

Simulation d'un écoulement d'air projeté sur un profil de pale d'éolienne avec générateurs de vortex

Brahem Benazieb* et Zoubir Nemouchi†

Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie,
Université Constantine 1, Campus Chab Ersas, 25000 Constantine, Algérie

(reçu le 15 Décembre 2014 – accepté 30 Mars 2015)

Résumé - *Le présent travail est une contribution à l'étude par simulation numérique de la dynamique de l'air à travers des générateurs de vortex contre rotatifs sur un profil de la pale d'éolienne urbaine 'FX-63-137' à l'aide du code de calcul –Fluent-, en utilisant le modèle de turbulence ($k-\varepsilon$), en régime permanent et incompressible avec un nombre de Reynolds $Re=10^5$. Les effets de la géométrie des générateurs de vortex et leurs positions par rapport au profil ont été mis en évidence. La première partie du travail traite de l'écoulement autour du profil avec les générateurs de vortex pour un certain angle d'attaque et la solution 3D avec générateur de vortex est comparée à celle de l'écoulement autour d'un profil 2D plan sans générateur de vortex. La deuxième partie de ce travail traite des effets du changement de la position des générateurs de vortex (GV) et l'angle d'incidence du vent par rapport au profil, pour les cas sans et avec générateurs de vortex sur les forces de portance et de traînée induites.*

Abstract - *This work is a contribution to the numerical simulation of the dynamics of air through rotating vortex generators against a profile of the urban wind turbine blade 'FX-63-137' with the computer code –Fluent-, using the turbulence model ($k-\varepsilon$), steady and incompressible regime with a Reynolds number $Re=10^5$. The effects of the geometry of the vortex generators and their positions relative to the profile have been highlighted. The first part of the work deals with the flow around the profile with the vortex generators for a certain angle and 3D solution with vortex generator is compared to that of the flow around a 2D plane profile without vortex generators. The second work deals with the effects of changing the position of the vortex generators (VG) and the angle of incidence of the wind relative to the profile, for cases with and without vortex generators on lift forces and induced drag.*

Mots clés: Générateurs de vortex – Réduction de la traînée - Contrôle de la couche limite - Augmentation de la force de portance.

1. INTRODUCTION

Le monde d'aujourd'hui nécessite l'accès à l'utilisation des nouvelles technologies qui pourront produire suffisamment d'énergie, mais sans désastre. De nos jours, il y a plus de '14000 Gigawatts d'énergie par an consommés par l'humanité qui se base dans l'énergie fossile dont environ 32% proviennent du pétrole, 26% du charbon et 19% du gaz, soit 77% de combustibles fossiles non renouvelables' [1].

Des défis sont lancés dans le domaine des énergies propres. On parle bien des énergies amies avec la nature, 'les Energies Renouvelables'.

On a bien voulu risquer de faire une étude numérique avec le code –Fluent- en optimisant l'un des modèles d'énergie renouvelable comme les éoliennes et en introduisant la science d'aérodynamique et celle de la mécanique des fluides, et ce, en

* brahembey@gmail.com

† z.nemouchi@gmail.com

utilisant des générateurs de vortex contre rotatif sur les profils d'éoliennes urbaines horizontales nommés (Wortmann 'FX-63-137'), (Fig. 1).

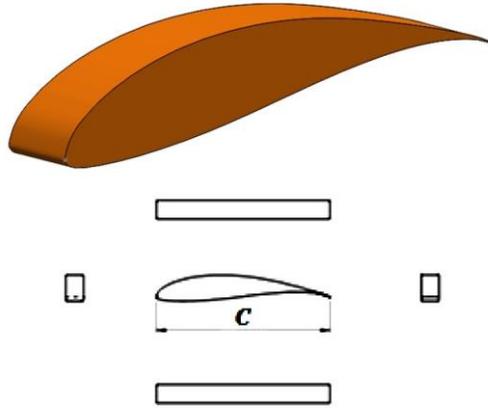


Fig. 1: Profil Wortmann 'FX 63-137' et sa mise en plan

Le travail a été réalisé pour le contrôle de la couche limite et l'augmentation de la force de portance, avec un profil sans générateurs de vortex (GV). Elle diminue ou reste constante, en utilisant des générateurs de vortex sur le profil d'une éolienne urbaine déjà vu avec les caractères suivants, une épaisseur maximale de 13.71% à 30.9% de la corde et une cambrure maximale de 5.97% à 53.3% de la corde.

Une vitesse du vent a été choisie par rapport à la localité de 'Chaabat Ersas', à Constantine à une altitude d'environ 700 m au-dessus du niveau de la mer, avec une vitesse qui, telle que mesurée par des chercheurs du Département de Physique. Pour avoir un nombre de Reynolds = $V.C / \nu = 10^5$.

On a choisi des générateurs de vortex (GV) contre-rotatifs rectangulaires, comme ceux utilisés par Mueller *et al.*, [5]. (Fig. 2).

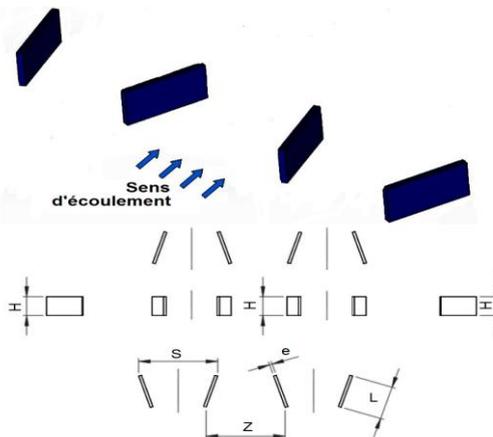


Fig. 2: Générateur de vortex (GV) utilisé et sa mise en plan (contre-rotatif)

Les générateurs de vortex ont été positionnés exactement perpendiculaires sur l'extrados et par rapport à la longueur de la corde, à 10% C, et à 30% C. (Fig. 3).

