Contribution à l'étude du contrôle actif de l'écoulement autour d'un profil de pale d'éolienne

A. Boudis [1*], O. Guerri [1], A. Benzaoui [2] et H. Oualli [3]

[1] Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Algiers, Algeria
[2] LTSE, Faculté de Physique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
B.P. N°32 Bab Ezzouar, 16111 Algiers, Algeria
[3] Laboratoire Mécanique de Fluides, Ecole Militaire Polytechnique
B.P. 17c, Bordj El Bahri, 16046, Algiers, Algeria

(reçu le 02 Septembre 2015 – accepté le 30 Septembre 2015)

Résumé - *Cette étude a pour objectif l'amélioration des caractéristiques aérodynamiques d'un profil de pale d'éolienne par l'utilisation d'une technique de contrôle actif de l'écoulement. Un actionneur de jet synthétique est utilisé pour contrôler l'écoulement autour d'un profil S809 placé dans un écoulement à un nombre Reynolds Re=10^6. Les équations moyennées de Navier-Stockes qui régissent l'écoulement autour du profil sont résolues en calcul instationnaire dans un domaine bidimensionnel à l'aide du code Ansys Fluent 16.1.0 ©. La turbulence est prise en charge par le modèle SST k-w. Les effets de la fréquence et de l'amplitude du jet sont étudiés pour le cas d'un profil placé sous un angle d'incidence de 15.2°, le jet synthétique étant appliqué sur l'extrados à une distance égale à 0.05c à partir du bord d'attaque (c étant la corde du profil). Les résultats obtenus montrent que le contrôle par jet synthétique a un effet significatif sur les forces aérodynamiques et la structure de l'écoulement autour de la pale. Pour les paramètres de jet synthétique étudiés, la finesse du profil (ou rapport CL/CD) est améliorée de 40.59 %.*

Abstract - *This study aims to improve the aerodynamic characteristics of a wind turbine blade profile using an actively controlling technique. A synthetic jet actuator is used to control the flow around a S809 profile placed in a flow at a Reynolds number Re=10^6. The Navier–Stokes equations governing the flow around the profile are solved in unsteady calculation of a two-dimensional domain using Ansys Fluent 16.1.0 code. The turbulence is considered using the k-w SST model. The frequency and amplitude effects of the jet are studied for a profile with an incidence angle of 15.2. The synthetic jet is applied on the profile upper surface at a distance equal to 0.05c from the leading edge (where c is the profile chord). The obtained results show that the synthetic jet control has a significant effect on the aerodynamic forces and structure of the flow around the blade. For the adopted parameters, the fineness (CL to CD ratio) of the profile is improved by 40.59 %.*

Keywords: Active flow control - Synthetic Jet - Wind turbine blade - Aerodynamic Force.

1. INTRODUCTION

Les éoliennes fonctionnent selon le principe de transformation de l'énergie cinétique du vent en une énergie mécanique de rotation qui est convertie, le plus souvent, en énergie électrique. Les pales sont l'élément moteur principal sur lesquelles le vent agit directement et l'un des phénomènes indésirables qui en résulte est le décollement de la couche limite. Ce décollement va générer plusieurs problèmes à savoir, l'augmentation de la traînée et la chute de la portance, l'augmentation des efforts et des vibrations des pales, ainsi que l'augmentation des nuisances sonores dues à la forte vorticité qui règne dans la zone décollée et interagit avec la pale.

* a.boudis@cder.dz

Aussi, la recherche pour l'amélioration des performances des éoliennes et la réduction des émissions sonores est un aspect important au sein de la communauté scientifique qui s'intéresse au développement des éoliennes. A cet effet, différentes techniques de contrôle des écoulements ont été utilisées récemment lors de la conception des pales des éoliennes pour obtenir des meilleures performances [1].

Le contrôle des écoulements et la problématique de réduction de la traînée et des instabilités tourbillonnaires sont des thèmes d'actualité qui font l'objet de nombreuses recherches dans plusieurs laboratoires dans le monde. Les techniques de contrôle d'écoulement se répartissent en deux grandes catégories: contrôle passif et contrôle actif [2].

Les techniques passives sont en général simples à mettre en œuvre et peu coûteuse, car elles ne nécessitent pas un apport extérieur d'énergie. Elles consistent en une modification géométrique du corps sur lequel agit le fluide comme le changement de la forme du profil [3] où l'ajout d'éléments solides fixés à la surface [4]. Historiquement, ce sont les premières méthodes de contrôle d'écoulements utilisées.

Le contrôle actif nécessite un apport extérieur d'énergie qui doit être la plus faible possible pour optimiser le rapport énergie fournie/gain énergétique. L'apport extérieur d'énergie peut s'agir d'une énergie: mécanique (parois mobiles [5], volets à fentes [6]), pneumatique (aspiration, soufflage [7], jets pulsés [8], jets synthétiques [9]) ou électrique (contrôle par plasma [10]).

