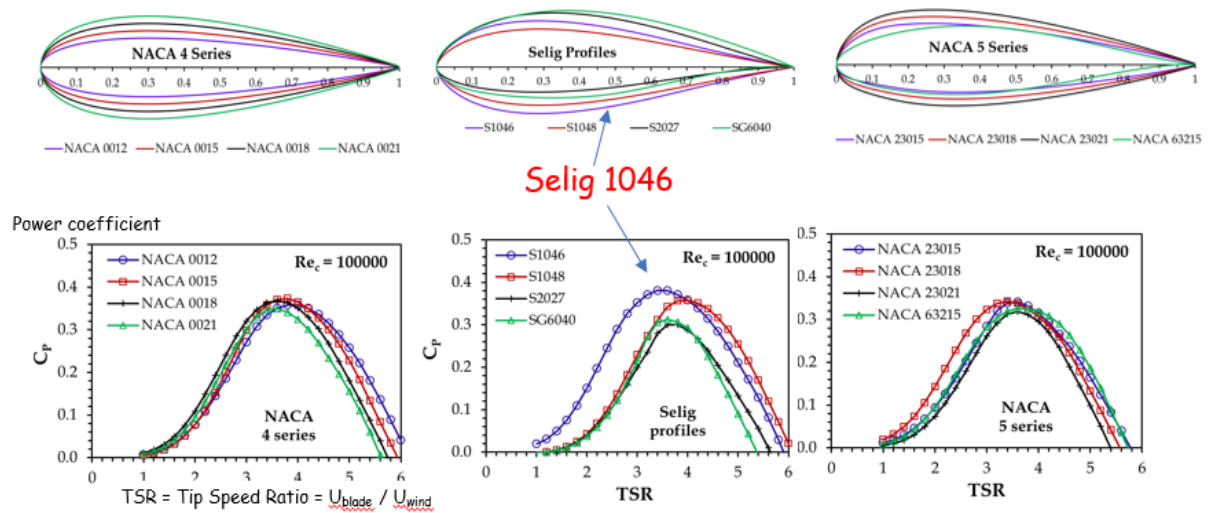
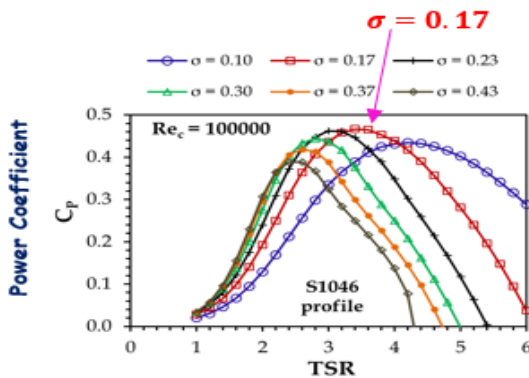
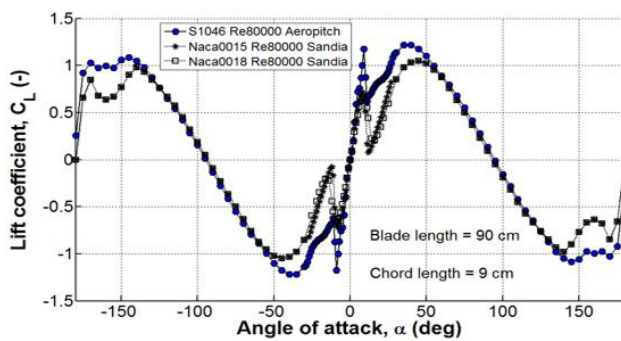


Figure 3. Prédiction de coefficients de puissance pour différents profils de pales.

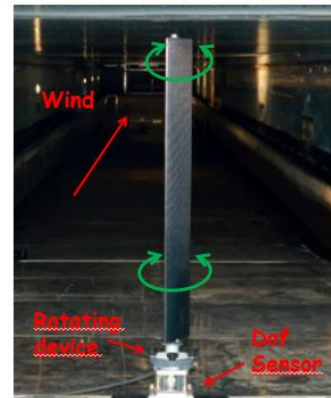


$$\text{Coefficient de puissance} : C_p = \frac{P_{\text{turbine}}}{\rho r H_{\text{pale}} U^3}$$

Figure 4. Rapport de solidité choisi pour avoir un coefficient de puissance optimal pour notre configuration.