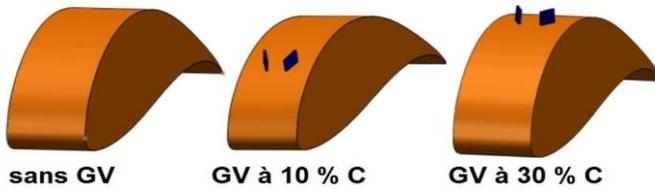


Fig. 3: Mise en place des GV pour 10% C et 30% C

Beaucoup de travaux ont été rapportés de la littérature sur les différentes méthodes de contrôle, mais il y a peu seulement dans le cas des générateurs de vortex (GV) et encore moins pour les éoliennes.

Afjeh *et al.*, 1990 ont montré numériquement et expérimentalement que des simples lames (générateurs de vortex) sur une éolienne équipée de trois rotors identiques ont été essayées avec succès pour réduire au minimum les pertes dues à la séparation dans l'écoulement d'air. Les résultats prédits par la méthode numérique semblent être en bon accord avec l'expérimentale.

Il y a eu trois expériences: dans la 1^{ère}, il n'y a pas de générateur de vortex sur le rotor; dans la 2^{ème}, presque 70% de la partie inférieure du rotor est équipé de générateurs de vortex; dans la 3^{ème}, des générateurs de vortex ont été installés sur l'ensemble du rotor. Il y a eu une augmentation d'angle d'attaque jusqu'à 25° et par conséquent, il y a eu une augmentation dans la vitesse de rotation du rotor et donc une augmentation du rendement de l'éolienne. [2]

Lengani *et al.*, ont réalisé une étude expérimentale détaillée de mécanisme de séparation de la couche limite sur une plaque plane à grande échelle. Ils ont mis en place des générateurs de vortex afin de contrôler le flux et retarder le décrochage. Ils ont réussi à atteindre près de 50% du retardement de la séparation du flux de contrôle. [3]

Godard *et al.*, dans leurs travaux, ont testé deux modèles de générateurs vortex (GV), les co-rotations et les contres-rotation afin de baisser le plus possible la force de traînée. Après étude, les deux types ont donné une amélioration significative de la performance. Néanmoins, le dispositif de contre-rotation apparaît plus efficace que le dispositif de co-rotation. Ils ont trouvé que la forme rectangulaire des générateurs (GV) a un effet positif de plus de 20% comparée à celle triangulaire. L'angle d'attaque des générateurs (GV) est très sensible et il a été fixé à une valeur optimale de 18°. [4]

Mueller *et al.*, ont montré que des générateurs de vortex en forme triangulaire contre-courant sur une pale d'éolienne (NACA 63-618). La hauteur du premier est de 1.7%C et celle du deuxième est le double. Ils ont fait une étude numérique, à l'aide du logiciel – Xfoil- et aussi l'expérimentation. Ils ont joué sur les positions des générateurs de vortex par rapport à la corde et la distance 'z' entre deux générateurs de vortex opposés. Ils ont obtenu de meilleurs résultats quand 'z' est plus petit. [5]

Zhen *et al.*, ont montré numériquement à l'aide de modèles de turbulence (RANS) et le code commercial 6.3TM Fluent et aussi expérimentalement à l'aide de la soufflerie subsonique à circuit ouvert que l'utilisation des générateurs de vortex en forme triangulaire et rectangulaire sur l'aile d'avion (NACA 4415) a des effets positifs sur la couche limite afin que cette dernière ne se décroche pas aussi facilement à un angle d'attaque moins faible.

Par conséquent l'augmentation de l'angle d'attaque fait que la force de portance augmente de 6.3%. Ils ont obtenu lors de la comparaison entre l'expérimental et des résultats numériques un accord satisfaisant. L'étude paramétrique montre que le coefficient de portance maximum atteint est supérieur lorsque les générateurs de vortex

sont placés plus près de l'emplacement de séparation et que les générateurs de vortex rectangulaires donnent des résultats meilleurs que les générateurs triangulaires. [6]

Tebbiche *et al.*, ont utilisé le code –Fluent- et aussi réalisé un essai expérimental avec une soufflerie pour étudier l'effet des générateurs de vortex en forme de 'V' sur le profil d'avion (NACA 0015), avec une vitesse d'air de 25 m/s et un $Re=2.6 \cdot 10^5$. Il a pris compte de plusieurs paramètres, tels que la position et la taille, et aussi l'angle d'attaque. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a une réduction de la force de traînée jusqu'à 10%. [7]

Dans ce travail, une simulation numérique a été faite, à l'aide du code de calcul –Fluent-, de l'écoulement d'air sur une pale d'éolienne 'FX-63-137' dans le but d'étudier le comportement dynamique autour du profil en absence et en présence des générateurs vortex (GV). Les effets de l'angle d'incidence du vent et aussi de la position des générateurs de vortex par rapport au profil ont été examinés.

2. MODELES MATHEMATIQUES

Dans ce projet, le fluide utilisé est l'air, considéré newtonien et incompressible. L'écoulement est supposé turbulent, stationnaire en moyenne et tridimensionnel. Les équations fondamentales qui régissent notre écoulement sont décrites ci-dessous.