Le contrôle par jet synthétique est classé parmi les moyens de contrôle actif les plus efficaces [11]. Il s'agit d'un écoulement généré par une cavité pulsée qui échange du fluide avec l'extérieur à travers un orifice. Le jet moyen qui en résulte a la particularité de ne pas apporter de fluide supplémentaire, c'est-à-dire que son débit moyen est nul.

Parmi les travaux de recherche réalisés sur le contrôle actif par jet synthétique appliqué aux pales d'éoliennes, on peut citer les travaux de Maldonado *et al.* [12] qui ont effectué des essais expérimentaux par PIV sur une pale d'éolienne équipée d'un dispositif de contrôle actif par jet synthétique. Ils ont montré que la topologie de l'écoulement autour de la pale est modifiée complètement sous l'effet du contrôle. La séparation de la couche limite a été atténuée et les vibrations induites par le découlement ont été réduites.

Taylor *et al.* [13] ont étudié expérimentalement l'effet du jet synthétique sur les forces et moments d'une pale d'éolienne basée sur un profil type S809. Deux cas ont été considérés: une pale statique et une pale animée d'un mouvement de tangage. Ils ont montré que le jet synthétique placé près du bord d'attaque permet d'augmenter considérablement la portance de la pale et de réduire la traînée et cela pour les deux cas étudiés (statique et dynamique).

Les mesures PIV ont montré que l'utilisation du jet synthétique réduit de manière significative la taille de la zone de recirculation et retarde ou réduise les effets néfastes de décrochage dynamique.

Tran *et al.* [14] ont effectué une simulation numérique tridimensionnelle de l'écoulement autour une pale d'éolienne type NREL phase 6 basée également sur un profil S809, en mouvement de tangage contrôlé par jet synthétique.

La pale a été placée dans un écoulement à deux vitesses différentes 10 et 15 m/s. L'actionneur du jet synthétique a été positionné à 5 % de la corde et activé à une fréquence adimensionnelle de 5. Les résultats obtenus par ces auteurs, montrent une forte réduction de la zone de séparation en aval du bord d'attaque ainsi qu'une amélioration de 73 % de l'hystérésis à la vitesse du vent nominal.

Actuellement les travaux de recherche sont orientés vers la découverte d'une meilleure efficacité de contrôle en optimisant les dispositifs de contrôle. C'est dans ce cadre que nous présentons ici les résultats d'une étude numérique portant sur l'influence de certains paramètres de jet synthétique (amplitude et fréquence) sur l'efficacité de contrôle actif de l'écoulement autour d'un profil S809. Dans ce qui suit, nous présentons successivement, la configuration du jet synthétique appliqué, l'approche numérique utilisée et puis les résultats obtenus.

2. CONFIGURATION DU JET SYNTHETIQUE

Le jet synthétique est généré par une succession de phases de soufflage et d'aspiration. Le jet moyen qui en résulte à la particularité de ne pas apporter de fluide supplémentaire, c'est-à-dire que son débit moyen est nul. Dans le présent travail, le jet synthétique est défini comme une condition aux limites, type Entrée de fluide (velocity_inlet) placée sur la surface supérieure de la pale [15, 16] et modélisée par la fonction sinusoïdale suivante,

$$U_j(t) = U_{j,max}\ \sin(2\pi f_j t)$$

L'efficacité du contrôle par jet synthétique est influencée par plusieurs paramètres (figure 1) à savoir, la position du jet X_j, le diamètre de la fente D_j, l'angle du jet α_j, la fréquence d'excitation f_j et la vitesse maximale du jet $X_{j,max}$. Trois paramètres adimensionnels sont habituellement utilisés pour étudier le contrôle actif par jet synthétique [17],

-Amplitude du jet adimensionel, $a_j = \dfrac{U_{jmax}}{U_\infty}$

-Fréquence du jet adimensionnel, $F^* = \dfrac{f_j C}{U_\infty}$

-Coefficient de quantité de mouvement, $C_\mu = \dfrac{\rho_j . D_j . U_{j,max}^2}{1/2 \rho_\infty . C . U_\infty^2}$

Où, U_∞ est la vitesse de l'écoulement libre et C est la corde du profil.

Dans tous les cas traités ici, l'actionneur de jet synthétique est placé sur l'extrados du profil à une distance $X_j = 5\%$ de la corde. Le diamètre de la fente est $D_j = 1\%C$ et l'angle de jet est tangentiel à la paroi.

