

Simulation numérique et validation expérimentale de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne de type S809

Numerical simulation and experimental validation of the air flow around S809 Airfoil for Wind Turbine Blade

Jaouad Smily¹, Bouchaib Radi², Ismaïl Sossey-Alaoui³

¹ Laboratoire IMII, FST Settat, Maroc, j.smily@uhp.ac.ma

² Laboratoire IMII, FST Settat, Maroc, bouchaib.radi@yahoo.fr

³ Département GMP-MI, EST Fès, Maroc, i.sosseyalaoui@gmail.com

RÉSUMÉ. L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisées par l'humanité. Aujourd'hui avec l'impact négatif de l'énergie fossile sur l'environnement, l'installation des parcs éoliens partout dans le monde connaît un essor considérable. Pour améliorer sa performance et sa fiabilité, une bonne modélisation de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne est très déterminante. Dans cet article une simulation numérique du profil aérodynamique S809 a été réalisé par ANSYS CFX en utilisant plusieurs modèles de turbulence et à différents angles d'attaque. Par la suite les coefficients de pression calculés sont comparés à des données expérimentales pour valider la précision de la simulation et choisir le modèle de turbulence adéquat.

ABSTRACT. Wind energy is one of the oldest sources of energy used by mankind. Today with the negative impact of fossil energy on the environment, the installation of wind farms all over the world is experiencing a considerable boom. To improve its performance and reliability, good modeling of the air flow around a wind turbine blade profile is very decisive. In this article, a numerical simulation of the S809 aerodynamic profile was performed by ANSYS CFX using several models of turbulence and at different angles of attack. Subsequently the calculated pressure coefficients are compared with experimental data to validate the simulation accuracy and choose the appropriate turbulence model.

MOTS-CLÉS. Énergie propre, Énergie éolienne, ANSYS CFX, CFD, Modèles de turbulence, Profil aérodynamique.

KEYWORDS. Clean energy, Wind energy, ANSYS CFX, CFD, Turbulence models, Airfoil.

1. Introduction

L'énergie du vent est exploitée depuis des milliers d'années. Les applications les plus anciennes de l'énergie éolienne comprennent l'extraction de l'eau des puits, la fabrication de farine à partir de céréales et d'autres applications agricoles. Récemment, l'utilisation de l'énergie éolienne a évolué principalement vers la production d'électricité. Vu l'impact négatif de l'énergie fossile sur l'environnement (gaz à effet de serre, changements climatiques, etc.), le basculement vers les énergies renouvelables devient de plus en plus une nécessité urgente.

En termes de production d'énergie, l'éolienne est l'une des ressources énergétiques renouvelables les plus prometteuses. Au Maroc à l'instar de plusieurs pays, a investi et il investit encore dans les énergies propres. Dans le cadre de sa stratégie énergétique, le Maroc s'est engagé dans un vaste programme éolien, pour accompagner le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique dans le pays. Le Projet Marocain Intégré de l'Energie Eolienne a permis au pays d'augmenter la part de l'énergie éolienne dans la capacité électrique totale à environ 14%.

Les éoliennes peuvent être divisées en deux groupes: éolienne à axe horizontal (HAWT) et éolienne à axe vertical (VAWT). Chaque type d'éolienne présente des avantages et des inconvénients. [SOS 18a]

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
HAWT	<ul style="list-style-type: none"> *Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical *Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol. *Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. 	<ul style="list-style-type: none"> *Coût de construction très élevé *L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
VAWT	<ul style="list-style-type: none"> *La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol. *Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor. *Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien. 	<ul style="list-style-type: none"> *Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. *La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief *Leurs implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour

Tableau 1. Avantages et inconvénients des HAWT ET VAWT

Dans ce papier, on va se limiter à l'étude des éoliennes à axe horizontal (HAWT) car elles représentent l'architecture la plus courante parmi les systèmes de conversion d'énergie éolienne existants, avec des milliers de MWs de nouvelle capacité installée chaque année dans le monde.



Figure 1. Eolienne à axe vertical (VAWT)



Figure 2. Eolienne à axe horizontal (HAWT)

2. Les éoliennes à axe horizontal (HAWT)

2.1. Description générale d'une HAWT

Les HAWT se composent de pales de rotor qui tournent autour d'un moyeu horizontal. Le moyeu est connecté à une boîte de vitesse et un générateur (des générateurs à entraînement direct sont également présents et rendent la boîte de vitesse inutile), qui sont situés à l'intérieur de la nacelle. La nacelle abrite des composants électriques et est montée sur le dessus de la tour. Le courant électrique est ensuite distribué par un transformateur au réseau. Beaucoup de conceptions sont en usage. Les plus courantes sont à deux ou trois pales .