Lift coefficient : comparaisons with Naca profiles



Selig 1046 blade

Figure 5. polaires de portance pour les pales Selig choisies et comparaison avec des polaires de pales NACA

Les liaisons électriques avec l'ordinateur se font par contacteur tournant. Un codeur électromagnétique placé à l'intérieur du mat donne l'azimut  $\theta$  des pales avec une précision de  $0.18^\circ$ , ainsi que la vitesse de rotation  $\Omega$ , à  $0.003 \text{ rad/s}$  près. La vitesse du vent incident est mesurée par un anémomètre Ultrasonic Gill. Les lois de pitch sont programmées en langage compatible Arduino, et flashées directement sur la carte électronique Teensy de commande des servomoteurs. Une autre carte Teensy assure le contrôle des commandes transmises. Les mesures d'angle, de rotation et de vitesse de vent sont acquises en temps réel dans l'ordinateur pilotant l'éolienne grâce à un programme Python d'échange avec les Teensy. Le schéma global de fonctionnement de la boucle de contrôle / commande est illustré sur la Figure 8.

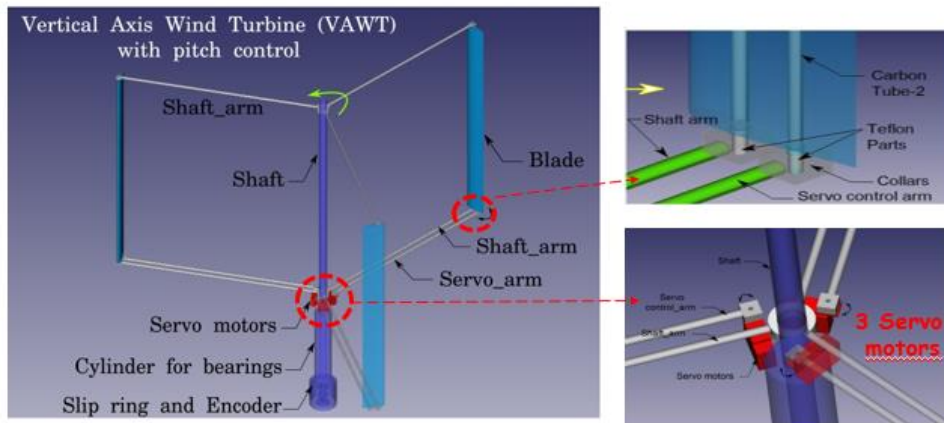


Figure 6. Vue générique de l'éolienne et des trois servomoteurs sur la base de l'axe de rotation.

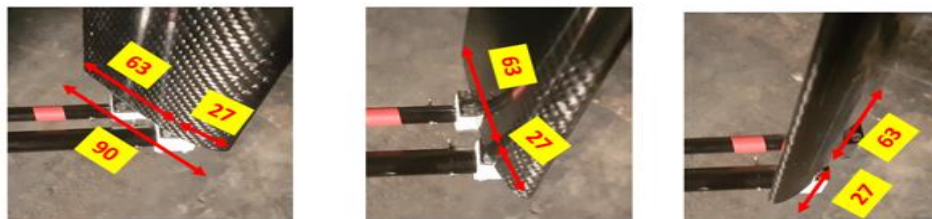


Figure 7: le pitchage des pales est effectué par les bras secondaires de poussée.