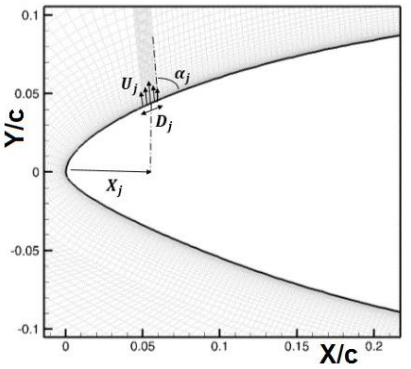


Fig.1: Représentation du jet synthétique

3. APPROCHE NUMERIQUE

3.1 Equations résolues

Les équations régissant l'écoulement autour du profil sont les fameuses équations de Navier-Stocks moyennées sous forme bidimensionnel et instationnaire. Ces équations peuvent être exprimées sous la forme suivante,

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_j}\left(\overline{\tau_{ij}} + R_{ij}\right)$$

Avec, $R_{ij} = -\rho\overline{u_i' u_j'}$ est le tenseur de Reynolds et $\overline{\tau_{ij}} = \mu\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$

3.2 Choix du modèle de turbulence

La turbulence est prise en compte par le modèle $SSTk-\omega$. C'est un modèle du premier ordre à deux équations, développé par Menter [18]. Il permet en général de bien simuler le comportement de la couche limite en cas de décollement car il combine les avantages du modèle $k-\omega$ classique avec le modèle $k-\varepsilon$ d'une manière à utiliser le modèle $k-\omega$ dans la région proche de la paroi et le modèle $k-\varepsilon$ pour les écoulements libres loin de la paroi.

3.3 Domaine d'étude et maillage

Le domaine d'étude retenu est bidimensionnel avec une configuration en C. Comme il est montré en figure 2, l'entrée du domaine est localisée à $9c$ en amont du bord d'attaque du profil et la sortie se trouve à $50c$ en aval du bord de fuite. Les frontières supérieure et inférieure se trouvent à $10c$ de part et d'autre du profil. Afin de raffiner le maillage au niveau du profil, le domaine de calcul est subdivisé en deux zones.

Le maillage est de type structuré. La zone 1 contient le profil de pale et de ce fait, elle est maillée avec un maillage quadrilatéral très fin pour mieux capter les gradients physiques en proche paroi. Le maillage réalisé est composé de 109200 cellules avec 610 mailles à la surface du profil. Le premier point de la grille est localisé à une distance normale à la paroi de $0.001c$ donnant une distance à la paroi adimensionnelle. Loin du profil $y^+ < 1$, dans la zone 2, le maillage est moins dense. La connexion entre les deux zones est assurée par des interfaces non-conformes

3.4 Conditions aux limites

Dans cette étude, nous avons opté pour les conditions aux limites suivantes (figure 2),

- -Sur la section d'entrée du domaine, nous avons imposé une condition type Dirichlet. L'air étant en mouvement, on a donc fixé la vitesse de l'écoulement à l'entrée (v*elocity inlet*).
- -La section en aval du profil est définie comme une sortie du domaine fluide, où nous avons fixé la pression atmosphérique (*pressure outlet*).
- -Dans les deux frontières, supérieure et inférieure la condition (*velocity inlet)* est imposée comme condition aux limites.
- -Le profil de pale est une paroi sur laquelle nous avons imposé la condition de non glissement (Wall).

- -Le jet synthétique est défini comme condition aux limites (*velocity inlet*) et assuré par l'introduction des fonctions définies par l'utilisateur (UDF ou User Defined Function).

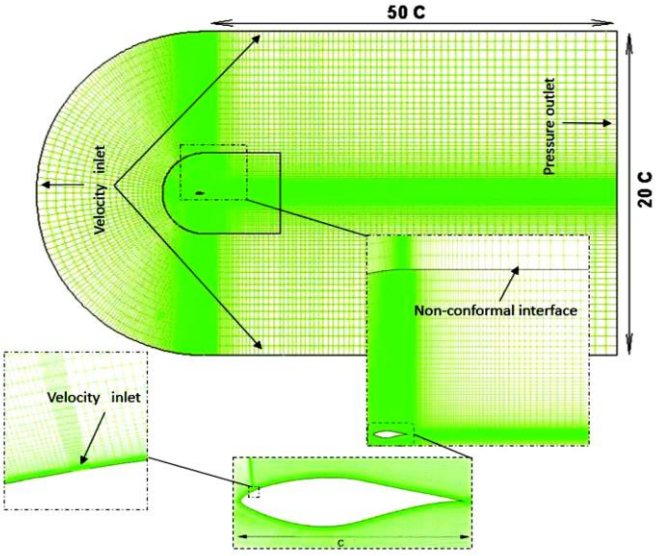


Fig. 2: Maillage et conditions aux limites

3.5 Algorithme et schémas de discrétisation

Les simulations numériques ont été exécutées en utilisant le code CFD ANSYS Fluent 16.0.1 ©. L'algorithme Simplec est utilisé pour résoudre les équations couplées Pression-Vitesse.

