



16^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique

27-29 novembre 2018 - Marseille



ESSAIS EN BASSIN D'UNE TURBINE DARRIEUS A CIRCULATION CONTROLÉE *TOWING TANK TESTING OF A CONTROLLED CIRCULATION DARRIEUS TURBINE*

L. CHATELLIER, J.M.R. GORLE, F. PONS, M. BA

Institut PPRIME – UPR 3346 CNRS – Université de Poitiers – ISAE-ENSMA
11 Bd M&P Curie – 86962 Chasseneuil-Futuroscope

Résumé

Un prototype d'Hydrolienne Darrieus à circulation contrôlée est développé et testé en bassin des carènes pour différentes cinématiques. Des mesures de couple et de vitesse sont effectuées et comparées aux résultats obtenus avec une turbine Darrieus conventionnelle pour plusieurs points de fonctionnement.

Le contrôle de la circulation autour de l'hydrolienne est destiné à limiter les émissions de tourbillons dans le sillage du rotor tout en améliorant le rendement de la turbine, avec le double objectif de réduire son impact environnemental et de favoriser son implantation en fermes. Le contrôle de la circulation autour des pales est basé sur les travaux de Couchet (1945,1950) concernant les mouvements non-stationnaires de profils bidimensionnels respectant la condition de Kutta-Joukowski. Le respect de tels mouvements assure théoriquement la conservation de la circulation et prévient les lâchers tourbillonnaires. Les lois d'incidence correspondantes ont été appliquées au pilotage de l'incidence des pales en rotation dans le plan (Vincendet et al. 2012) puis testées numériquement pour des hydroliennes Darrieus à 4 pales à faibles nombres de Reynolds (Gorle et al. 2015, 2017). Une modification des lois initiales autorisant la transition entre plusieurs valeurs de la circulation a été testée numériquement par Gorle et al. (2015,2018). Dans ce cadre, deux de ces lois de mouvement, initiale puis modifiée, sont testées expérimentalement.

Summary

A prototype of Darrieus turbine with controlled circulation is developed and experimentally tested in a towing tank for various kinematics. Torque and velocity measurements are conducted and compared to those obtained around a conventional Darrieus turbine for several operating points.

Applying circulation control around the turbine aims at preventing vortex shedding while enhancing the turbine's efficiency, in order to reduce its environmental impact and allow its installation in hydropower arrays. Circulation control is based on the works of Couchet (1945,1950) on the compatibility of non-stationary airfoil motions with the Kutta-Joukowski condition. Thus, conforming to such motion laws theoretically forbid vortex shedding. The

corresponding pitching laws have been theoretically applied to rotating blades (Vincendet et al. 2012) and numerically tested for 4-bladed Darrieus turbines at low Reynolds numbers (Gorle et al. 2015, 2017). Modified laws that allow transition between different circulation values have then been numerically tested by Gorle et al. (2015, 2018) in order to increase the turbine's efficiency. In this framework, two pitching laws, unmodified and modified, are experimentally tested.

I – Introduction

Par application de la condition de Kutta-Joukowski à des mouvements plans instationnaires de profils, Couchet (1945, 1950) a élaboré une famille de lois théoriques permettant de conserver une circulation constante en écoulement potentiel. Une application de ce principe à la turbine Darrieus a été proposée par Gorle et al. (2017), où il a été montré par CFD que les lois émises en fluide parfait pouvaient être transposées en écoulement de fluide réel.

Dans cette étude, deux exemples de lois de calage de pales sont testés sur une turbine Darrieus afin de démontrer leur applicabilité en conditions expérimentales. Le comportement de la turbine à pales mobiles est qualifié à l'aide de mesures de couple et de vitesses, et comparé aux résultats obtenus dans le cas de pales fixes.

Le principe de mouvements plans de profils pour lesquels la circulation reste constante permet de définir un ensemble de cinématiques respectant la condition de Kutta-Joukowski en écoulement potentiel instationnaire. Les écoulements correspondants sont donc théoriquement parfaitement irrotationnels et ne génèrent pas de sillage tourbillonnaire. En pratique, cette formulation valable en fluide parfait peut être partiellement transposée en fluide réel, comme l'a démontré expérimentalement Werlé (1950).

La cinématique correspondant au mouvement d'une pale de turbine Darrieus peut-être définie en fonction de la vitesse spécifique du rotor (λ), du point d'articulation de la pale et d'un angle d'attaque équivalent (β), représentant la valeur de circulation imposée (Vincendet et al., 2014). Pour un rotor de rayon R plongé dans un écoulement uniforme de vitesse V_0 et tournant à vitesse angulaire ω constante (Figure 1), l'angle de calage θ d'une pale de corde c est alors piloté par la position angulaire α du rotor selon une équation différentielle de type :

$$\frac{d\theta}{d\alpha} = f(\alpha, \theta; \beta, \lambda, E)$$

Pour une valeur de circulation Γ donnée, l'angle d'attaque équivalent β est défini par analogie avec l'angle d'attaque statique générant la même circulation dans un écoulement uniforme à vitesse $V_0(1+\lambda)$:

$$\Gamma = \pi c V_0 (1 + \lambda) \sin \beta .$$

La position relative k du point d'articulation de la pale est repérée par rapport au centre de la pale et représentée par le paramètre d'excentricité :

