

## Simulation Numérique de l'Écoulement Instationnaire 3D autour d'une Pale d'un Rotor Eolien- Rutland 503

Belkheir NOURA<sup>1</sup>, Ivan DOBREV<sup>2</sup>, Sofiane KHELLADI<sup>2</sup>, Rabah DIZENE<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Centre universitaire de Khemis- Miliana, Ain -Defla, Algérie.

<sup>2</sup>Arts et Métiers Paris Tech, 151, Boulevard de l'Hôpital 75013 Paris, France

<sup>3</sup>USTHB, PO Box 32 El Alia, Alger, Algérie.

[nourabelhadj@yahoo.fr](mailto:nourabelhadj@yahoo.fr)

**Résumé :** Cet article présente une modélisation de l'écoulement instationnaire autour d'une pale d'une éolienne à axe horizontal et tripale nommé Rutland 503. l'approche Detached Eddy Simulation (DES) basée sur les équations de Navier Stokes avec le modèle de turbulence K- $\omega$  SST est utilisé. une approche de maillage multi bloc structuré est utilisé également. Les simulations sont faites pour des vitesses de vent modérée et forte. une analyse des résultats de la simulation numérique en trois dimensions du champ d'écoulement instationnaire autour sont présentés. Dans les conditions de vent fort, des zones de décollement appréciables sont présentes et l'écoulement est fortement instationnaire. Les résultats des simulations obtenues sont comparés avec les données expérimentales en vue d'une validation.

**Mots clés :** pale éolienne, modélisation 3 D, écoulement instationnaire, DES .

### 1. Introduction

Les éoliennes à axe horizontal offrent la promesse d'une énergie propre et bon marché, mais la prédiction de leurs propriétés aérodynamiques est difficile. Cependant, ces propriétés d'écoulement en trois dimensions autour de la pale en rotation sont un élément essentiel pour toute simulation de l'aérodynamique ou aéroacoustique d'une éolienne. L'écoulement tridimensionnel autour des pales peut être très différent de l'écoulement sur une aile. Les pales en rotation peuvent avoir une envergure significative et un écoulement radial [1]. Evidement la vitesse de la pale varie linéairement du pied au bout de pale. En plus, le sillage en trois dimensions d'une pale en rotation peut rester à proximité de la pale pour une longue durée dans le temps par rapport au sillage d'une aile[2]. Dans les conditions de vent fort, des zones de décollement appréciables sont présentes et l'écoulement est fortement instationnaire.

Dans cette article on modélise l'écoulement 3D autour d'une pale d'éolienne tripale nommé Rutland 503 en utilisant l'approche DES (detached eddy simulation) basée sur les équations de Navier Stokes avec le modèle de turbulence SST. Une approche de maillage multi bloc structuré est utilisée. Les solutions sont obtenues en utilisant le solveur Fluent [3] qui utilise la méthode des volumes finis. Les simulations sont faites pour des vitesses de vent modéré et fort. Nous avons fait varier la vitesse du vent de 9.3m/s à 15m/s. Le but de ces simulations numériques est d'obtenir des informations concernant le champ de vitesse autour de la pale afin de calculer ses propriétés aérodynamiques lorsque la vitesse du vent devient forte. Les résultats des simulations obtenues sont comparés avec les données expérimentales de I. Dobrev [4] pour une vitesse de 9.3m/s en vue d'une validation.

### 2. procédure numérique

La pale du rotor modélisé est une pale d'un rotor réel d'une éolienne à axe horizontal commerciale Rutland 503 de la Société Marlec. Ce rotor a été modifié pour les essais au laboratoire d'aérodynamique LMF de l'ENSAM paris Tech. La version d'origine avait 6 pales, mais trois pales et le carnage du moyeu ont été ôtés. La figure 1 représente cette éolienne tripale semblable aux éoliennes utilisées dans les fermes éoliennes, positionnée

dans la soufflerie de l'ENSAM. La corde de la pale du rotor change de dimension du pied jusqu'au bout. Les pales ne sont pas vrillées et sont montés dans un angle de calage constant de  $10^\circ$ .