Pour la discrétisation spatiale, on a retenu le schéma convectif Muscl de 3ème ordre avec une discrétisation temporelle de premier ordre. Le schéma upwind de premier ordre est utilisé pour la discrétisation des équations de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation spécifique.

Toutes les simulations sont effectuées en régime instationnaire avec un pas de temps constant $\Delta T = 0.005s$. Ce dernier est déterminé sur la base d'une étude qui a été menée pour vérifier la stabilité de la solution numérique compte tenu de la taille des mailles et de la vitesse du fluide.

4. VALIDATION DES CALCULS

Pour valider le modèle numérique appliqué (domaine d'étude et maillage notamment), les calculs sont effectués pour un profil S809 sans contrôle placés sous différents angles d'attaque. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats expérimentaux publiés par OSU (Ohio State University, Aeronautical and Astronautical Research Laboratory) [19] en 1995 et DUT (Delft University of Technology) [20] en 1997.

La figure 3 montre que nos résultats, en termes de coefficient de portance et de traînée, sont en bon accord avec les données expérimentales pour les valeurs de α inférieures à 15° pour les données DUT et jusqu'à α = 20° pour les données OSU. La figure 3 montre clairement que les résultats expérimentaux de OSU et DUT sont

différents, surtout pour les angles d'attaque supérieurs à 15°. Cette différence peut être liée à la précision des appareils de mesure utilisés dans les deux cas.

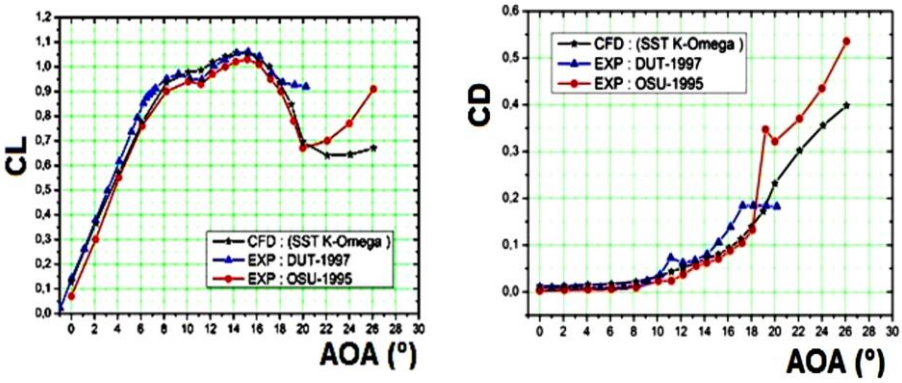
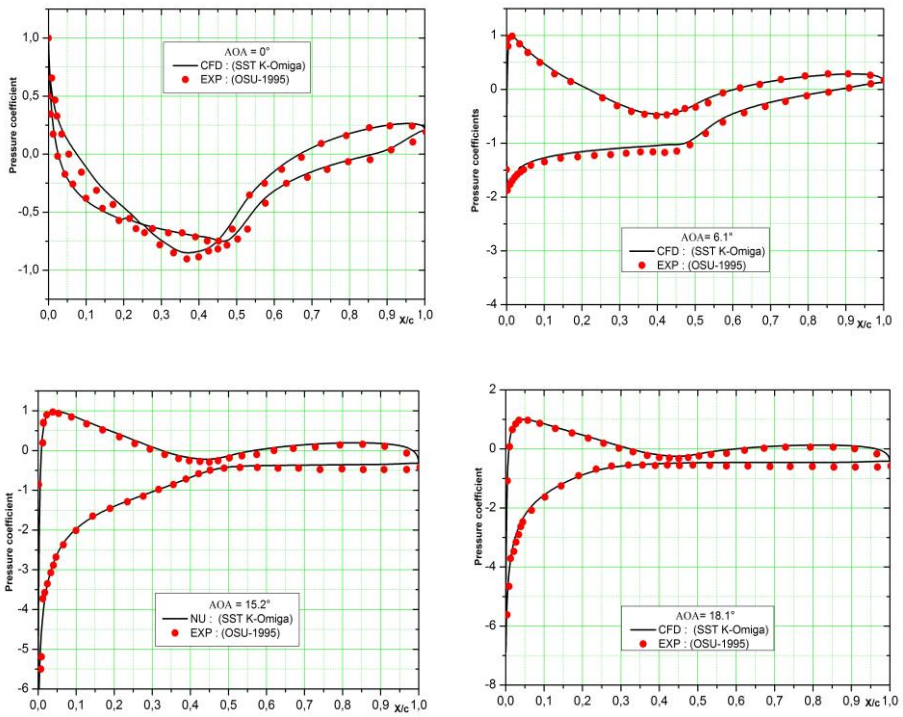