$$E = \left(\frac{1}{2} - k\right) \frac{c}{R} .$$

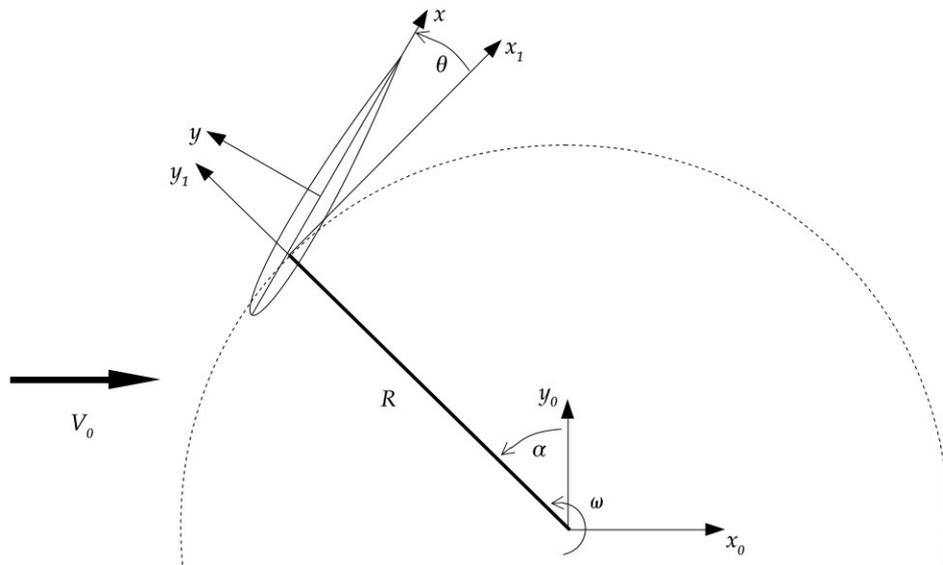


Figure 1: Paramètres de calage d'une pale de rotor Darrieus

En préalable aux essais expérimentaux, des études théorique et numériques ont été conduites sur un rotor de rayon $R=0.3\text{m}$ muni de 4 pales (NACA 0015) de corde $c=8\text{cm}$, correspondant à une turbine existante (Gorle et al. 2016). Les résultats théoriques montrent que pour toute valeur de la circulation, l'énergie collectée par la turbine sur un demi cycle est restituée au cours du demi cycle suivant, résultant en un bilan énergétique nul. Un contrôle du calage de pales strictement basé sur une circulation constante est dès lors inefficace du point de vue de la production énergétique. Cependant, les simulations numériques ont montré que l'application de la cinématique de pales théorique à un écoulement de fluide réel permet un contrôle effectif du sillage des pales et restitue fidèlement l'évolution du couple à l'arbre moteur sur certaines plages de paramètres (Gorle et al. 2017). Un calage de pales alternatif est alors proposé, dans lequel deux valeurs de circulation sont imposées au cours d'un cycle (Gorle et al., 2015, 2018) afin de maximiser le rendement de la turbine tout en minimisant son sillage.

II – Méthodologie

II – 1 Applicabilité des lois de calage à circulation constante

La formulation potentielle dont dérivent les lois de calage issues de la théorie de Couchet autorisent toutes valeurs d'incidence ainsi que d'incidence équivalente, indépendamment de toute notion de décrochage statique ou dynamique. Cependant, comme le montrent de nombreux résultats sur le décrochage dynamique (par exemple Fujisawa & Shibuya 2014, Ferreira et al. 2009, pour les turbines Darrieus) ainsi que l'expérience de Werlé (1950), l'écoulement autour d'une pale en rotation avec ou sans calage dynamique peut rester attaché sur tout ou partie d'un cycle. L'occurrence du décrochage dynamique dépend alors des conditions d'opération du mouvement.

Les résultats numériques de Gorle et al. (2015, 2017) montrent que l'application des lois de Couchet à une hydrolienne Darrieus en fluide réel permet maintenir un écoulement attaché sur une plage de paramètres essentiellement limitée par la valeur de l'incidence équivalente β . Pour une hydrolienne opérant à vitesse réduite $\lambda=2$ et nombre de Reynolds nominal $Uc/\nu=8.10^4$, l'écoulement reste attaché pour des valeurs de β prises autour de 5° , et reste attaché sur la majorité du cycle pour β compris entre -5° et $+10^\circ$ (Figure 2). Un aperçu des lois de calage de pales correspondantes est fourni en Figure 3.

Afin de valider expérimentalement l'applicabilité de ces résultats théoriques et numériques, la loi de Couchet à $\lambda=2$ et $\beta=5^\circ$ est testée à l'aide d'un prototype de turbine muni d'un mécanisme de calage dynamique des pales.