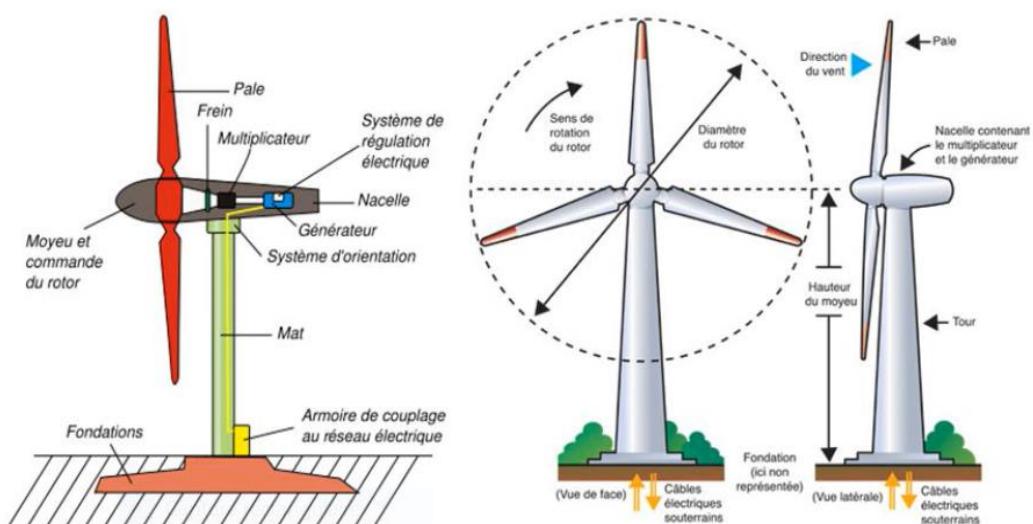


Figure 3. Composition d'une éolienne à axe horizontal (HAWT)

2.2. La pale de l'éolienne

Toutes les formes d'éoliennes sont conçues pour extraire la puissance d'un flux d'air en mouvement. Les pales ont une section aérodynamique et extraient le vent par une force de portance provoquée par une différence de pression entre l'extrados et l'intrados [AHL 05].

2.3. Le profil aérodynamique de la pale

Un profil aérodynamique est la forme en coupe d'une aile, d'une pale (d'une hélice, d'un rotor ou d'une turbine). La conception du profil aérodynamique est un aspect majeur de l'aérodynamique. Il existe divers profils aérodynamiques et en fonction du besoin et des contraintes de fabrication, on s'oriente vers un profil ou un autre.

La géométrie du profil aérodynamique est décrite avec une variété de termes :

- ✓ Le bord d'attaque : le point à l'avant du profil aérodynamique.
- ✓ Le bord de fuite : le point à l'arrière du profil aérodynamique.
- ✓ Extrados : la partie supérieure du profil.
- ✓ Intrados : la partie inférieure du profil.
- ✓ La corde : la ligne droite reliant les bords d'attaque et de fuite. La longueur de la corde ou tout simplement la corde notée c est la dimension de référence de la section de profil aérodynamique.
- ✓ La ligne de cambrure ou ligne moyenne est le lieu des points à mi-chemin entre extrados et l'intrados. Sa forme dépend de la distribution d'épaisseur le long de la corde.
- ✓ L'épaisseur maximale est la distance maximale entre l'intrados et l'extrados. On obtient l'épaisseur relative (en %) en faisant le rapport de l'épaisseur maximale et de la corde.

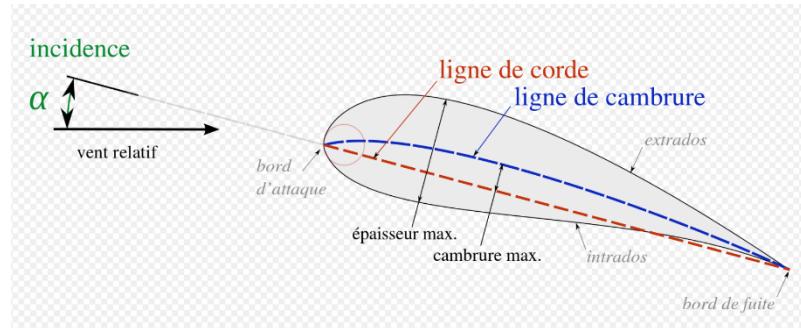


Figure 4. Géométrie du profil aérodynamique

3. Etude expérimentale

3.1. Profil S809

Le profil aérodynamique traité dans cette étude est le profil S809 de 21% d'épaisseur couramment utilisé dans les éoliennes à axe horizontal. Ce choix est aussi justifié par la disponibilité de résultats expérimentaux. La figure 5 illustre ce profil.