Fig. 3: Variation des coefficients de portance
et de trainée en fonction de l'angle d'attaque

Nous avons comparé également les coefficients de pression obtenus par simulation numérique avec les données expérimentales de l'OSU [19] et cela pour différents angles d'attaque ($\alpha = 0°$, 6.1°, 15.2°, 18.1°). La figure 4 montre que pour les angles d'attaque inférieurs à 18.1°, nos calculs reproduisent de manière très satisfaisante la distribution du coefficient de pression autour du profil S809. Alors que, pour les grandes incidences (> 20°) les résultats sont moins précis. A ces incidences, l'écoulement est complètement décollé et dominé par l'effet de l'instabilité aérodynamique.



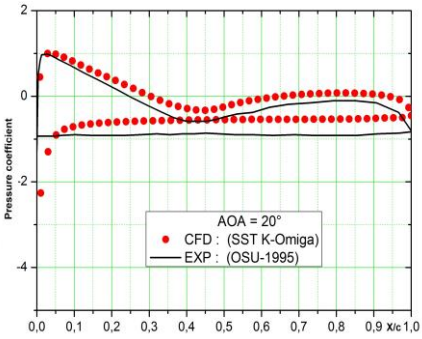


Fig. 4: Comparaison de la distribution de pression avec l'expérimental

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette étude paramétrique est effectuée pour évaluer l'effet de l'amplitude et de la fréquence de jet synthétique sur les coefficients de portance (C_L) et de traînée (C_D) et notamment sur le rapport C_L / C_D d'un profil S809. Le profil est placé dans écoulement incompressible et turbulent, le nombre de Reynolds basé sur la corde du profil étant égal à $Re = 10^6$, sous une incidence de 15.2°. Ensuite nous avons repris les calculs pour un profil placé sous différents angles d'attaque avec la configuration optimale du jet synthétique.

5.1 Effet de l'amplitude du jet synthétique

Dans un premier temps, pour une fréquence de jet synthétique fixe ($f_j = 50$ Hz) nous avons évalué l'effet de l'amplitude adimensionnel du jet sur les caractéristiques aérodynamiques du profil. La figure 5 illustre la variation de la finesse (C_L / C_D) en fonction de l'amplitude du jet qui varie de 0.2 à 3. On peut voir que le rapport (C_L / C_D) augmente avec l'augmentation de l'amplitude de jet. Conformément à la plupart des résultats existants dans la littérature, l'efficacité du jet synthétique est directement liée à l'accroissement de la vitesse du jet de contrôle.

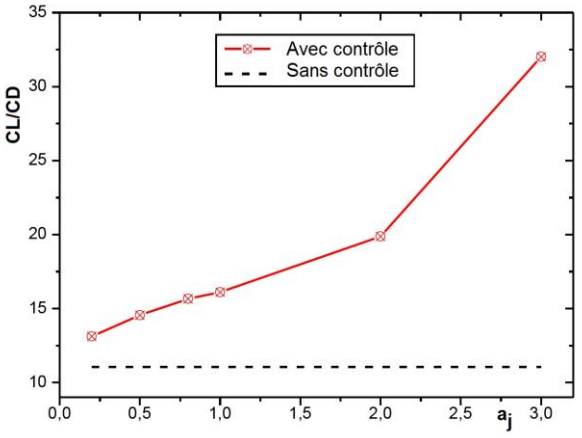


Fig. 5: Effet de l'amplitude de jet synthétique

La variation instantanée de la portance et de la trainée pour $a_j = 0.5$, $f_j = 5$ Hz et $C_\mu = 0.005$ est représentée sur la figure 6. On remarque que les valeurs de C_L et C_D oscillent de manière périodique avec les fréquences d'excitation.

Ces courbes nous permettent de réaliser des moyennes pour comparaison avec les coefficients de portance et de trainée obtenus pour un profil sans contrôle d'écoulement. Les moyennes obtenues dans ce cas sont de 1.129 et 0.073 pour la portance et la traînée respectivement, ce qui représente un gain en portance de 6.37 % et une réduction de 8.21 % de traînée par rapport aux valeurs des coefficients, lorsque le jet n'est pas activé. Il apparaît donc que le contrôle appliqué est relativement efficace.