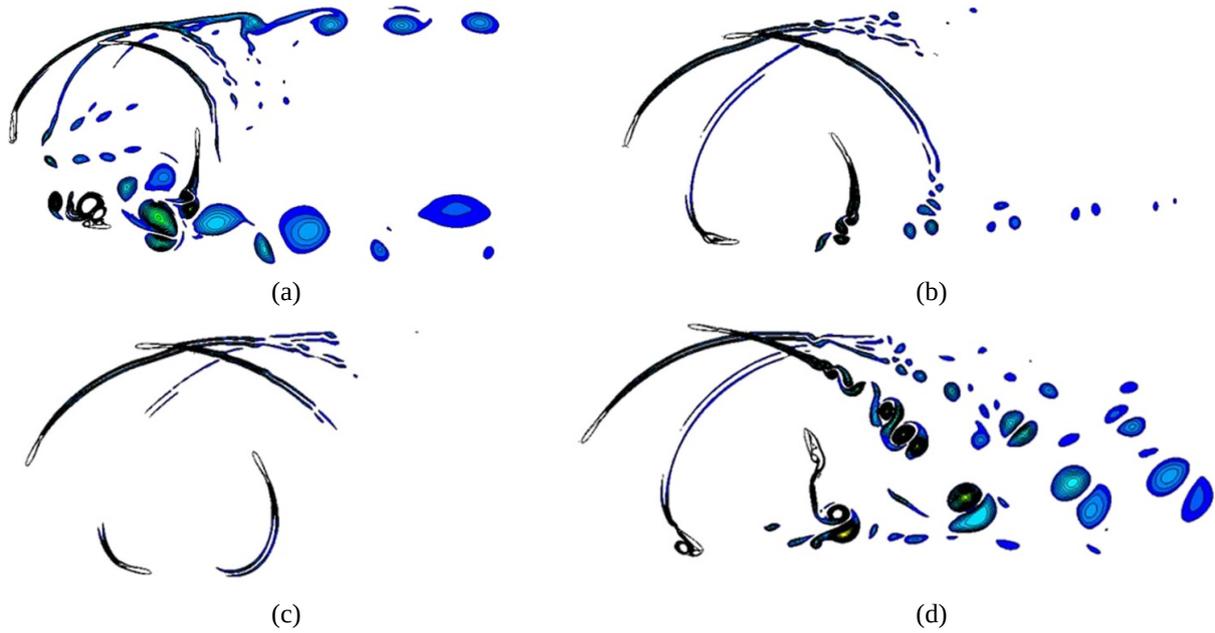


Figure 2: Contours de vorticité obtenus par CFD pour une turbine Darrieus à pales fixes (a) et avec lois de Couchet pour les incidences équivalentes $\beta = -5^\circ$ (b), $\beta = 5^\circ$ (c) et $\beta = 10^\circ$ (d).

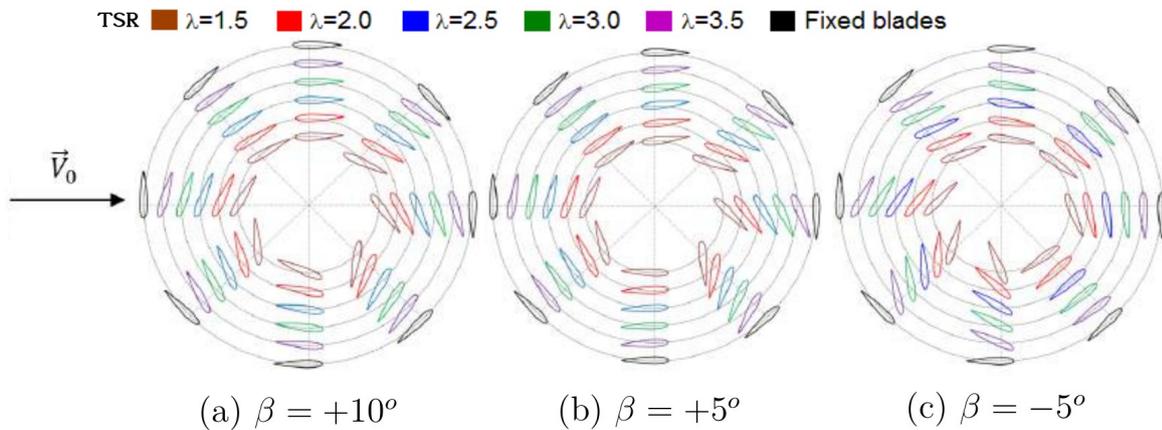


Figure 3: Schématisation des lois de Couchet pour un rotor Darrieus à différentes vitesses spécifiques et incidences équivalentes.

II – 2 Modulation des lois de calage

Les résultats numériques confirment également que l'application des lois de Couchet conduit à une symétrisation du couple transmis à l'axe du rotor quand l'écoulement reste attaché aux pales. Le bilan énergétique est donc négatif, conformément aux prédictions théoriques et en tenant compte des pertes liées à la viscosité et à la turbulence. La stratégie adoptée afin d'optimiser les performances de la turbine consiste alors à moduler les lois de Couchet en imposant la transition entre deux valeurs de circulation au cours d'un cycle (Gorle et al. 2015, 2018). La loi de calage sélectionnée exploite les cas $\beta = +10^\circ$ et $\beta = -5^\circ$ qui conditionnent respectivement les calages de pales en partie amont ($10^\circ \rightarrow 180^\circ$) et aval ($225^\circ \rightarrow 330^\circ$) du cycle de rotation. Le raccordement entre les deux lois est effectué par deux polynôme du troisième degré. La loi de calage à circulation modulée est représentée en Figure 4a. Les résultats obtenus montrent que la modulation des lois de calage permet le maintien d'un écoulement attaché sur les portions de cycle pour lesquels une circulation

constante est recherchée, et provoque de façon déterministe les lâchers tourbillonnaires compensant la transition entre les deux valeurs de circulation (Figure 4b).

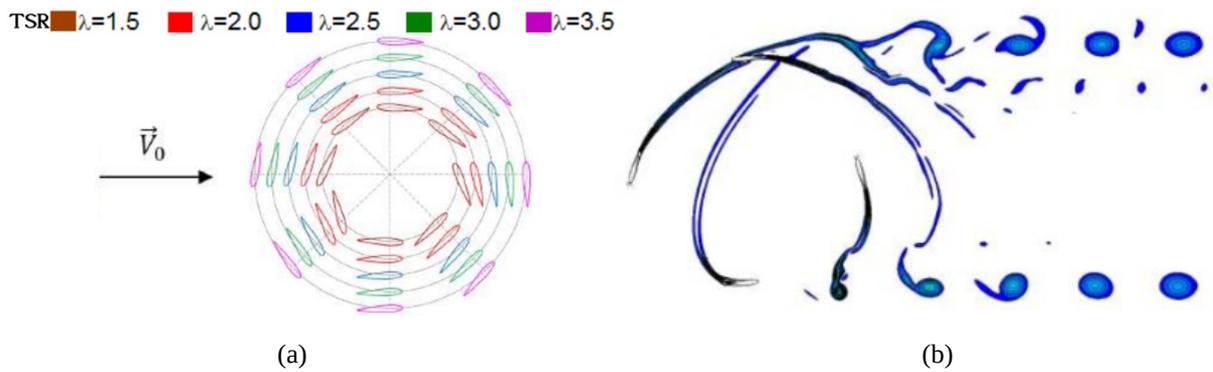


Figure 4: Schématisation des lois de Couchet avec modulation de circulation entre $\beta=+10^\circ$ et $\beta=-5^\circ$ (a) et contours CFD de vorticité correspondants pour $\lambda=2$ (b).