Equation de continuité [8]

$$\text{div}(\vec{U}) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

Equation de quantité de mouvement [8]

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

Equation de continuité moyenne [13]

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0$$

Equation de quantité de mouvement moyenne [8]

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right)$$

Modèle de turbulence k-ε standard

Ce modèle utilise le concept de Boussinesq pour calculer le terme représentant le flux de quantité de mouvement par la turbulence. [4, 8]

$$-\overline{u_i u_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Pour un fluide newtonien et incompressible, les deux équations de transport de l'énergie cinétique turbulente k et de son taux de dissipation ε sont données par: [8]

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot k \cdot U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \cdot \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot \varepsilon \cdot U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \cdot G_k \cdot \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Le terme (G_k) représente la production de l'énergie cinétique turbulente, il est défini par: [8]

$$G_k = -\rho \cdot \overline{u_i u_j} \cdot \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$$

Pour la méthode numérique, on a utilisé la méthode des volumes finis avec schéma numérique décentré amont (Upwind) d'ordre deux. (Fig. 4)

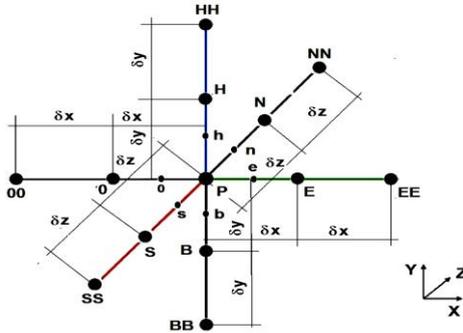


Fig. 4: Volume de contrôle (3D)

Comme on a travaillé avec l'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations), c'est l'une des méthodes utilisées pour le couplage Vitesse-Pression. Cet algorithme est basé sur l'estimation et la correction de la vitesse et de la pression. [9]

3. CALCULS PRIMAIRES

On a essayé d'optimiser et de raffiner plus que possible les mailles pour que la solution soit rapprochée à la réalité. (Fig. 5)

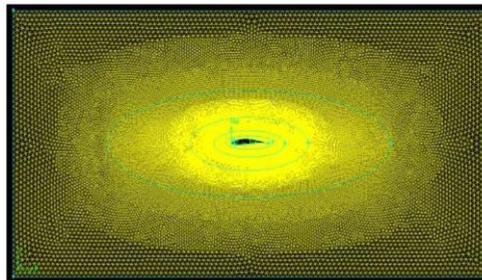


Fig. 5: Génération de maillages vus de loin

Dans le cas sans (GV) 2D, (Fig. 6) et dans le cas avec (GV) 3D, (Fig. 7).

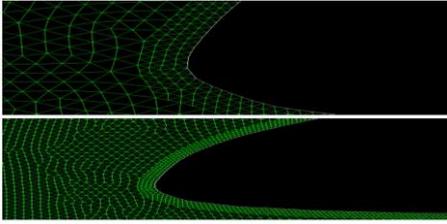


Fig. 6: Maillage près de la paroi avec quatre fois d'adaptation sans (GV) 2D

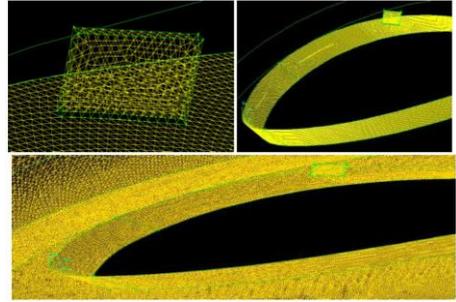


Fig. 7: Maillage du profil avec (GV) 3D

Pour 2000 itérations, la solution a convergé dans les deux cas, soit avec des générateurs vortex ou sans générateurs(GV), (Fig. 8).

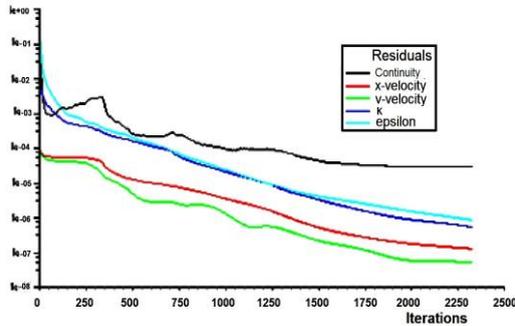


Fig. 8: Courbe des résidus

Pour les conditions aux limites, on a introduit dans 'Gambit' les 2D et les 3D.

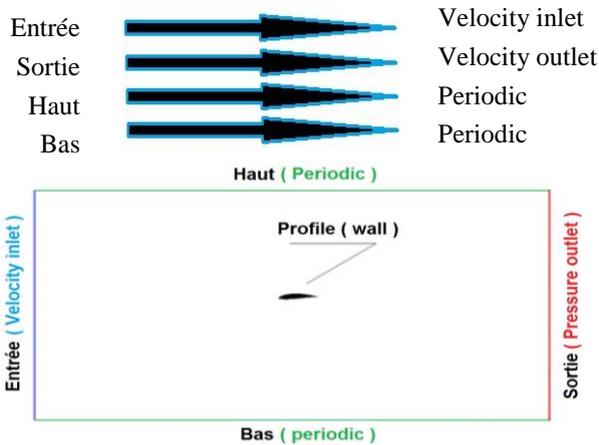


Fig. 9: Conditions aux limites

Remarque- Pour le cas 3D, on a ajouté pour les deux surfaces latérales gauches et droites, la condition de symétrie.

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La configuration choisie pour cette partie de l'étude est telle que l'angle d'incidence est de 14° pour les deux cas d'écoulement 2D sans (GV) et 3D avec (GV) et pour le cas 3D. La position des générateurs de vortex sur la pale se trouve à 10 % de la corde.

Les distances caractéristiques utilisées sont définies sur la figure 10.