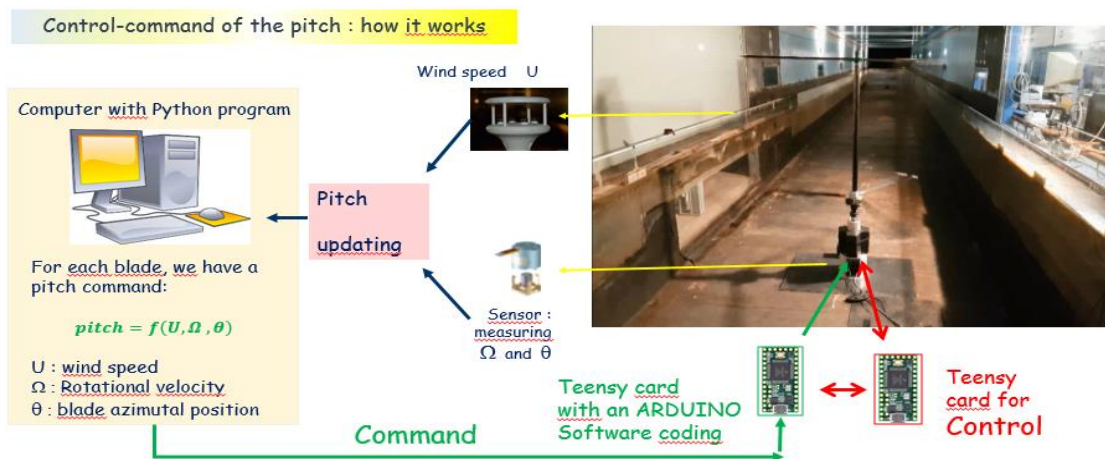


Figure 8. Schéma global de contrôle-commande des lois de pitch

## IV - Résultats sur les lois de pitch

### IV-1 Démarrage

Avec une loi extrêmement simple :  $\beta = \beta_1 \sin \theta$ , caractéristique des systèmes de tringlerie mécanique pour pitcher les pales, et sans chercher à optimiser le paramètre  $\beta_1$ , l'éolienne démarre avec un vent 4 fois plus faible que sans pitch (Figure 9). Sans pitch, le vent minimum nécessaire pour un self-démarrage varie entre 4m/s et 5m/s suivant les positions initiales des pales par rapport au vent. Avec un pitch simple, l'éolienne démarre quel que soit la configuration initiale au vent très faible de 1m/s. Il suffit juste que la pale ayant le vent dans le dos s'ouvre pour apporter une surface de traînée plus importante qui va pousser l'ensemble et initier la rotation.

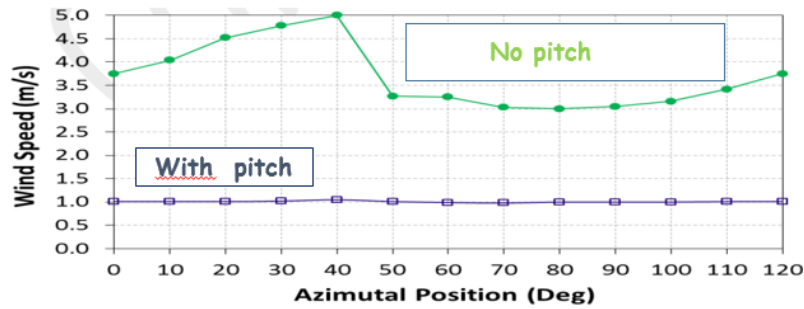


Figure 9. Vent minimum nécessaire pour démarrer l'éolienne en fonction de la position initiale de la pale n°1.

## IV-2 Arrêt

Tout d'abord, si on veut simplement ralentir l'éolienne car on considère qu'elle tourne trop vite, il suffit d'annuler les pitch (en mettant  $\beta=0$  partout) et l'éolienne ralentit très vite. Si on désire vraiment stopper l'éolienne, comme pour un arrêt d'urgence, il suffit d'appliquer d'un seul coup l'opposé de la loi (faire  $-\beta$  au lieu de  $\beta$ ) et l'éolienne s'arrête en quelques tours. Le pitch (négatif) est tellement puissant que l'éolienne repart ensuite en rotation arrière ! Il faut donc appliquer, au moment de l'arrêt, une loi de mise en drapeau pour que l'éolienne ne reparte plus dans un sens ou dans l'autre. L'arrêt en drapeau consiste à mettre un pitch nul à la pale qui est au vent ( $\theta=90^\circ$ ) et des pitches opposés aux pales sous le vent ( $\theta=210^\circ$  et  $\theta=330^\circ$ ).

## IV-3 Gains observés grâce aux pitches

Avec une loi extrêmement simple :  $\beta = \beta_1 \sin \theta$ , caractéristique des systèmes de tringlerie, le gain en rotation est appréciable : pour un vent de 5m/s, la vitesse de rotation est multipliée par 4 ! (Figure 10).

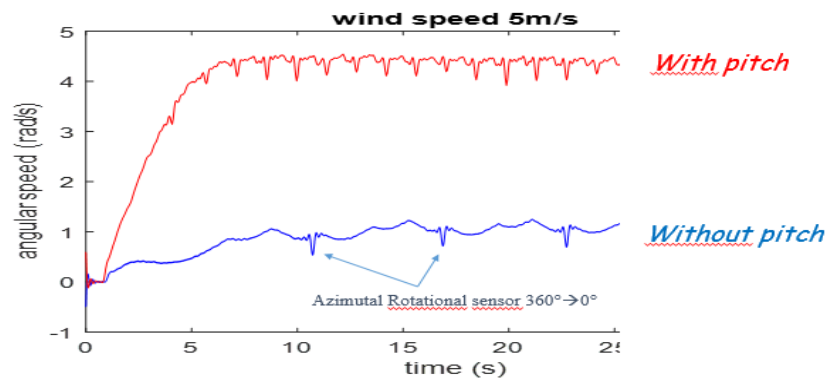


Figure 10. Augmentation d'un facteur 4 de la vitesse angulaire de rotation par une simple loi de pitch