En termes de récupération d'énergie, l'application de la modulation de circulation permet d'exploiter la partie amont de la rotation, propulsive et optimisée par la loi de circulation constante, et de réduire les pertes associées à la partie aval. La figure 5 résume l'effet de la modulation de circulation sur l'efficacité du rotor Darrieus en fonction de sa vitesse spécifique. Le rendement de la turbine est augmenté sur l'ensemble des points de fonctionnement, en particulier aux faibles vitesses spécifiques pour lesquelles le rotor à pales fixes est peu performant. Le rendement maximal est par ailleurs obtenu à une vitesse spécifique plus élevée que pour le rotor à pales fixes. Afin de vérifier expérimentalement l'apport de la modulation de circulation entre $\beta=+10^\circ$ et $\beta=-5^\circ$, cette loi est également testée à la vitesse spécifique $\lambda=2$ à l'aide du prototype de turbine à pales mobiles.

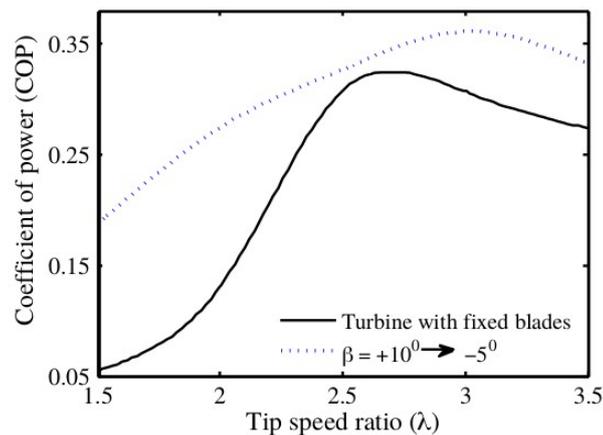


Figure 5: Evolution de l'efficacité du rotor Darrieus à pales fixes et pales mobiles avec modulation de circulation en fonction de la vitesse spécifique (Gorle et al. 2018).

III – Expérience

Le prototype de turbine Darrieus en H à 4 pales mobiles reprend les spécifications du modèle utilisé par Gorle et al. (2016). Les pales de corde 8cm et d'envergure 400mm sont basées sur des profils NACA0015 et disposées selon un diamètre de 600mm entre deux flasques rigides. Un système de came, glissières et pivots (Figure 6) permet de piloter l'angle de calage des pales autour de leur point de quart de corde. Deux cames ont été conçues afin de reproduire les lois de calage à circulation constante ($\lambda=2$, $\beta=5^\circ$) et à modulation de circulation ($\lambda=2$, $\beta=+10/-5^\circ$).

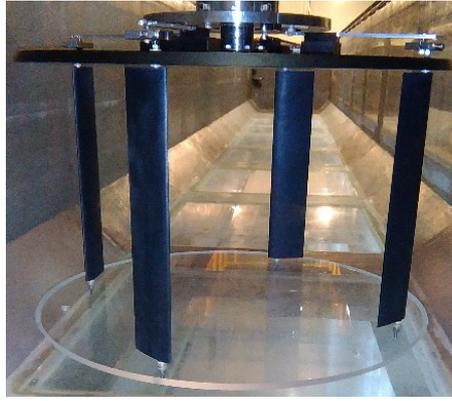


Figure 6: Rotor Darrieus en H à 4 pales muni du mécanisme de calage dynamique.

La turbine est tractée à vitesse et vitesse spécifiques constantes dans le bassin des carènes de la Plateforme d'Hydrodynamique Environnementale de l'Institut P'. Ce bassin de longueur 20m, largeur 1,5m, et profondeur maximale 1,3m est muni de tronçons vitrés sur le fond et sur l'une des parois latérales afin de permettre les mesures optiques. La vitesse de traction maximale est de 2,5m/s. Dans cette étude, les conditions expérimentales sont limitées à des vitesses de traction comprises entre 0.25m/s et 0.75m/s, et la turbine est immergée dans 600mm d'eau, dont le niveau est arasé au flasque supérieur dans le but d'éviter toute interaction avec le mécanisme de calage.

Un système de PIV Dantec Dynamic Studio muni de deux caméras SpeedSense et d'un laser Quantel Evergreen (532nm Nd:Yag 200mJ) est utilisé pour les mesures de champs de vitesses. Un couplemètre NCTE 2200-75N (+/-75Nm +/-0.04Nm) lié à l'arbre du rotor est utilisé pour les mesures de couple. Le cadencement entre la mesure PIV et les mouvements de rotation et de translation de la turbine est asservi et ajusté afin d'obtenir des mesures de vitesses avec une résolution angulaire de 10° ou 20° selon la vitesse de rotation appliquée.

IV – Résultats

IV – 1 Turbine à pales fixes

L'écoulement à travers et en aval de la turbine Darrieus munie de pales fixes est représenté en Figure 9 à plusieurs instants successifs au cours de son passage dans la fenêtre de visualisation. Les champs de vorticités mettent notamment en évidence le processus de décrochage dynamique s'établissant progressivement au cours de la phase amont du cycle, comme observé par de nombreux auteurs (Fujisawa et al. 2001, Ferreira et al. 2009, Gorle et al. 2016). Au point de fonctionnement étudié ici, ce phénomène se tient entre les positions angulaires $\alpha \sim 40^\circ$ et $\alpha \sim 120^\circ$. Au cours de cette phase, de la vorticités de signe négatif est continuellement relâchée côté extrados jusqu'au lâcher du tourbillon de bord d'attaque de vorticités positive. Les pales sont ensuite soumises à une série d'interactions avec les tourbillons émis par les pales précédentes, formant un sillage composé de multiples structures. En phase aval du cycle, l'écoulement reste attaché au pales jusqu'à la position $\alpha \sim 0^\circ$ pour laquelle une seconde interaction se produit.