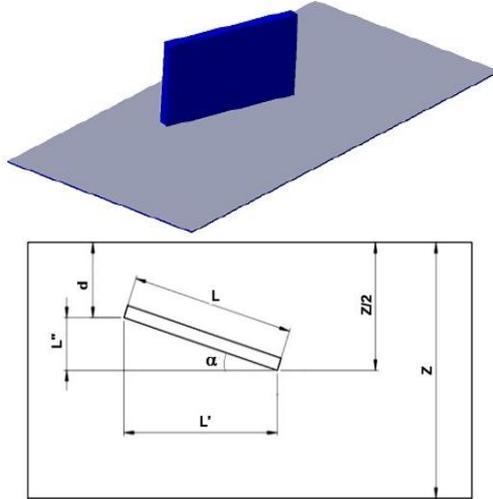


Fig. 10: Distances caractéristiques

C'est ainsi que d'après ces distances que l'on a divisé le profil dans le cas 3D par des plans (x, y) et aussi (y, z) , comme on a fait avec des lignes perpendiculaires sur le profil afin d'obtenir des résultats (contours, profils et vecteurs).

4.1 Résultats du champ de vitesses

La figure 11 présente les contours du module des vitesses pour l'écoulement sans générateurs (GV) et en différents plans (x, y) dans le cas avec (GV). Sur tous les plans, le comportement général est une forte accélération du fluide juste en aval du point de stagnation au bord d'attaque, coté extrados, suivie d'une décélération le long de l'extrados jusqu'au bord de fuite.

En moyenne, la vitesse sur l'extrados est plus élevée que le long de l'intrados, ce qui résulte une circulation nette dans le sens horaire autour du profil. C'est ce qui engendre la force de portance. En aval du profil, le sillage est caractérisé par de faibles vitesses. Evidemment, plus les vitesses sont faibles dans le sillage et plus la force de traînée est importante.

Dans le cas sans (GV), à $z=0$ m, on voit que le générateur de vortex a pour effet une deuxième accélération du fluide dans la région entre les deux générateurs de vortex opposés, suivie d'une décélération. Vu que la section de passage diminue, puis augmente entre les deux générateurs de vortex (GV).

A $z=d$, et à $z=Z/2$, la vitesse du fluide est faible autour du générateur de vortex (GV), particulièrement derrière l'obstacle où il y a une zone de recirculation.

La comparaison entre les sillages en aval du profil dans les cas sans et avec (GV) montre que l'ajout du générateur de vortex a entraîné un élargissement de la zone du sillage.

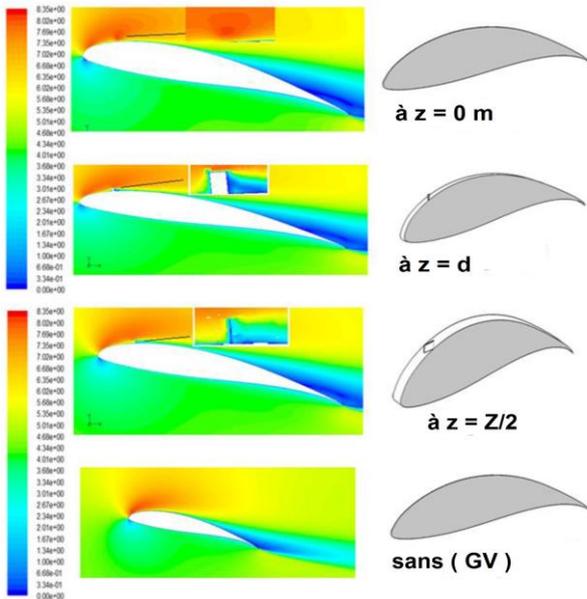


Fig. 11: Contours du module des vitesses

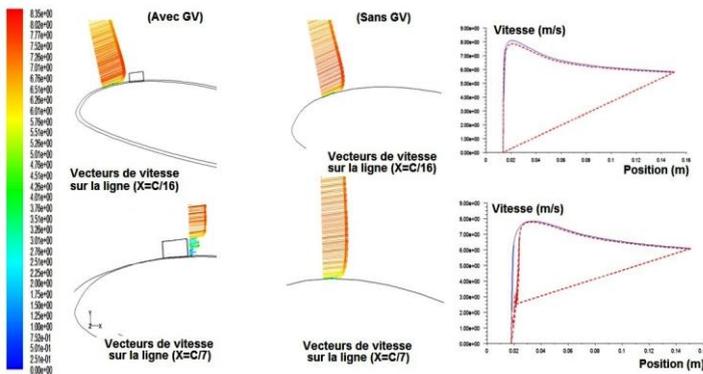
La figure 12 montre des vecteurs et des profils de vitesse en différentes stations le long de l'extrados. Sur la ligne $x=C/16$ m, la variation de vitesse montre que la vitesse, qui était de 5 m/s loin en amont a augmenté à environ 8 m/s sur l'extrados dans l'écoulement sans (GV) et avec (GV).

A $x=C/7$ m, c'est-à-dire juste en aval du générateur vortex (GV), dans le cas où il y a un générateur vortex (GV), la vitesse est diminuée derrière l'obstacle par rapport au cas sans générateur (GV). Mais plus on s'éloigne de la paroi et plus les profils de vitesse dans les deux cas deviennent similaires.

A $x=C/4$ m, la solution de l'écoulement avec (GV) dévie de celle sans (GV) dans la région proche de la paroi. C'est probablement l'effet du générateur de vortex qui a freiné le fluide dans cette zone, comparativement au cas sans (GV).

A la position, $x=9C/10$ m, il y a eu décrochage dans l'écoulement 3D, confirmé par des valeurs de vitesse négative, près de la paroi. Dans la configuration sans générateur (GV), à la même position, on ne voit pas de vitesses négatives, mais la couche limite paraît sur le point de décoller.

Remarque (Fig. 12): le profil est en couleur 'rouge', la ligne en coupe est celle du générateur vortex (GV).