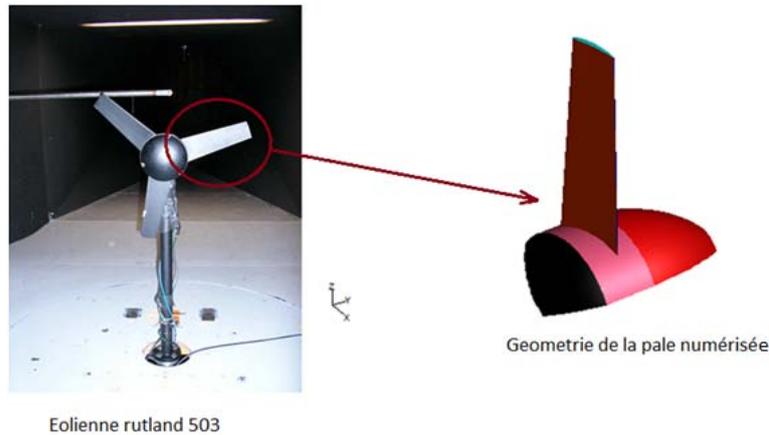


Figure 1 : éolienne Rutland 503 dans la veine d'essai de la soufflerie de l'ENSAM Paris-Tech.

Le tableau 1 présente les paramètres géométriques du rotor Rutland servant de base à la présente étude. Ces paramètres ont été repris fidèlement et numérisés pour une pale avec le moyeu du rotor. Cette géométrie de la pale numérisée (Fig.1) a été utilisée afin de générer les volumes fluides qui constituent les différents domaines de calcul.

Description	Valeur
Nombre de pales	3
Angle de calage	$10^\circ$
Corde du pied de la pale	6.8 cm
Corde du bout de la pale	4.8 cm
Diamètre moyeu	13.5 cm
Diamètre extérieur	500 mm

Tableau 1 : caractéristiques du rotor éolien Rutland 503

### 2.1. Génération du maillage

Pour tenir compte de la rotation de la pale du rotor, le champ d'écoulement est divisé entre deux zones de maillage distinctes; un domaine fluide externe qui représente le vent du tunnel et l'autre domaine fluide interne représente le rotor de la turbine. Par conséquent, le domaine de calcul est constitué en regroupant le maillage de deux domaines. La figure 2 représente les deux volumes fluides. La géométrie du domaine fluide interne et externe représente  $1/3$  d'un cylindre de diamètre égal à  $8$  le rayon  $R$  du rotor éolien. Les dimensions du volume fluide externe à un diamètre égal à  $4.5 R$  et une longueur de  $11R$ . Ce volume est constitué de  $7$  sous domaines répartie sur toute la longueur. Les dimensions du domaine de rotation qui le domaine fluide interne a un diamètre égale à  $1.5 R$  et une longueur de  $11R$ . Ce dernier est constitué de  $70$  sous domaines.

Ces dimensions ont été choisies pour avoir des domaines d'étude très adapté qui tiennent compte de l'effet des parois et permettent de capturer lors de la simulation numérique toutes les interactions de la pale rotor avec l'écoulement sain, comme le sillage de la pale du rotor de ces tourbillons marginaux. Les géométries des domaines de calcul définis ci-dessus ont été utilisées pour la génération d'un maillage structuré. La pale est divisée en sens la direction de la corde à  $90$  intervalles, qui sont légèrement raffinée près des bords avant et arrière, où le gradient de vitesse est la plus forte. En direction de sens de l'envergure la pale est divisée en  $90$  intervalles également espacés.