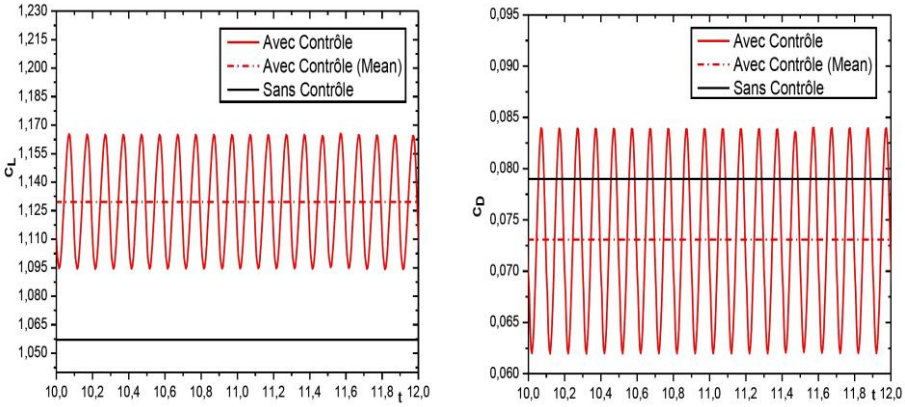


Fig. 6: Variation des coefficients C_L et C_D en fonction du temps

5.2 Effet de la fréquence du jet synthétique

Dans cette partie, l'amplitude du jet est fixée à 0.5, alors que la fréquence du jet varie de 5 à 400 Hz (F^* varie de 0.3 à 27).

La figure 7 présente la variation de C_L / C_D en fonction de la fréquence du jet synthétique. Le contrôle le plus efficace est obtenu lorsque la fréquence est égale à 50 Hz.

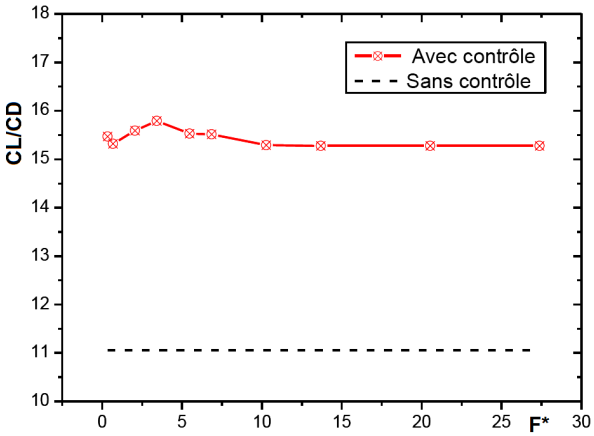
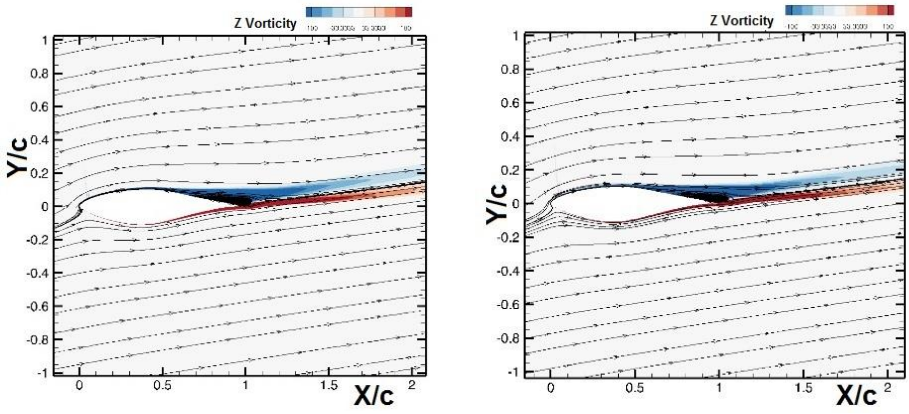


Fig. 7: Effet de la fréquence du jet

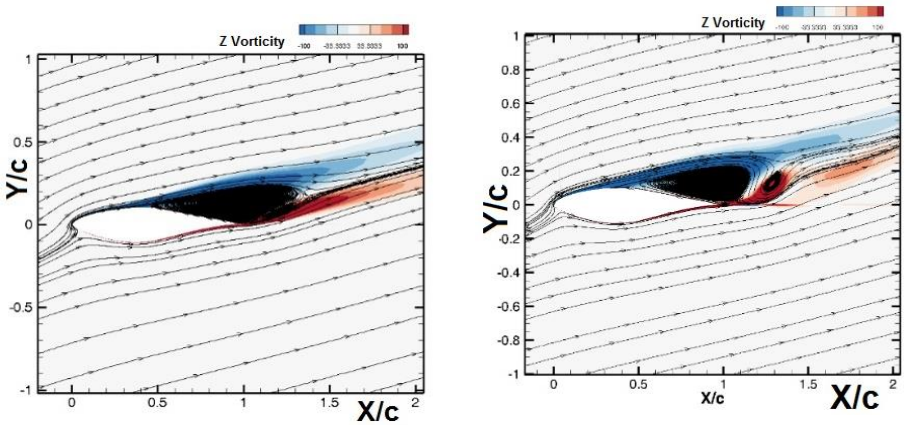
5.3 Cas de différents angles d'incidence