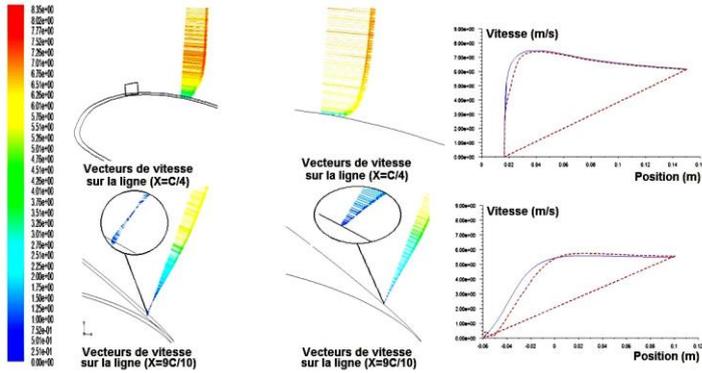


Fig. 12: Vecteurs et profils des vitesses

Dans la figure 13, les vecteurs de vitesse projetés sur différents plans $x=C/10m+3L'/2m$, $x=C/10m+2L'm$, $x=0.06m$, $x=0.07m$, $x=0.08m$ et $x=0.11m$, ont permis la mise en évidence de l'existence d'un vortex longitudinal stable, situé en aval du générateur de vortex.

A $x=C/10m+3L'/2m$, les vecteurs de vitesse projetés sur le plan montrent clairement la structure tourbillonnaire longitudinale longeant le générateur de vortex et tournant dans le sens horaire.

Plus loin en aval, à $x=C/10m+2L'm$, la taille du vortex a augmenté appréciablement. Les contours de la composante de vorticité suivant x exhibent une tache bleue située en fait au centre du vortex.

Aux plans $x=0.06m$, $x=0.07m$ et $x=0.08m$, les vecteurs de vitesse projetés montrent que le vortex dévie lentement dans la direction latérale, suivant z positif. La taille de cette structure continue d'augmenter.

A $x=0.11m$, le vortex a presque disparu.

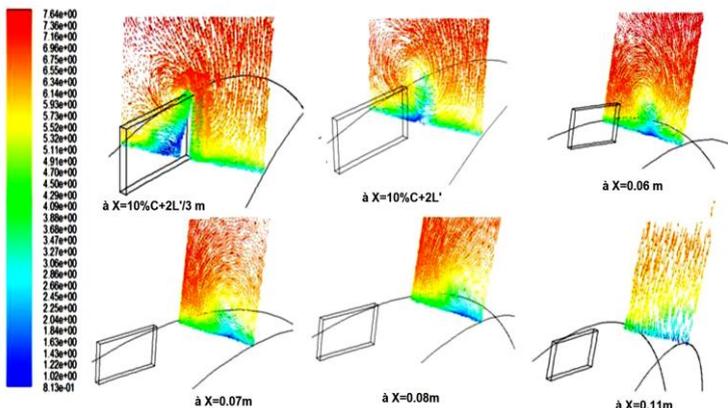


Fig. 13: Vecteurs de vitesse projetés sur différents plans

4.2 Résultats du champ de pressions

Les contours de pression sont illustrés sur la figure 14 pour l'écoulement de l'air sans générateur de vortex (GV) et sur différents plans $z = \text{constante}$ pour le cas avec générateur (GV). A l'extérieur des couches limites longeant la paroi du profil, l'écoulement peut être considéré non visqueux, où l'équation de Bernoulli est

applicable. Le long d'une ligne de courant, là où la vitesse et donc l'énergie cinétique diminuent, la pression augmente, et inversement. Au point de stagnation, la pression est maximale. Sur l'extrados, une dépression est observée, correspondant aux grandes vitesses obtenues dans cette zone.

Dans le cas avec générateur (GV), la pression est relativement élevée dans la partie avant du générateur (GV) et elle est diminuée juste derrière. L'insertion du générateur (GV) a eu pour conséquence une influence sur le champ de pression essentiellement autour du générateur de vortex.

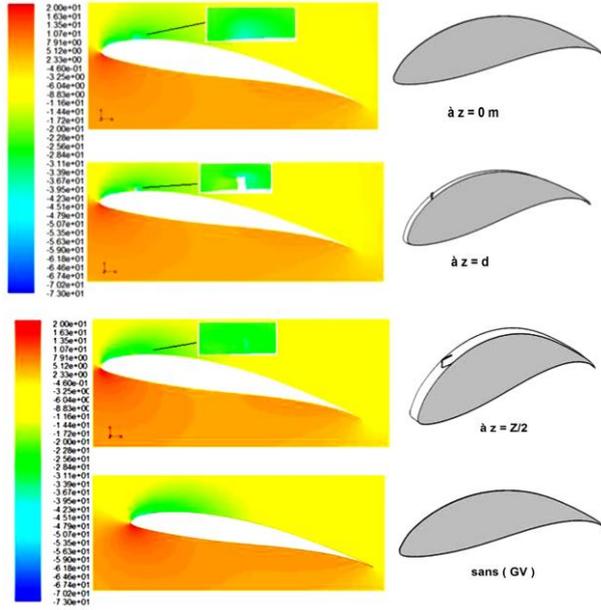


Fig. 14: Contours de pressions

4.3 Résultats de la turbulence (énergie cinétique turbulente k)

Les contours de l'énergie cinétique turbulente de la solution sans générateur (GV) et ceux de la solution avec générateur (GV) aux différents plans $z = \text{constante}$ sont décrits à la figure 15. Les zones de turbulence intense, telles que prédites par le modèle $(k - \epsilon)$ sont situées dans les régions où les gradients de vitesse sont importants, c'est-à-dire près du bord d'attaque, dans les couches limites, au bord de fuite et dans le sillage en aval du profil.