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 \sin \theta$$

En nous inspirant des travaux cités au paragraphe II, nous avons programmé des lois de pitch de forme polynomiale en  $\sin(\theta)$  :  $\beta = \sum_i \beta_i \sin^i(\theta)$ . Le gain en rotation est notable, avec des vitesses de rotation multipliées par des facteurs supérieurs à 5 quand on applique de tels pitches. Cependant, a) en regardant le schéma des forces agissant sur les pales pour chaque quart de rotation (secteurs  $0^\circ-90^\circ$ ,  $90^\circ-180^\circ$ ,  $180^\circ-270^\circ$  et  $270^\circ-360^\circ$ ), b) en analysant le comportement de l'éolienne aux différents tip speed ratios, et c) compte-tenu que nos lois de pitch peuvent être adaptatives grâce au dialogue permanent PC/Teensies/mesures de  $\theta$ , U, et  $\Omega$ , il nous a semblé judicieux d'introduire les éléments novateurs suivants: 1) faire dépendre les coefficients  $\beta_i$  de la vitesse de rotation (ou du tip speed ratio) ; 2) introduire un déphasage par rapport à  $\theta$ . (i.e. considérer un  $\theta + \varphi$  au lieu de  $\theta$ ) ; 3) ne pas considérer que le  $\sin(\theta)$  mais aussi introduire la quadrature de phase  $\cos(\theta)$  ; 4) considérer les



harmoniques  $2\theta$ ,  $3\theta$ , etc.

Du coup, nous avons recherché des lois beaucoup plus complexes de la forme :  $\beta = \sum_i (\beta_i + \delta_i \Omega) \sin(i\theta + \varphi_i) + (\gamma_i + \mu_i \Omega) \cos(i\theta + \phi_i)$ . Si on pousse l'ordre assez haut, cela fait un nombre important de paramètres à trouver. Pour estimer ainsi un choix de paramètres multiples inconnus, nous avons utilisé l'optimiseur Open Source Dakota du laboratoire Sandia (<https://dakota.sandia.gov/>), basé sur un ensemble de routines de type algorithme génétique, statistiques Bayésiennes et optimisation hybride. Notre fonction à maximiser, pour nous, a été la vitesse de rotation pour un vent donné. Il aurait sans doute été plus judicieux d'optimiser la puissance fournie ou le couple de rotation, mais nous n'avions pas de génératrice pour mesurer la puissance, et pas de balance d'effort suffisamment précise située sur l'axe de rotation pour mesurer le couple.

Le principe d'utilisation de Dakota est simple en théorie : on fixe une gamme admissible de valeurs pour les paramètres  $(\beta_i, \delta_i, \varphi_i, \gamma_i, \phi_i)$ . Dakota propose un premier jeu de paramètres  $(\beta_i, \delta_i, \varphi_i, \gamma_i, \phi_i)_1$ . La loi de pitch est flashée sur les Teensy, l'éolienne tourne, on mesure le  $\Omega_1$  correspondant. Dakota propose un autre jeu  $(\beta_i, \delta_i, \varphi_i, \gamma_i, \phi_i)_2$ . On impose cette loi, on mesure le  $\Omega_2$  correspondant, et ainsi de suite des milliers de fois. Dakota utilise des algorithmes de descente sophistiqués pour trouver des paramètres qui conduisent à des vitesses de rotation élevées de l'éolienne. La procédure de recherche optimale de coefficients est automatique, sans intervention manuelle, et les milliers d'essais s'enchaînent les uns après les autres. Une recherche peut durer plusieurs jours. Les résultats sont spectaculaires. Par exemple pour un vent plutôt faible de 4m/s, la loi de pitch optimum augmente la vitesse de rotation par un facteur 20 ! (Figure 11)

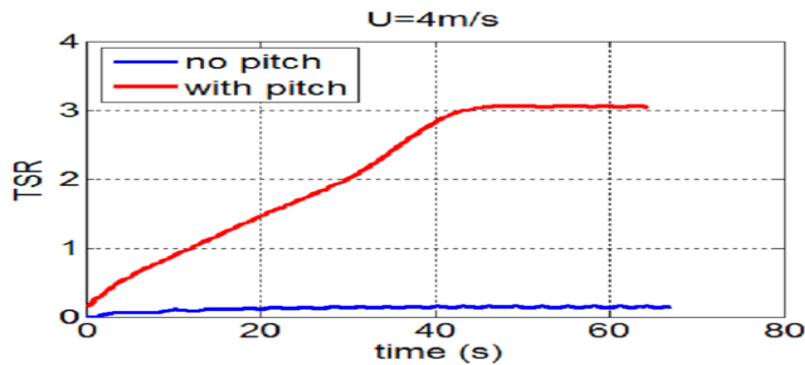


Figure 11. Loi de pitch "optimale": la vitesse de rotation, avec le pitch est multipliée par 20.