Les mesures de couple montrent qu'à ce régime la turbine est résistive (Figure 10), conformément à ce qui a été observé précédemment (Gorle et al, 2016). Cette turbine est cependant productive au régimes plus élevés, qui ne peuvent être reproduits avec ce prototype sans endommager le mécanisme de calage dynamique.

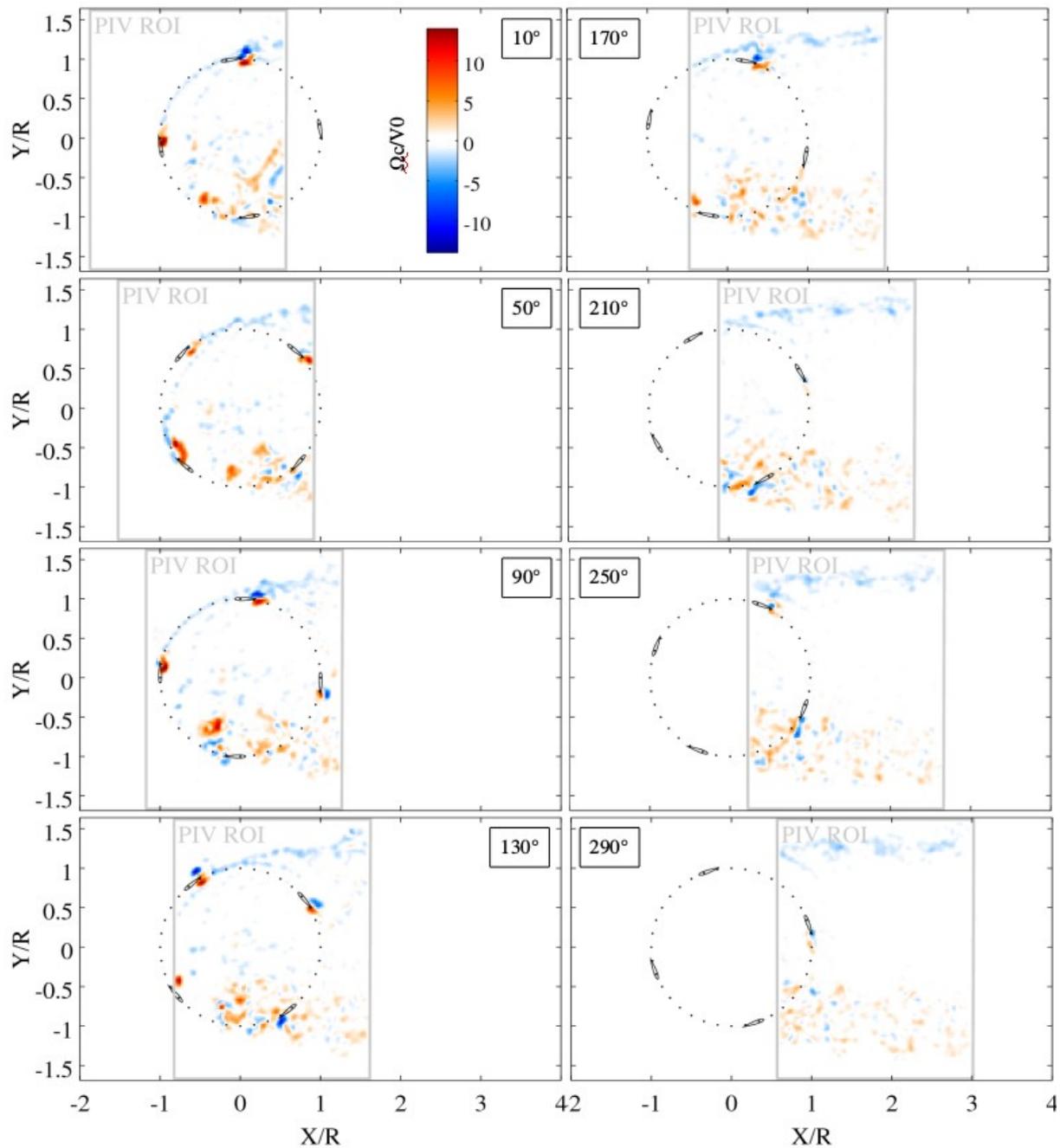


Figure 7: Distribution de vorticité à travers la turbine Darrieus à pales fixes au cours d'un cycle pour $V_0=0.5\text{m/s}$ et $\lambda=2$. La position angulaire est référencée

IV – 2 Circulation constante

L'application des lois de Couchet résulte théoriquement en l'établissement d'un écoulement dans lequel aucune vorticité n'est produite dès lors que la circulation cible est atteinte. En fluide réel, la viscosité et l'établissement de couches limites ainsi que le développement de la turbulence limitent l'applicabilité de ces lois à une gamme réduite de points de fonctionnement.

L'évolution de l'écoulement à travers la turbine Darrieus à pales mobiles et circulation constante est représenté en Figure 8 pour $\beta=+5^\circ$. L'écoulement reste attaché au pales sur la totalité du cycle à l'exception de deux zones d'interaction entre les pales et les sillage des pales qui les précèdent. A la différence de la turbine à pales fixes, les sillages observés sont alternés, de type allées de von-Karman dont la courbure est conditionnée par le mouvement cycloidal des pales. Ces sillages peuvent être comparés à ceux s'établissant en aval de profils d'ailes fixes à faible incidence, sous forme d'allées de von Karman orientées dans le sens de l'écoulement incident (Voir par exemple Yarusevych et al. 2006, 2009).