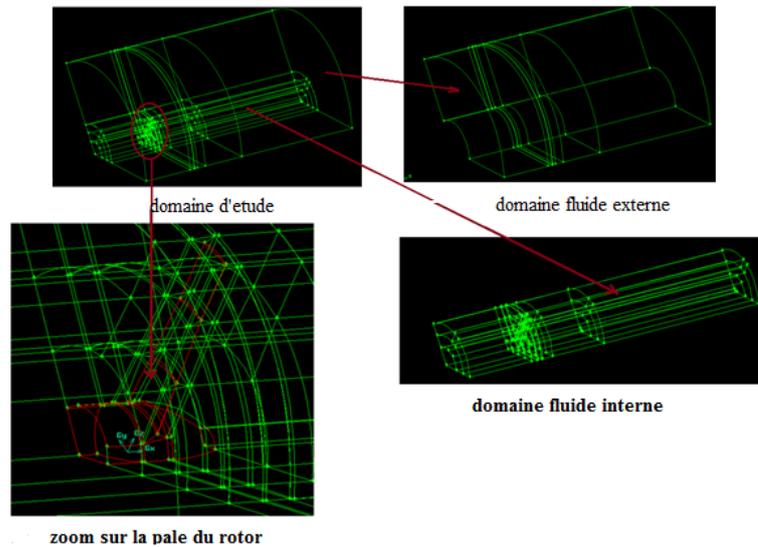


Figure 2 : domaine d'étude

Les géométries des domaines de calcul définis ci-dessus ont été utilisées pour la génération d'un maillage structuré. La pale est divisé en sens la direction de la corde à 90 intervalles, qui sont légèrement raffinée près des bords avant et arrière, où le gradient de vitesse est la plus forte. En direction de sens de l'envergure la pale est divisée en 90 intervalles également espacés. Afin d'améliorer le maillage de la couche limite, 10 couches de mailles dans le voisinage des parois des pales sont utilisées. Ici, la taille initiale des mailles dans le sens normal est de 0,15 pour cent des longueurs de corde et le facteur de croissance de 1,25 est utilisé. Totalemment 3.5 millions d'éléments hexaèdres sont utilisés dans la zone du maillage de la pale. Le nombre de nœuds est de 4 millions. Le maillage adopté pour les calculs est donné sur les figures 3.

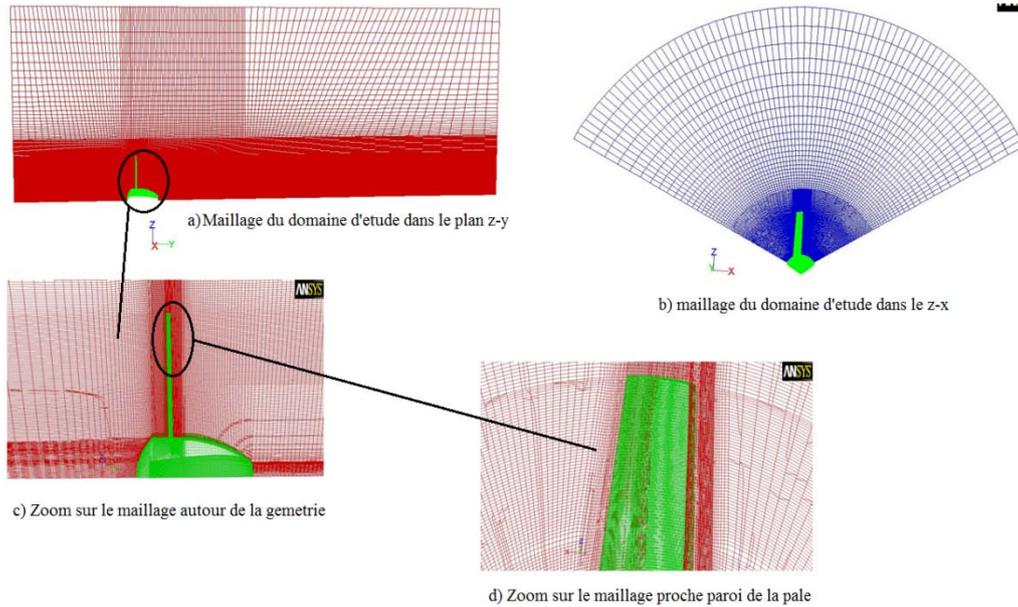


Figure 3 : Maillage du domaine d'étude

La valeur moyenne de l' $y^+$  autour des parois qui constituent la pale ne dépasse pas la valeur de 30. Ces valeurs d' $y^+$  indiquent que la résolution du maillage près des parois est bonne[3]. L'approche utilisée pour définir l'interface entre les deux repères et tenir compte de leur déplacement relatif « Frozen Rotor ». Cette technique permet de modéliser l'écoulement pour une position relative donnée entre la rotor et le reste du domaine d'étude [3].

## 2.2. Calcul numérique et paramètres de simulation

La résolution des équations de Navier-Stokes est faite par Le code Fluent utilisant la méthode des volumes finis. Les termes de diffusion des équations sont discrétisés par un schéma upwind du deuxième ordre. Le couplage vitesse pression est basé sur l'algorithme Simple. Le système d'équations ainsi discrétisé est résolu par la méthode itérative de Green-Gauss. Le modèle de turbulence que nous avons utilisé dans le cadre de cette étude est le modèle SST développé par Menter [5,6]. Ce modèle a été adopté dans notre application afin de tenir compte des effets de rotation et de courbure, ainsi que le phénomène de décollement de couche limite qui peut se produire.