## V - Effet du pitch sur l'écoulement autour des pales.

Nous avons utilisé un système PIV complet DANTEC Dynamics pour mesurer l'écoulement d'air autour des pales. Le but était de mieux comprendre l'efficacité des pitchs, et avoir des mesures quantitatives de trajets de tourbillons sans pitch et avec pitch. Le système PIV est composé du double laser Yag pulsé Litron Nano L PIV Dual Power 2x200 mJ, d'un système de lentilles optiques pour générer la nappe laser, d'une caméra DANTEC Flow Sense E.O 4M-32 de 2048x2048 pixels, un objectif Zeiss F-50mm, d'un système d'ensemencement DANTEC Dynamics avec 4 générateurs Laskins Nozzle diffusant des microgouttelettes d'huile (Figure12). Les images PIV représentent une grande quantité de données. Nous ne donnons ici que quelques illustrations. Les images sont vues du dessus de l'éolienne, le vent de 4m/s vient de la gauche et va à droite, la rotation est dans le sens trigonométrique, comme pour la Figure 1.

Les images de la Figure 13 montrent très explicitement que sans pitch, il y a énormément de turbulence sous le vent, alors qu'avec pitch, le sillage, bien rectiligne, crée moins de perturbations.

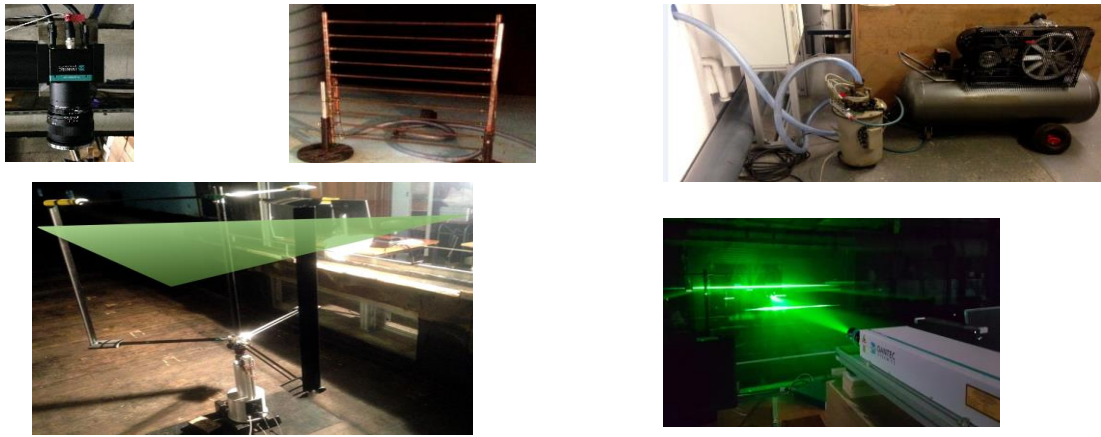


Figure 12: Système PIV DANTEC Dynamics : tranche de lumière, caméra, laser Litron et système d'ensemencement.