Dans le cas avec générateur (GV), la présence du générateur de vortex a eu pour effet une intensification de la turbulence. Loin de la pale, la turbulence est presque inexistante, l'écoulement étant quasiment non visqueux.

La comparaison des variations de l'énergie cinétique turbulente des solutions sans et avec générateurs (GV), en fonction de la position sur des lignes avant, autour et après le profil présentée à la figure 16.

A la position $x = -2C$ m, l'énergie cinétique est très faible et pratiquement uniforme. A $x = -C/2$ m, cette faible turbulence a diminué encore puisqu'elle a été dissipée sous forme de chaleur par l'effet de viscosité. On peut voir quand même un début d'influence de la présence de la paroi de la pale sur l'écoulement au niveau de ces deux positions ($x = -2C$ m et $x = -C/2$ m).

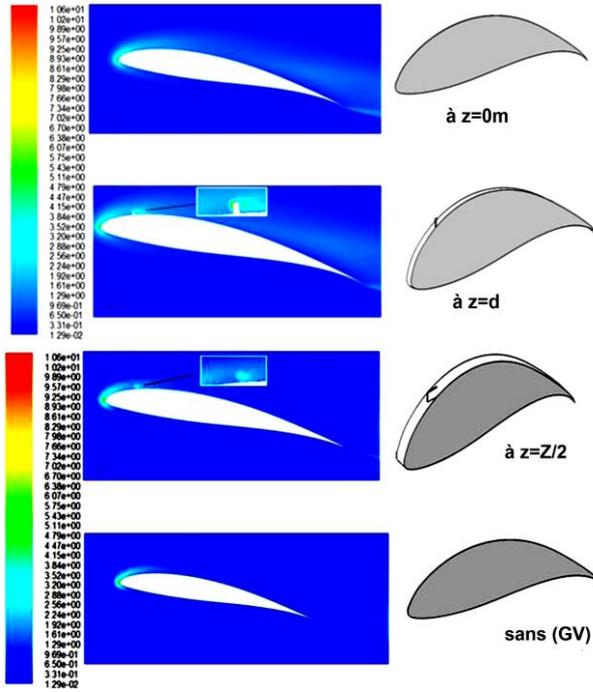
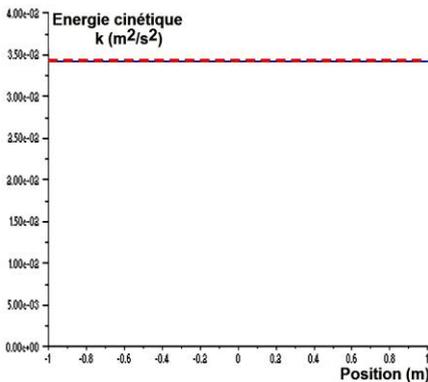


Fig. 15: Contours de turbulence

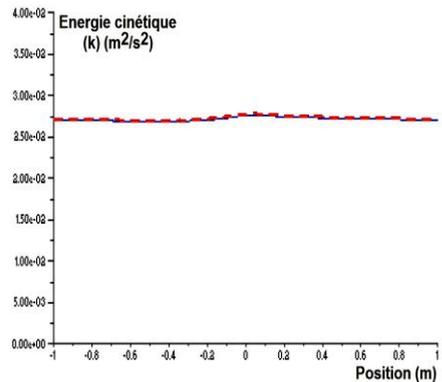
Autour de la pale, les profils de (k) montrent un pic de turbulence dans la couche limite. Cette turbulence est générée par le cisaillement dans la couche limite. Dans le cas 3D, en aval du générateur (GV), la turbulence sur l'extrados est plus intense que celle donnée par la solution sans générateur (GV).

Il est intéressant de noter que dans le sillage, à $x = 3C/2$ m et $x = 2C$ m, les courbes de (k) présentent deux pics. Ils sont le résultat d'une production locale de turbulence au niveau des deux couches de cisaillement caractérisant le sillage.

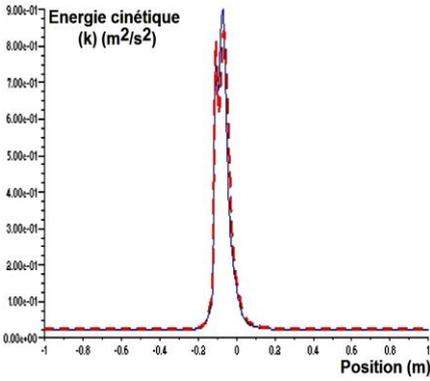
Remarque (Fig. 16): la ligne est en couleur 'rouge', la ligne en coupe est celle du générateur (GV).



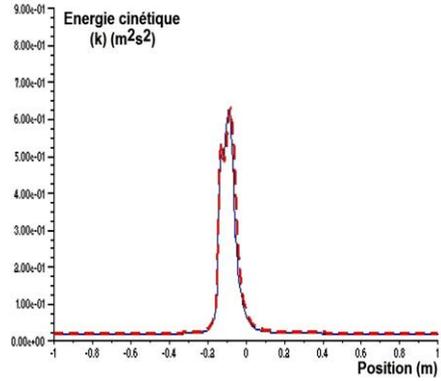
Comparaison sur la ligne (X=-2C)



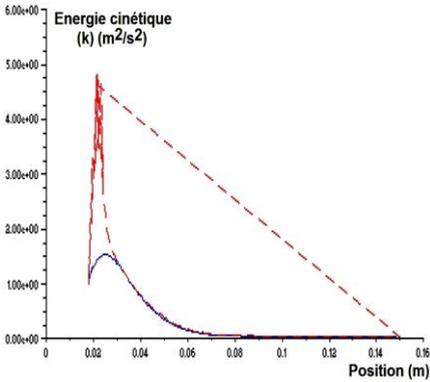
Comparaison sur la ligne (X=-C/2)