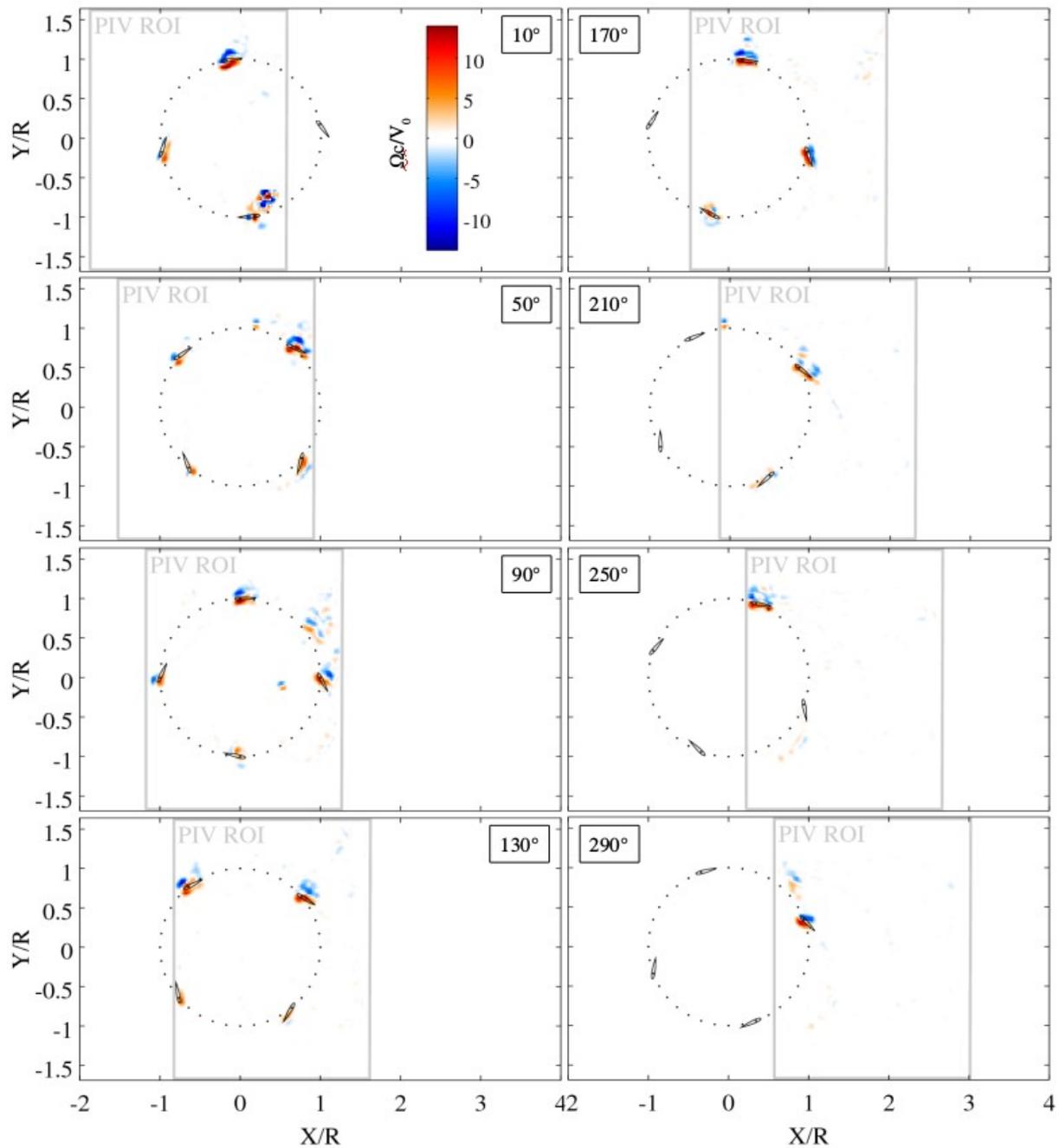


Figure 8: Distribution de vorticité à travers la turbine Darrieus à pales mobile avec loi de circulation constante ($V_0=0.5\text{m/s}$; $\lambda=2$; $\beta=+5^\circ$).

Conformément aux prédictions théoriques et aux résultats de simulation, la turbine opérant sous contrainte de circulation constante est non-propulsive (Figure 10), le couple résistant transmis à l'arbre du rotor croît régulièrement avec l'augmentation du régime de vitesse. En termes d'efficacité, l'influence relative du frottement visqueux décroît avec l'augmentation du nombre de Reynolds et permet à la turbine de tendre vers un fonctionnement plus représentatif de la théorie de Couchet, tout en demeurant non-propulsive.

IV – 3 Modulation de circulation

La figure 9 montre l'évolution de l'écoulement à travers la turbine Darrieus à pales mobiles pour la loi de calage associant deux phases à circulation constante d'incidences équivalentes $\beta=+10^\circ$ et $\beta=-5^\circ$. Au cours de ces phases l'écoulement reste attaché aux pales et s'accompagne également d'allées de von-Karman.