La principale caractéristique de la DES utilisé dans cette étude est que le modèle de turbulence SST sert comme pour la méthode URANS dans les régions proche de la paroi [7].

Les paramètres adoptés sont des conditions aux limites de vitesse à l'entrée et de pression à la sortie du rotor. Cette combinaison de conditions aux limites est physiquement justifiable. En effet, l'éolienne étudiée est destinée à recevoir de l'air à la pression atmosphérique. Deux configurations d'écoulements avec différentes vitesses du vent sont étudiés: 9.3 m/s et 15 m/s. Le domaine de la pale rotor en rotation simule le rotor est considérée comme une paroi en rotation de 1200 tr/min.

## 3. Résultats et analyse de l'écoulement autour de la pale

Pour analyser la répartition de la vitesse l'écoulement le long de la pale, nous allons décomposer la structure en plusieurs parties classées par rapport à leur distance moyenne au pied de pale. L'analyse se porte sur trois sections de pale 0.3R, 0.5R et 0.9R. La figure 4 représente le champ de vitesse axiale pour ces trois rayons différents le long de la pale. Les premières simulations sont réalisées pour un écoulement à une vitesse relativement faible. La vitesse de rotation du rotor choisi est de 1200 tr/min pour une vitesse de vent à l'amont constante de 9.3 m/s.

### 3.1. écoulement le long de la pale

Au rayon 0.3 R le plus proche du pied de la pale, ici l'angle d'incidence du profil varie plus et devient plus important par rapport aux rayons proches de l'extrémité de la pale. Sur la figure 4.a le champ de vitesse relative est représenté. L'angle d'incidence diminue avec l'augmentation de la vitesse de la rotation. Pour cette vitesses de rotation de 1200 tr/min, l'écoulement est partiellement décollé de l'extrados, le point de décollement est situé à peu près à 60% de la corde.

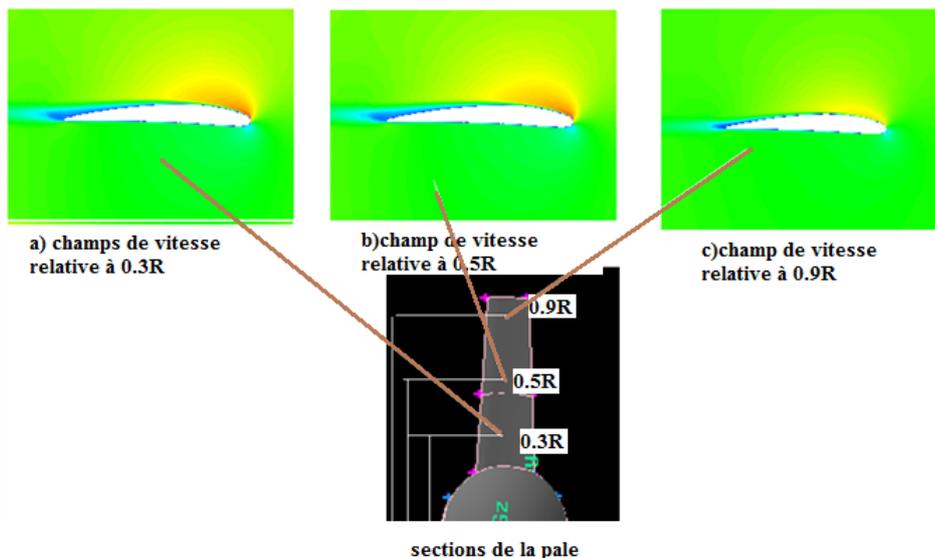


Figure 4 : champ de vitesse relative le long de la pale

Au rayon 0.5 R au milieu de la pale, l'écoulement prédit reste encore décollé sur plus de 50% de la corde alors que normalement le décollement devrait être moins que cette valeur. la figure 4.b représente ce champ de vitesse relative. Sur la figure 4.c est représenté le champ de vitesse relative de l'écoulement autour du profil placé à un rayon de  $R=0,9$  de la pale. Le décollement n'existe presque pas et il ne reste que le sillage visqueux.