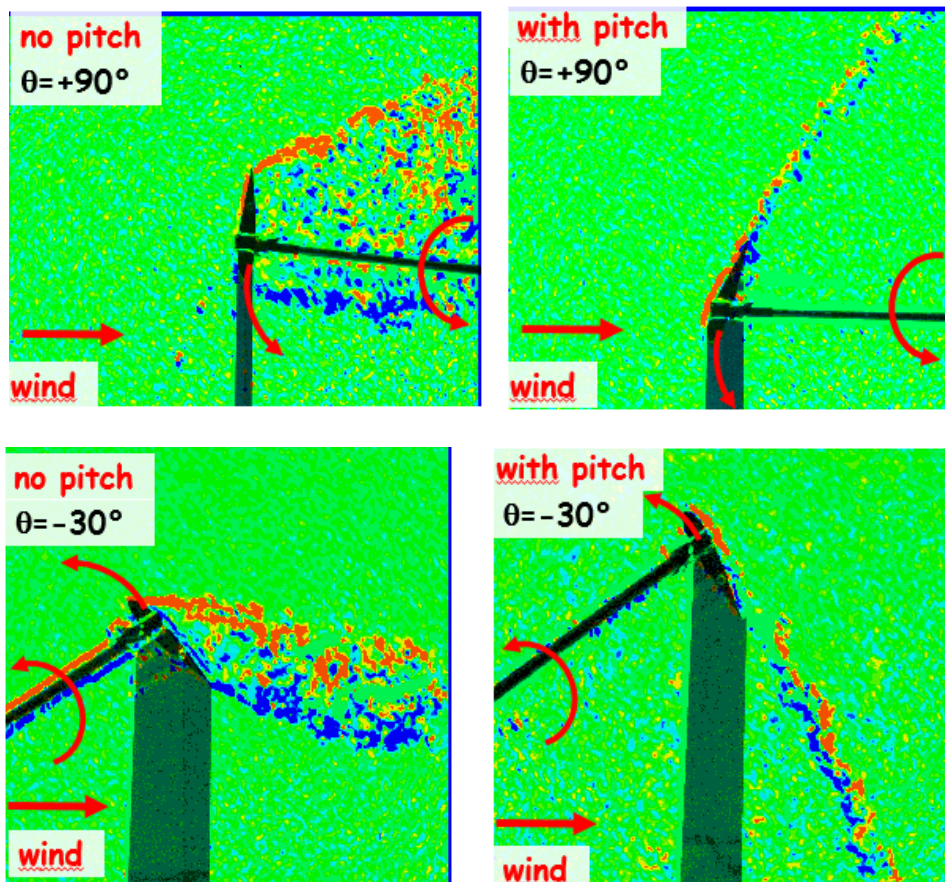


Figure 13. Vue de dessus. Champ de vorticité mesuré pour deux différents azimuts. Vent 4 m/s venant de la gauche. à gauche sans Pitch, à droite avec Pitch. Les zones rectangulaires en gris sombre sont les ombres des pales éclairées par le laser.

Nous avons effectué des simulations numériques à partir du code Open Source Open Foam. Nous ne détaillons pas ici la discrétisation adaptative, et les options utilisées, mais nous avons utilisé exactement les mêmes profils d'aile, les mêmes géométries d'éolienne. Pour des Reynolds équivalents, nous montrons sur la Figure 14, les champs de vorticité, avec pitch et sans pitch obtenus expérimentalement et numériquement au cours d'un tout complet de rotation. On observe une bonne concordance entre les résultats. Les tailles des tourbillons mesurés par PIV sont plus petites que les vortex obtenus numériquement. Il s'agit peut-être d'une question de taille de maille du modèle numérique.