Les calculs sont effectués pour un profil placé sous les angles d'incidence α = 10.1°, 15.1°, 18° et 20° avec les paramètres de jet synthétique suivants: $a_j = 0.5$, $f_j = 5\ \text{Hz}$ et $C_\mu = 0.005$. Nous représentons sur la figure 8, les contours de vorticité autour du profil pour les cas avec et sans contrôle. Nous constatons que pour les faibles angles d'incidence (α inférieur à 15°) le jet synthétique a un effet négligeable sur la structure de l'écoulement et la zone de séparation sur l'extrados du profil. En conséquent, la finesse de la pale reste comparable au cas sans contrôle.

Par contre, pour les grandes incidences (α > 15°), le jet synthétique a un effet notable sur la topologie de l'écoulement. La visualisation des champs de vorticité montre que le point de séparation se déplace vers le bord de fuite et que la taille de la zone de recirculation diminue.



AOA=10.1°



AOA=15.1°

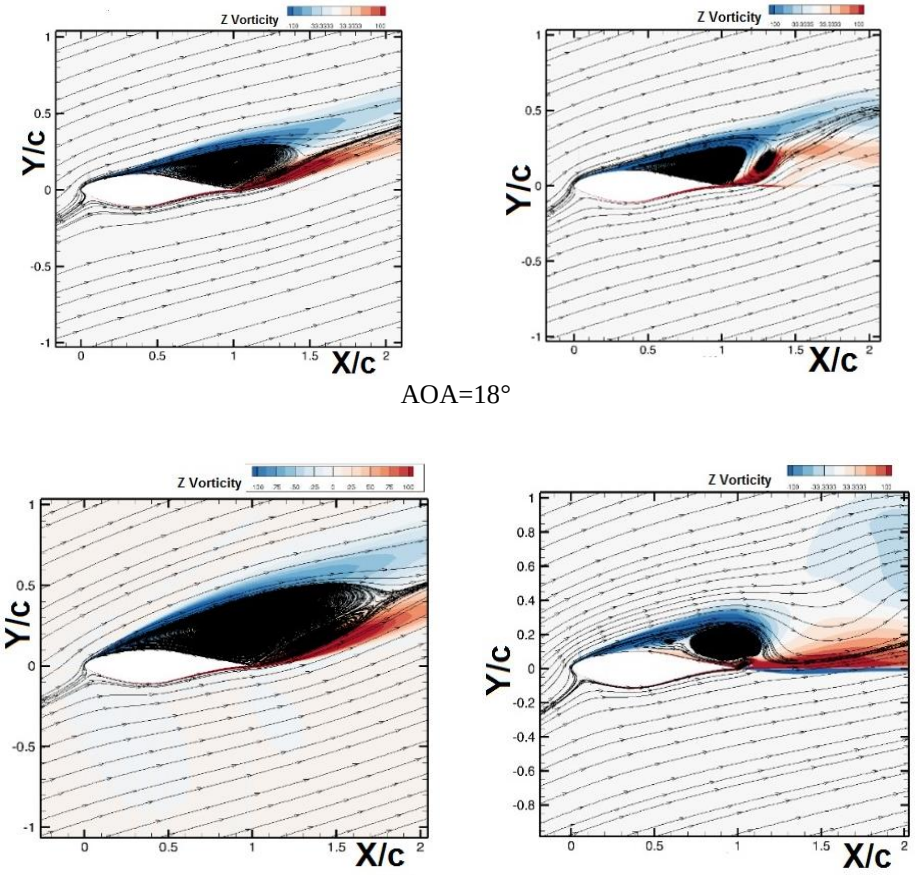


Fig. 8: Champs de vorticité pour différents angles d'attaque.
à gauche sans contrôle et à droite avec contrôle

6. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté des résultats d'une étude de l'efficacité du contrôle actif par jet synthétique appliqué à un profil de pale d'éolienne. Le modèle numérique appliqué est validé pour le cas d'un profil type S809 sans contrôle placé sous différentes incidences.

Le contrôle actif est ensuite appliqué au profil placé sous un angle d'attaque de 15.2°, le nombre de Reynolds étant égal à 10^6. Quantitativement, les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'un jet synthétique avec une amplitude $a_j = 0.5$, une fréquence $f_j = 50$ Hz et un coefficient de quantité de mouvement $C_\mu = 0.005$ permet d'améliorer la finesse de 40.59 %. Qualitativement, une diminution significative de la zone de recirculation sur l'extrados du profil est remarquée. Cette diminution est significative pour les angles d'attaques supérieurs à 15.2°.