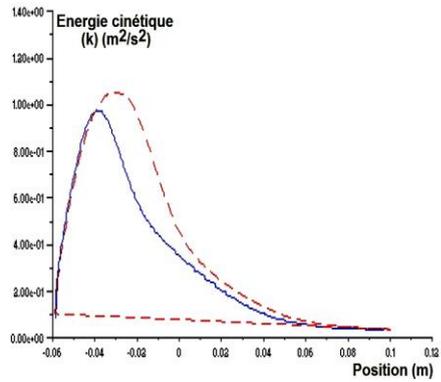
Comparaison sur la ligne ($X=3C/2$)



Comparaison sur la ligne ($X=2C$)



Comparaison sur la ligne ($X=C/7$)



Comparaison sur la ligne ($X=C/7$)

Fig. 16: Profils de turbulence

4.4 Résultats finaux

La figure 17 expose la trajectoire de particules démarrant de l'entrée du domaine à partir de points donnés. Les particules qui passent près du générateur de vortex ont une trajectoire déformée légèrement.

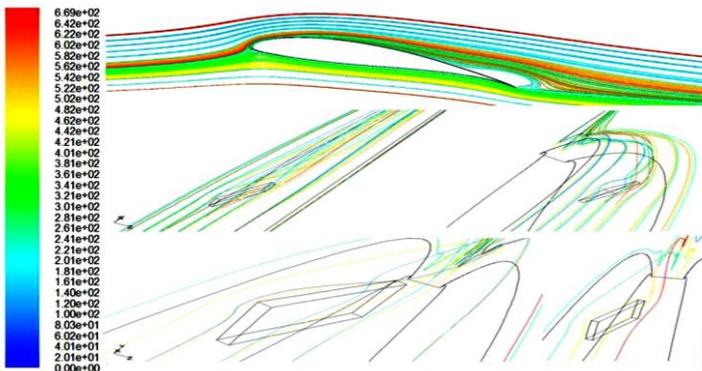


Fig. 17: Trajectoire de particules

En fait, ils sont aspirés par le vortex. Cependant comme la composante de vitesse longitudinale est beaucoup plus importante que les autres composantes, la visualisation du tourbillonnement n'est pas très nette.

La figure 18 compare les variations de ce paramètre obtenu dans les cas avec générateur (GV) à $z = 0$ et à $z = Z$ et dans le cas 2D sans générateur (GV).

Rappelons que $C_p = (p_{abs} - p_{atm}) / 1/2 \rho \cdot V^2 = p_{eff} / 1/2 \rho \cdot V^2$, où V , est la vitesse du vent dans l'écoulement libre loin de la pale. Les valeurs minimales sont localisées sur l'extrados, là où les vitesses les plus élevées ont été atteintes, juste en aval du point d'arrêt, au bord d'attaque.

Le maximum du coefficient de pression (C_p) est localisé au point de stagnation où l'énergie cinétique du fluide loin à l'amont s'est transformée en une énergie de pression. L'effet du générateur vortex (GV) est une perturbation de la variation du coefficient de pression dans cette zone.

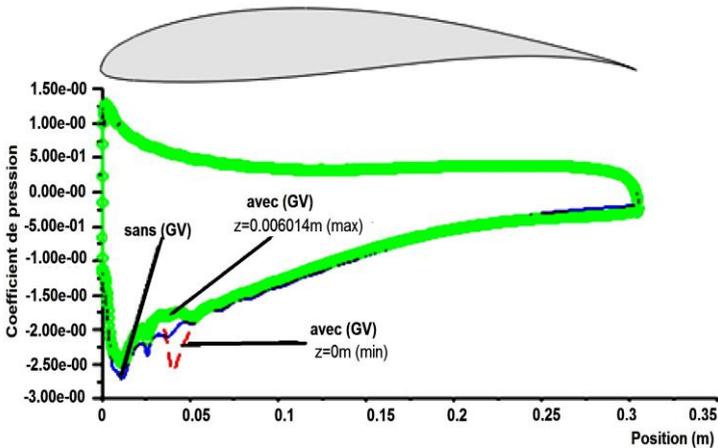


Fig. 18: Profils de comparaison du coefficient de pression (C_p) pour le profil avec générateur de vortex (GV) et sans générateur (GV)

L'étude paramétrique qui a été réalisée, à laquelle beaucoup de temps a été consacré. Le but est de voir l'effet de l'angle d'incidence (10° , 12° , 13° , 14° , 16° , 18° et 20°) et de la position des générateurs (GV) ($10\%C$, $30\%C$) sur les forces de portance et de traînée.

Il est à noter que l'obtention de chaque paire de valeurs, force de portance et force de traînée, a nécessité une exécution du code de calcul jusqu'à la convergence de la solution.

Une augmentation de l'angle d'incidence résulte en une augmentation de la portance, ce qui est bénéfique, mais aussi de la traînée, ce qui est néfaste.

C'est une situation qui peut être intéressante dans le cas des éoliennes, puisqu'un accroissement de la force de portance devrait entraîner un accroissement de la vitesse de rotation des pales.

Les résultats du présent travail montrent que pour l'angle d'incidence de 10° , jusqu'à 14° , le profil sans générateur (GV) donne une force de portance plus importante, alors que pour les angles 16° et plus, le profil avec le générateur GV est plus performant, et particulièrement la position 30% .