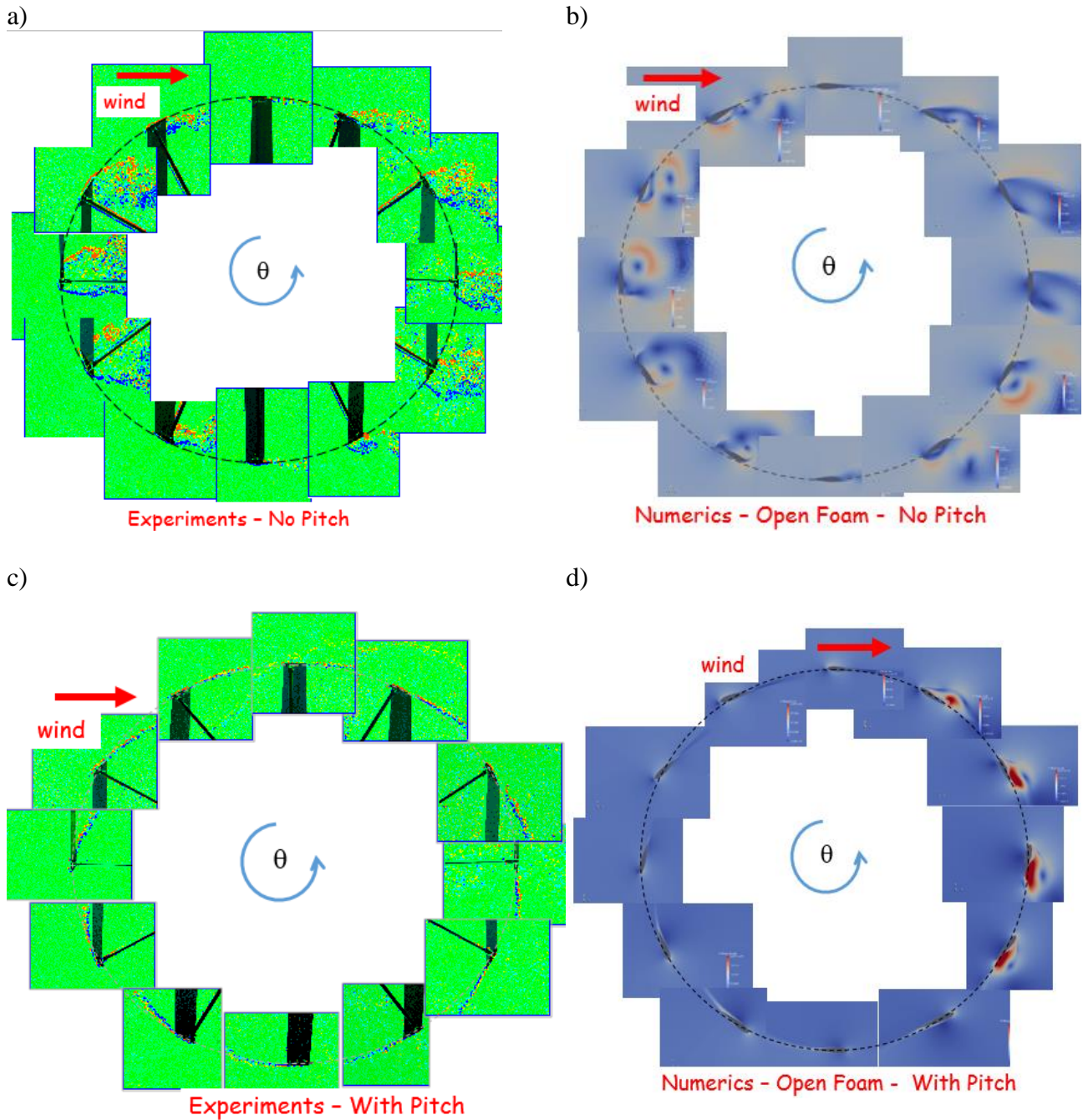


Figure 14. Champ de vorticité. Vent 4m/s. a) pas de pitch, mesures PIV ; b) pas de pitch, simulations numériques ; c) avec pitch, mesures PIV ; d) avec pitch, simulations numériques. Les zones rectangulaires en gris sombre sont les ombres des pales éclairées par le laser.

## VI - Conclusions

En France, les plus importants projets offshore VAWT flottant (Vertiwind-Nenuphar et Spinfloat-Eolfi), ont été abandonnés faute de moyens financiers. Hors de France certains projets continuent, comme par exemple S4VAWT en Norvège (Huijs et al. 2018), et SeaTwirl en Suède (<https://seatwirl.com/>). Notre étude apporte une contribution supplémentaire pour montrer que les VAWT peuvent avoir un avenir pour l'offshore flottant : il faut nécessairement pitcher les pales avec des lois appropriées pour obtenir des résultats significatifs. Le pitchage des pales permet un démarrage sans intervention extérieure, et il est possible aussi de ralentir ou de stopper la rotation.

Dans notre étude, il nous a manqué une génératrice pour mesurer le gain en puissance. Il nous a manqué aussi un bon système de frein sur l'axe pour mesurer correctement les couples de rotation. L'optimisation Dakota pourrait très simplement s'appliquer en optimisant non pas la vitesse de rotation, mais pour optimiser le coefficient de puissance de l'éolienne.

Les visualisations PIV montrent clairement que le pitch produit une intensité de turbulence plus faible que s'il n'y a aucun pitch n'est appliqué. On peut donc s'attendre à des fatigues moins importantes de l'éolienne si on pitch les pales.