On voit le ralentissement de l'écoulement dans le sillage dans lequel il existe des structures tourbillonnaires très intensives. Ces structures se forment dans la couche limite de l'intrados et de l'extrados du profil et se décrochent du bord de fuite l'une après l'autre. Par ailleurs, il faut noter qu'il est difficile de déterminer l'angle d'incidence de ces différentes sections de la pale parce que le problème de la vitesse de référence n'est pas facile à résoudre, qui sert à calculer l'angle d'incidence [4]. Il existe une différence très importante entre l'écoulement autour d'un profil isolé et l'écoulement autour d'un profil de pale de rotor. Dans le cas d'un rotor éolien, le fluide qui traverse le rotor est ralenti [8].

### 3.2. Influence de la variation de la vitesse du vent

La figure 5 représente une comparaison du champs de la vitesse relative en pied de la pale à 0.3 R lorsque la vitesse de l'écoulement passe de 9.3m/s à 15m/s et cela pour une vitesse de rotation de la pale de 1200tr/mn.

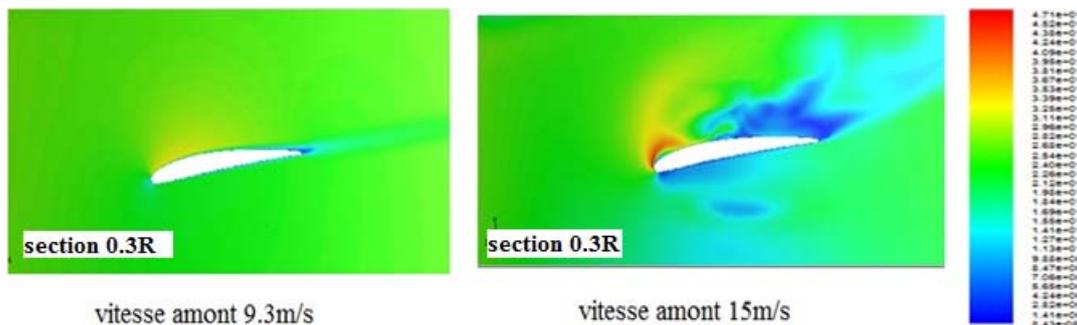


Figure 5 : champs de vitesse axial pour des vitesses amants

On constate clairement que l'écoulement est complètement décollé quand la vitesse du vent augmente en intensité. Les incidences vont augmenter sur toute la pale. Les sections pied de pale qui se trouvaient avec des incidences de l'angle de décrochage vont décrocher et perdre leurs caractéristiques aérodynamiques, les sections du bout de pale qui vont à leur tour atteindre des incidences de l'angle de décrochage. donc c'est toute la pale qui est en décrochage.

## 4. Comparaison des résultats numériques à l'expérimental

Sur la figure 6 sont représentés la comparaison du champ de vitesse relative adimensionnelle. C'est l'écoulement autour du profil placé à un rayon de  $R=0,7$  de la pale qui est représentatif pour l'intégralité de l'écoulement autour du rotor.

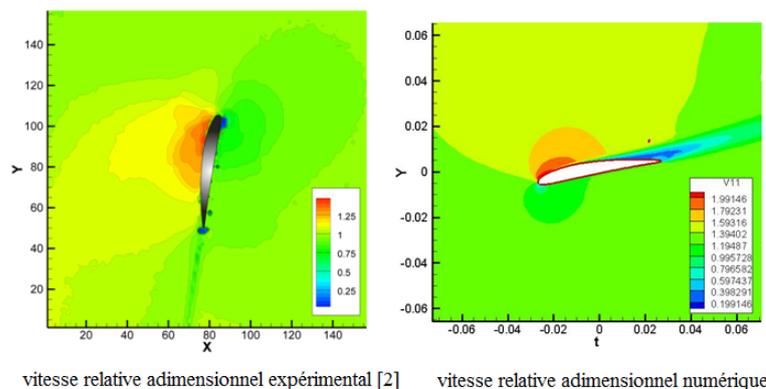


Figure 6: comparaison du champ de vitesse relative

Le décollement n'existe pas même pour la vitesse de rotation la plus faible pour les données expérimentales. Pourtant le sillage visqueux est toujours présent. Par contre le champ de vitesse prédit par le calcul présente un décollement à 0.25% du bord de fuite. A vitesse de rotation faible, l'angle d'incidence augmente et l'intensité des perturbations créée par le profil augmente.