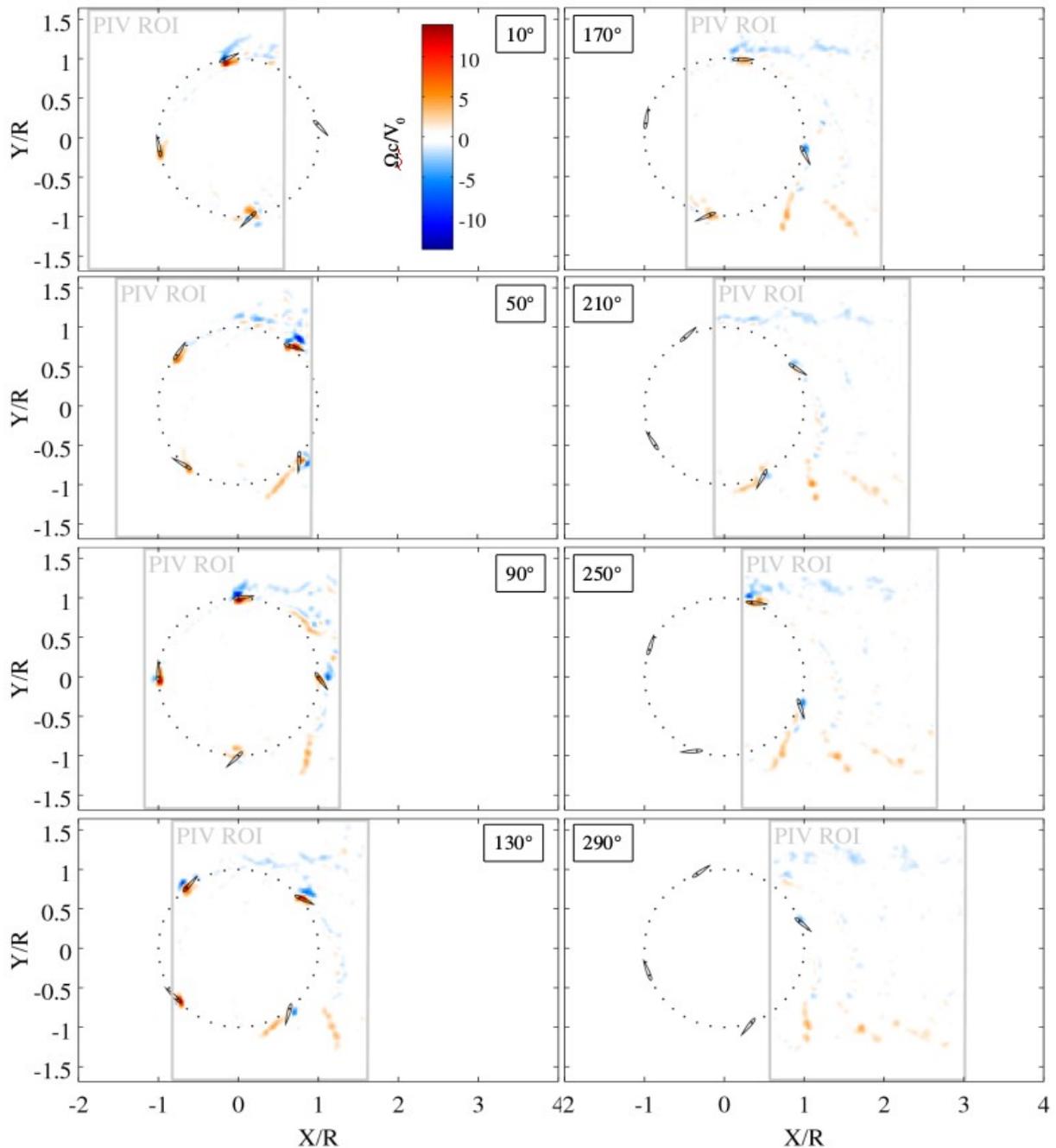


Figure 9: Distribution de vorticité à travers la turbine Darrieus à pales mobile avec modulation de la loi de circulation ($V_0=0.5\text{m/s}$; $\lambda=2$; $\beta=+10/-5^\circ$).

Les intervalles de transition entre deux valeurs cibles de circulation ont été imposés de façon à bénéficier d'un couple moteur pendant la phase amont du cycle tout en réduisant le couple résistant en phase aval. La transition $\beta=+10^\circ \rightarrow \beta=-5^\circ$ est ainsi appliquée entre $\alpha=180^\circ$ et $\alpha=225^\circ$, favorisant le maintien d'un couple moteur jusqu'à son changement de signe, pour $\alpha=180^\circ$. Le changement de circulation autour de la pale se traduit alors par le lâcher d'une série de tourbillons à circulation positive en périphérie de rotor, interdisant toute interaction ultérieure avec les pales. La transition $\beta=-5^\circ \rightarrow \beta=+10^\circ$ est appliquée entre $\alpha=330^\circ$ et $\alpha=10^\circ$, en coïncidence avec la phase d'interaction entre la pale atteignant la fin de son cycle et l'allée de von-Karman émise par la pale précédente. Les lâchers tourbillonnaires compensant la variation de circulation autour de la pale sont ainsi synchronisés avec cette interaction tout en étant également localisés en périphérie du rotor.

Le sillage du rotor est donc composé des allées de von-Karman associées aux mouvements épicycloïdaux des pales en son centre, et de lâchers tourbillonnaires émis de façon quasi-déterministe en sa périphérie.

Les performances de la turbine représentées en Figure 10 montrent que cette stratégie de

modulation de circulation se traduit par l'établissement d'un couple moteur pour la quasi totalité des régimes étudiés, alors que la turbine à pales fixes est soit résistante soit peu propulsive aux mêmes points de fonctionnement. On peut également observer que la turbine peut atteindre une efficacité de 6% à 10% alors que celle-ci est de 1,5% au plus dans le cas de pales fixes.