## Références

- [1] G. Abdalrahman, W. Melek and F.S. Lien. Pitch angle control for a small-scale Darrieus vertical axis wind turbine with straight blades (H-Type VAWT), *Renewable Energy*, 114 : 1353-1362, 2017.
- [2] A. Arab, M. Javadi, M. Anbarsooz and M. Moghiman. A numerical study on the aerodynamic performance and the selfstarting characteristics of a Darrieus wind turbine considering its moment of inertia, *Renewable Energy*, 107 : 398-311, 2017.
- [3] I. Bayati, S. Foletti, D. Tarsitano and M. Belloli. A reference open data vertical axis wind turbine, with individual pitch control, for code validation purposes, *Renewable Energy*, 115 : 711-720, 2018.
- [4] H. Beri and Y. Yao. Double Multiple Stream Tube Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine, *Energy and Power Engineering*, 3 : 262-270, 2011.
- [5] A. M. Chowdhury, H. Akimoto and Y. Hara. Comparative CFD analysis of Vertical Axis Wind Turbine in upright and tilted configuration. *Renewable Energy*, 85 : 327-337, 2016.
- [6] M. Douak, Z. Aouachria, R. Rabehi and N. Allam. Wind energy systems: Analysis of the self-starting physics of vertical axis wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 : 1602-1610, 2018.
- [7] M. Elkhoury, T. Kiwata and E. Aoun. Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139 : 111-123, 2015.
- [8] A. Fielder and S. Tulis. Blade Offset and Pitch Effects on a High Solidity Vertical Axis Wind Turbine, *Wind Engineering*, 33, 3: 237-246, 2009.
- [9] R. Firdaus, T. Kiwata, T. Kono and K. Nagao. Numerical and experimental studies of a small vertical-axis wind turbine with variable-pitch straight blades *Journ. Fluid Science and Technology*, 10, 1, 14-00273: 1-15, 2015.
- [10] Y. Guo, L. Liu, X. Gao and W. Xu. Aerodynamics and Motion Performance of the H-Type Floating Vertical Axis Wind Turbine, *Appl. Sci.*, 8, 262 : 1-17, 2018.
- [11] F. Huijs, E. Vlasveld, M. Gormand, F. Savenije, M. Caboni, B. LeBlanc, C.S. Ferreira, K. Lindenburg, S. Gueydon, W. Otto and B. Paillard, B 2018 Integrated design of a semi-submersible floating vertical axis wind turbine (VAWT) with active blade pitch control, *In Proc. of Deepwind Conf.*, Trondheim, Norway, 2018.
- [12] I. Hwang, Y. Lee and S. Kim. Optimization of cycloidal water turbine and the performance improvement by individual blade control, *Appl Energy*, 86, 9 : 1532–1540, 2009.
- [13] P. Jain and A. Abhishek. Performance prediction and fundamental understanding of small scale vertical axis wind turbine with variable amplitude blade pitching, *Renewable Energy*, 97 : 97-113, 2013.

- [14] V. Kumar, F.J. Savenije and J.W. van Wingerden. Repetitive Pitch Control for Vertical Axis Wind Turbine, in *IOP Conf. Series: Journal of Physics*, 1037, 032030: 1-27, 2018.
- [15] L. Lazauskas, Three pitch control systems for vertical axis wind turbines compared. *Wind Eng.*, 16, 5: 269-282, 1992.
- [16] Y. Liang, L. Zhang, E. Li and F. Zhang. Blade pitch control of straight-bladed vertical axis wind turbine, *Journ. Central South Univ.*, 23, 5 : 1106-1114, 2016.
- [17] L. Liu, C. Liu and X. Zheng. Modelling, simulation, hardware implementation of a novel variable pitch control for H-Type vertical axis wind turbine. *Journ. of Electrical Eng.*, 66, 5 : 264–269, 2015.
- [18] D. Marten, M. Lennie, G. Echliyanoglou, C.N. Nayeri and C.O. Paschereit. Implementation, optimization, and validation of a nonlinear lifting line-free vortex wake module within the wind Turbine simulation code QBLADE, *Journ. Eng. for Gas Turbines and Power*, 138, 072601 :1-10, 2016.
- [19] I. Paraschivoiu, O. Trifu and F. Saeed., H-Darrieus Wind Turbine with Blade Pitch Control, *Int. Journ. of Rotating Machinery*, 505343: 1-7, 2009.
- [20] A. Rezaeiha, I. Kalkman and B. Blocken. Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine, *Applied Energy*, 197 : 132–150, 2017.
- [21] S. Roy and U. Saha. An adapted blockage factor correlation approach in wind tunnel experiments of a Savonius-style wind turbine, *Energy Conversion and Management*, 86:418–427, 2014
- [22] A. Sagharichi, M. J. Maghrebi, and A. ArabGolarcheh. Variable pitch blades: An approach for improving performance of Darrieus wind turbine, *Journ. Renewable and Sustainable Energy*, 8, 053305: 1-25, 2016.
- [23] M. Shaheen and S. Abdallah. Development of efficient vertical axis wind turbine clustered farms, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63 : 237-244, 2016.
- [24] L. Zhang, Y. Liang, X. Liu and J. Guo. Effect of blade pitch angle on aerodynamic performance of straight-bladed vertical axis wind turbine, *Journ. Central South Univ.*, 21, 4 : 1417–1427, 2014.
- [25] Z. Zhao, S. Qian, W. Shen, T. Wang, B. Xu, Y. Zheng and Ruixin Wang. Study on variable pitch strategy in H-type wind turbine considering effect of small angle of attack. *Journ. Renewable and Sustainable Energy*, 9, 053302: 1-21, 2017.

**Remerciements:** Ce travail a été effectué grâce au soutien financier du LABEX MEC (Contract No. ANR-10-LABX-0092), du projet A\*MIDEX (Contrat No. ANR-11-IDEX-0001-02), et du soutien financier de la Région PACA, Contrat CR PACA 2014\_10915 APRF AEROPITCH.