## 5. Étude du sillage de la pale du rotor

Les simulations ont permis de visualiser les tourbillons marginaux émis de l'extrémité de la pale, la figure 6 illustre parfaitement le développement des tourbillons marginaux issus de la pale, ainsi que des tourbillons du moyeu. La ligne tourbillonnaire est très apparente.

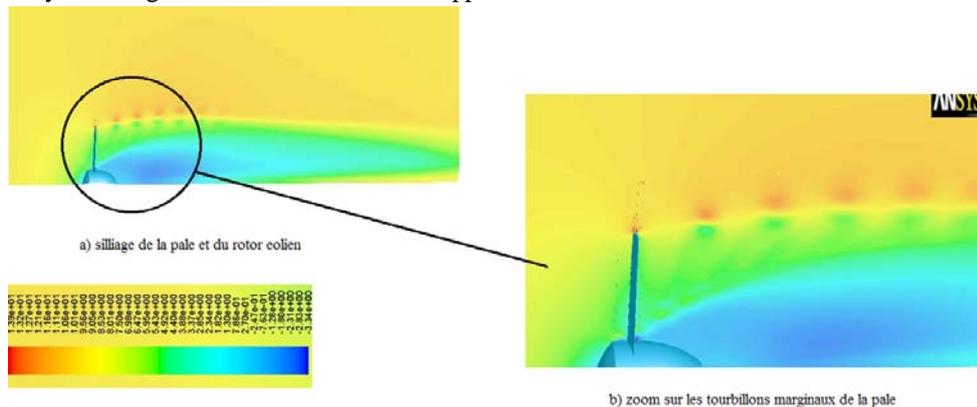


Figure 6 : sillage de la pale du rotor

On remarque également l'élargissement de la section du sillage en s'éloignant du plan de rotor dans le sens du vent. Le vent est accéléré par la composante axiale de la vitesse induite par les tourbillons. Le rayon du sillage tourbillonnaire augmente en aval de la pale suite au ralentissement de l'écoulement créé par la pale. Ce ralentissement est le résultat du fonctionnement de la pale, qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

## 6. Conclusion

Des résultats numériques de la modélisation de l'écoulement instationnaire autour de la pale du rotor de l'éolienne Rutland 503 ont été présentés et analysés. Ces résultats ont permis d'accéder à la morphologie de l'écoulement. L'analyse de ces résultats numériques confirme que le phénomène de décrochage est présent au pied de la pale pendant le fonctionnement normale de l'éolienne et on a un décrochage sur toute la pale si la vitesse du vent augmente en intensité.

L'approche DES a prédit avec succès le comportement de l'écoulement autour de la pale sous l'effet de la variation de la vitesse de rotation de l'éolienne. Egalement le calcul confirme une forme très complexe du sillage en aval de la pale. En effet, le moyeu est une source d'instationnarité très importante. Les tourbillons marginaux issus des extrémités des pales ne sont pas situés sur une surface cylindrique, comme le suppose la théorie tourbillonnaire linéaire. Ils se déplacent vers l'extérieur en augmentant le diamètre du tube.

Une compréhension améliorée de l'instationnarité l'environnement de l'éolienne aidera efficacement les ingénieurs d'éolienne à concevoir une structure de rotor pour augmenter de la vie et améliorer la capture de l'énergie sous condition de vent fort.

## References bibliographique

- [1] G. P. Corten "Flow Separation on Wind Turbine Blades" ISBN 90-393-2582-0 , NUGI 837, - Nederland 2001.
- [2] F. Massouh et al Exploration and numerical simulation of wind turbine wake; journal ISJAE 2007.
- [3] Fluent Inc., *Fluent 6.3 User's Guide*, Fluent Inc., Lebanon, NH, USA 2005.
- [4] I. Dobrev Thèse : Modèle hybride de surface active ENSAM Arts et Métiers ParisTech 2009.
- [5] F. R. Menter and M. Kuntz, Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model, In K. Hanjalic, Y. Nagano, editors, *Turbulence, Heat and Mass Transfer House Inc.*, 2003.
- [6] Benjanirat, S., Sankar, "Evaluation of Turbulence Models for the Prediction of Wind Turbine Aerodynamics," AIAA 2003-517, Nevada, January 6-9 2003.
- [7] L.S. Hedges, A.K Travin and P.R. Spalart "Detached-Eddy Simulations over a Simplified Landing Gear," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, pp. 413-423. (2002).
- [8] T. Burton et al "Wind Energy Handbook", Ltd, England 2001.