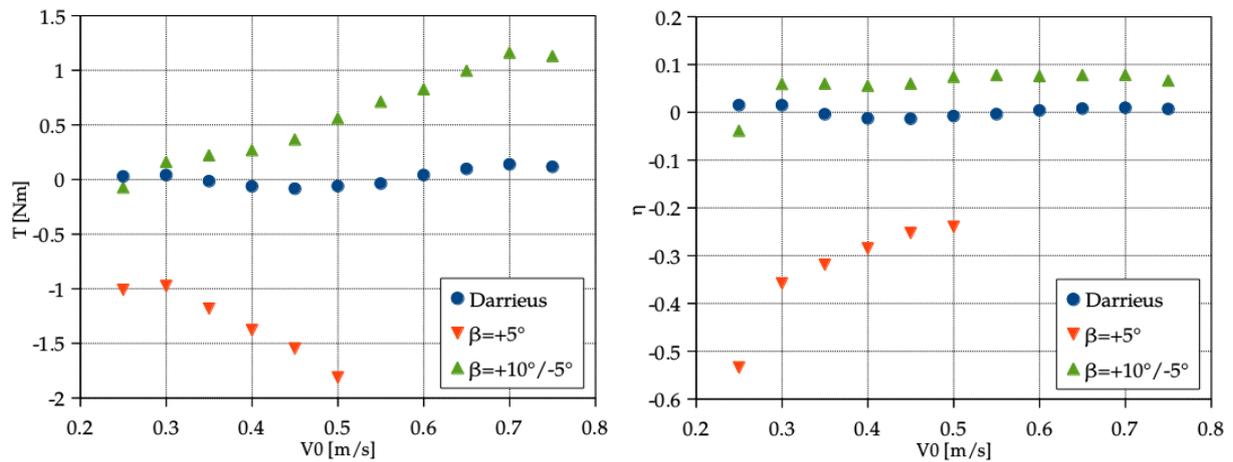


Figure 10: Evolution du couple moyen et de l'efficacité de la turbine Darrieus à pales fixes et à pales mobiles.

V – Conclusions et perspectives

Un prototype de turbine Darrieus à calage de pales dynamique a été testé en bassin des carènes pour des vitesses d'avance et de rotation constantes. Des lois de calage de pales issues de la théorie de Couchet sur les mouvements de profils avec circulation constante ont été appliquées afin de valider leur transposabilité en écoulement réel et de quantifier leur apport sur les performances de la turbine. Les résultats obtenus montrent que l'application d'une loi de mouvement à circulation constante permet de maintenir un écoulement attaché aux pales sur une plage restreinte de points de fonctionnement, malgré l'établissement d'allées de von-Karman et leurs interactions locales avec les pales. La combinaison de deux lois de circulations différentes au cours d'un même cycle permet également de conserver un écoulement attaché sur les phases de mouvement correspondantes, et se traduit par l'émission de tourbillons compensant la variation de circulation imposée lors des phases de transition, conformément au théorème de Kelvin. La modulation de circulation permet alors d'améliorer le rendement de la turbine tout en minimisant l'étendue et l'inhomogénéité de son sillage.

L'application stricte ou modulée des lois de Couchet permet notamment de prévenir le décrochage dynamique classiquement observé sur les turbines Darrieus tout en augmentant le couple moteur sur la phase amont de leur cycle. La modulation de la loi de mouvement ne permet cependant pas ici d'obtenir un couple moteur sur la phase aval du cycle, apportant peu d'amélioration en comparaison avec une turbine à pales fixes.

La faisabilité d'une optimisation des performances d'une turbine Darrieus à partir d'une approche théorique basée sur une formulation potentielle de l'écoulement est donc démontrée par son application expérimentale en fluide réel. Une grande variété de lois de calage peut être explorée, notamment en termes de circulations cibles et de dynamique de transition. La recherche d'un contrôle plus déterministe des lâchers tourbillonnaires transitionnels est un axe de développement possible. De même, la robustesse des lois de calage aux changements d'orientation ou de vitesse spécifique doit être étudiée afin de qualifier leur applicabilité en conditions réelles.

Références

- Couchet, G. 1945. Sur les mouvements plans, non stationnaires, à circulation constante, Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences, Séance du 10 Septembre, 280–286
- Couchet, G. 1950. Compléments à propos des mouvements plans à circulation constante, Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences, Séance du 10 juillet, 112–115
- Werlé, H. 1950. Les mouvements plans, non stationnaires, à circulation constante, La recherche aéronautique 26:13–18
- Fujisawa & Shibuya, Observations of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89(2):201-214, 2014
- Yarusevych, S., Sullivan, P.E. & Kawal, J.G. 2006. Coherent structures in an airfoil boundary layer and wake at low Reynolds numbers, Physics of Fluids 18:044101
- Gareth, C. & Cummins, P. 2007. The efficiency of a turbine in a tidal Channel, J. Fluid Mech. 588:243–251
- Yarusevych, S., Sullivan, P.E. & Kawal, J.G. 2009. On vortex shedding from an airfoil in low-Reynolds-number flows, J. Fluid Mech. 632:245–271
- Ferreira, C.J.S., Kuik, G.V., van Bussel, G.V. & Scarano, F. 2009. Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine, Experiments of Fluids 46:97-108
- Vincendet, J., Pons, F., Ba, M. & Chatellier, L. 2012. Les mouvements de profil compatibles avec un écoulement potentiel. Application à la commande de pâles d'hydroliennes, 13^e Journées de l'Hydrodynamique
- Gorle, J.M.R., Chatellier, L., Pons, F. & Ba, M. 2015. Critical Analysis of the Effectiveness of Blade Pitching for Vertical Axis Water Turbine, 11th European Wave and Tidal Energy Conference Series (EWTEC),
- Gorle, J.M.R., Chatellier, L., Pons, F. & Ba, M. 2016. Flow and performance analysis of H-Darrieus hydroturbine in a confined flow: A computational and experimental study, Journal of Fluids and Structures, 66, 382-402
- Gorle, J.M.R., Chatellier, L., Pons, F. & Ba, M. 2017. Operation of Darrieus turbines in constant circulation framework, Physics of Fluids, 29, 075103
- Gorle, J.M.R., Chatellier, L., Pons, F., & Ba, M. 2018. Modulated circulation control around the blades of vertical axis hydrokinetic turbine, Renewable and Sustainable Energy Reviews, *in revision*