A l'issue de cette étude paramétrique, il apparaît évident que l'efficacité de contrôle par jet synthétique est étroitement liées aux paramètres (a_j, f_j, X_j, D_j, α_j). Pour améliorer le rapport C_L / C_D (maximiser la portance et réduire la trainée) par jet

synthétique en choisissant judicieusement ces paramètres, une stratégie d'optimisation s'avère indispensable.

REFERENCES

[1] V. Vorgelegt, '*Passive and Active Flow Control Solutions for Wind Turbine Blades*', PhD thesis, University of Berlin. 2010.

[2] M. Gad-el-hak, *'Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Management*', Cambridge University, United Kingdom, 2000.

[3] H. Johari, C.W. Henoch, D. Custodio and A. Levshin, '*Effects of Leading-Edge Protuberances on Airfoil Performance*', AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, page 16, 2006.

[4] D.A. Spera,'Wind Turbine Technology', 2nd Edition, ASME, 2009.

[5] V.J. Modi, F. Mokhtarian, M. Fernando and T. Yokozimo, '*Moving Surface Boundary Layer Control as Applied To 2-D Airfoils'*, AIAA paper pp. 89–0296, 1989.

[6] F.E. Weick and C.J Wenzinger, '*Wind tunnel research comparing lateral control devices, particularly at high angle of attack (upper surface ailerons on wings with split flaps)*', NACA Report N°499, page 15, 1934.

[7] B.E. Wake, J.S. Kearney, G. Tillman and S.S. Ochs, '*Control of High-Reynolds-Number Turbulent Boundary Layer Separation Using Counter-Low Fluid Injection*', 3rd AIAA Flow Control Conference, 5-8 June, San Francisco, 2006.

[8] A.A. Hassan, '*Oscillatory And Pulsed Jets For Improved Airfoil Aerodynamics – A Numerical Simulation*', AIAA Paper 2004-0227, 2004.

[9] S.H. Kim, and C.A. Kim, '*Separation Control On NACA23012 Using Synthetic Jet'*, Aerospace Science and Technology, Vol. 13, pp. 172-182, 2009.

[10] O. Eisele, *'Flow Control Using Plasma Actuators At The Root Region Of Wind Turbine Blades',* Master's thesis, TU Berlin.

[11] A. Glezer and M. Amitay, *'Synthetic Jets'*, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 34, pp. 503 – 29, 2002.

[12] V. Maldonado, J. Farnsworth, W. Gressick, and M. Amitay, *'Active Control of Flow Separation and Structural Vibrations of Wind Turbine Blades'*, Wind Energy, Vol. 13, N°2, pp. 221 - 237, 2010.

[13] K. Taylor, C. Leong, M., and Amitay, M., '*Dynamic Load Control on a Finite Span Wind Turbine Blade Using Synthetic Jets'*, Proceeding in 50th AIAA Aerospace Scienced Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition , AIAA, Nashville, Tennessee, pp. 6-9, 2012.

[14] SA. Tran and O Sahni, '*Synthetic Jet Based Active Flow Control of Dynamic Stall Phenomenon On Wind Turbines Under Yaw Misalignment*', American Institute of Aeronautics and Astronautics, doi: 10.2514/6.2014-0871.

[15] M. Moshfeghi and N. Hur, '*Numerical Investigation On The Coanda Effect Over The S809 Airfoil With Synthetic Jet Actuator At High Angle Of Attack'*, 4th joint US-European Fluid Engineering Division Summer Meeting (FEDSM), Chicago, 2014-21857, 2014.

[16] M. Potsdam and A. Le Pape,*'CFD Investigations on a NACA 0036 Airfoil With Active Flow Control'*, 4th AIAA Flow Control Conference, Seattle, Washington, AIAA 2008-3869, 2008.

[17] A. Seifert, T. Bachat, D. Koss, M. Shepshelovich and I. Wygnansk, *'Oscillatory Blowing: A Tool To Delay Boundary-Layer Separation'*, AIAA Journal, Vol. 31, N°11, pp. 2052 - 2060, 1993.

[18] F.R. Menter, *'Zonal Two Equation k-ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows',* AIAA Paper, Vol. 93, pp. 2906, 1993.

[19] R.R. Ramsay, M.J. Hoffmann and G.M. Gregorek, '*Effect of Grit Roughness and Pitch Oscillations in the S809 Airfoil*', Airfoil Performance Report', the Ohio State University, 1999.

[20] DM. Somers, '*Design and Experimental Results for the S809 Airfoil*', Technical Report, NREL/SR-440-6918, 1997.