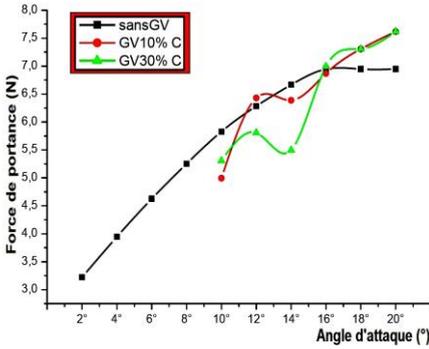


Fig. 19: Forces de portance en fonction de l'angle d'attaque

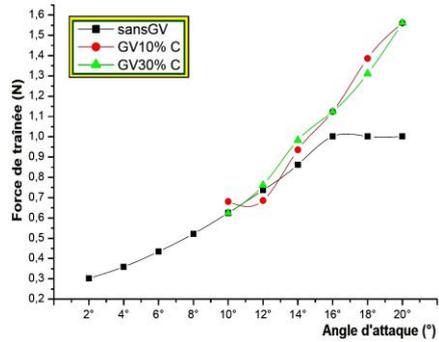


Fig. 20: Forces de traînée en fonction de l'angle d'attaque

5. CONCLUSION

Dans ce travail, une étude numérique a été faite pour simuler l'écoulement d'un air turbulent, tridimensionnel, supposé stationnaire, autour du profil d'une pale d'éolienne urbaine 'FX-63-137' sur laquelle sont montés des générateurs de vortex rectangulaires. Le nombre de Reynolds est égal à 10^5 .

Les effets de la turbulence ont été pris en compte avec le modèle $(k-\epsilon)$. Une étude paramétrique a été réalisée où l'angle d'incidence et la position des générateurs (GV) sont variables pour examiner leur influence sur les forces de portance et de traînée.

L'étude de l'écoulement pour un angle d'incidence fixe (14°) et une position de générateurs (GV) donnée à 10 % de la corde à partir du bord d'attaque a permis une meilleure compréhension des phénomènes physiques caractéristiques.

La comparaison entre les solutions 2D et 3D a pu faire apparaître l'effet du montage des générateurs (GV) sur le comportement aérodynamique de l'air autour du profil, en particulier sur les champs de vitesse de pression d'énergie turbulente, et aussi des variations des coefficients de pression et de frottement le long de l'intrados et l'extrados.

L'existence d'un vortex généré juste en aval du générateur (GV) est mise en évidence par des illustrations claires de contours de vitesses et des champs de vecteurs de vitesse. Il a été trouvé qu'une augmentation de l'angle d'incidence résulte en une augmentation de la force de portance, mais aussi de la traînée.

Les résultats de ce présent travail montrent que pour des angles d'incidence jusqu'à 14° , le profil sans générateur (GV) donne une force de portance plus alors que pour les angles 16° et plus, le profil avec générateurs (GV) est plus performant, et particulièrement la position 30 %.

NOMENCLATURE

C , Corde, m	C_μ , Constante liée à la viscosité turbulente
$C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, Constantes empiriques dans le modèle $[k-\epsilon]$	G_k , Production de l'énergie cinétique turbulente, $kg/m.s^3$
e , Epaisseur, m	H , Hauteur du générateur de vortex, m
k , Energie cinétique turbulente, m^2/s^2	L , Hauteur du générateur de vortex, m
Re , Nombre de Reynolds	S' , Distance entre deux (GV) opposés, m

\bar{U}_i , Composante de vitesse moyenné selon 'x'	α , Angle de rotation du (GV) selon '-y', (°)
U_i , Composante de vitesse suivant 'x', m/s	U_j , Composante de vitesse suivant 'y', m/s
α' , Angle d'attaque, (°)	τ_p , Contrainte de cisaillement, Pa
β , Angle de rotation du (GV) suivant 'z', m/s	ε , Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente, m^2/s^3
δ_{ij} , Tenseur du taux de déformation, 1/s	ε_{ij} , Tension du taux de dissipation, m^2/s^3
κ , Constante de Van Karman	μ , Viscosité dynamique, kg/m.s
μ_t , Viscosité dynamique turbulente, kg/m.s	ρ , Masse volumique, kg/m^3

REFERENCES

- [1] S. Balibar, 'Les Sources d'Energie du 21^{ème} Siècle', 594^{ème} Conférence de l'Université de Tous Les Savoirs, 2005.
- [2] A.A. Afjeh, A. Fateh, T.G. Keith, 'Predicted Aerodynamic Performance of a Horizontal-Axis Wind Turbine Equipped with Vortex Generators', Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 33, N°3, pp. 515 - 529, 2012.
- [3] D. Lengani, D. Simoni, M. Ubaldi, P. Zunino and F. Bertini, 'Turbulent Boundary Layer Separation Control and Loss Evaluation of Low Profile Vortex Generators', Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 35, N°8, pp. 1505 - 1513, 1990.
- [4] G. Godard and M. Stanislas, 'Optimization of Passive Vortex Generators', Aerospace Science and Technology, Vol. 10, N°3, pp. 181 - 191, 2006.
- [5] H. Mueller-Wahl, G. Pechlivanoglou, C.N. Nayeri and C.O. Paschereit, 'Vortex Generators for Wind Turbine Blades: A Combined Wind Tunnel and Wind Turbine Parametric Study', Proceedings of ASME Turbo Expo, Vol. 6, pp. 899 - 914, 2012
- [6] T.K. Zhen, M. Zubair and K.A. Ahmad, 'Experimental and Numerical Investigation of the Effects of Passive Vortex Generators on Aludra UAV Performance'; Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 24, N°5, pp. 577 - 583, 2011.
- [7] H Tebbiche and M.S. Boutoudj, 'Aerodynamic Drag Reduction by Turbulent Flow Control with Vortex Generators', International Symposium on Aircraft Materials - ACMA 2014 - Marrakech - Morocco; April 23-26, 2014
- [8] A. Benhacine, 'Contribution à l'Etude des Jets Impactant Turbulents Présentant une Courbure des Lignes de Courant plus ou moins Faible', Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2012.
- [9] S. Patankar, 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow', Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.