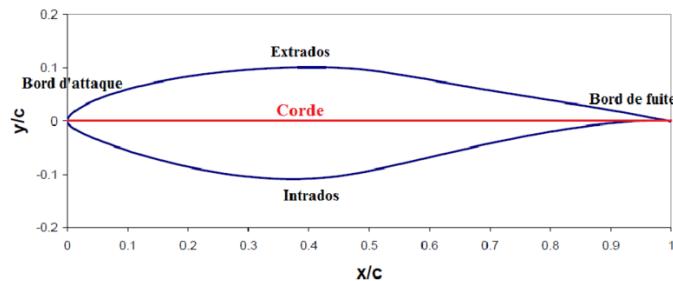


Figure 5. Représentation du profil de type S809

3.2. Conditions expérimentales

La soufflerie faible turbulence de l'université Delft a pour section d'essai 1.8×1.25 m. Le modèle S809 utilisé dans l'expérience avait une corde de 600 mm et une envergure de 1248 mm. Le coefficient de pression est mesuré pour différents angles d'attaque avec un nombre de Reynolds égal à 2.10^6 .



Figure 6. La soufflerie faible turbulence de l'université Delft

4. Simulation numérique

4.1. Équations de Navier stokes

La mécanique des fluides est régie au plan macroscopique par les équations de Navier-Stokes. Ces équations sont des équations différentielles non linéaires couplées dans un système et ne pourraient être résolues analytiquement que pour des cas particuliers tels que l'écoulement unidimensionnel autour de la plaque plane. Par conséquent, ce système d'équations est résolu numériquement pour les cas généraux. Les équations de Navier-Stokes « complètes » sont en nombre de cinq : une équation de conservation de la masse, trois équations de conservation de quantité de mouvement et une équation de conservation de l'énergie. Pour résoudre ces équations de Navier-Stokes originales instables, on fait appel à des modèles de turbulence qui introduisent des quantités moyennes et fluctuantes pour produire des équations Navier-Stokes moyennés (RANS).

4.2. Les modèles de turbulence

La gamme de modèles de turbulence utilisée aujourd'hui varie d'équations algébriques simples aux modèles de turbulence avec équations différentielles de 2^{ème} ordre [SOS 18b] :

- Le modèle d'écoulement purement laminaire, dans lequel les contraintes de Reynolds disparaissent.
- Les modèles turbulents qui remplacent les tensions de Reynolds par une viscosité turbulente :

- ✓ Le modèle de fermeture à une équation de transport, la viscosité turbulente est calculée en utilisant une équation différentielle pour le transport de l'énergie cinétique turbulente. Le modèle Spalart-Allmaras est un représentant typique.
- ✓ Le modèle de fermeture à deux équations de transport, la viscosité turbulente est déterminée à partir de deux équations différentielles. Cela inclut actuellement pour les applications industrielles couramment utilisés $k-\varepsilon$, $k-\omega$ et le modèle SST basé sur le transport des contraintes de cisaillement.
- Les modèles des tensions de Reynolds, qui calculent les différentes composantes du tenseur de Reynolds et tenir compte de l'anisotropie de la turbulence.
- Les modèles de simulation de turbulences qui distribuent à la moyenne de Reynolds et résoudre l'équation de Navier-Stokes complète transitoire, telles que les modèles simulation de larges tourbillons LES, simulation de tourbillons détachés DES et simulation numérique directe DNS.

La précision de la solution numérique augmente avec l'augmentation de la complexité des modèles de turbulence. Cependant, le temps de calcul augmente considérablement, en particulier si elles ont besoin d'un réseau de calcul très fin.

4.3. Modélisation sur ANSYS/CFX

Pour modéliser et simuler les écoulements ,on utilise des logiciels CFD. Tous ces logiciels ont trois étapes de simulation : le pré-processeur, le solveur et le post-processeur. Dans notre cas d'étude nous allons utilisé le logiciel ANSYS/CFX.

Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS/CFX se fait en trois étapes :

- 1- CFX-Pre où l'on met en place le maillage, on choisi le mode, le modèle, etc.
- 2- CFX-Solver qui résout les équations et affiche les différents résidus à chaque itérations.
- 3- CFX-Post où l'on exploite les résultats.

4.4. Entrées de la simulation

Les simulations sont effectuées avec l'air à 25°C, et avec un nombre de Reynolds de 2.10^6 . Puisque $Re = \frac{\nu \cdot L}{\vartheta}$ avec $L=c=0,6$ m (La corde du profil utilisé dans l'expérience), la vitesse du vent calculée est de :

$$\nu = \frac{2.10^6 \cdot 1,545 \cdot 10^{-5} (m^2/s)}{0,6 (m)}$$

$$\nu = 51,5 \text{ } m^2/s$$

Pour chaque angle d'attaque α , on lance la simulation avec les trois modèles de turbulence $k-\varepsilon$, $k-\omega$ et SST, et on trace le coefficient de pression C_p pour le comparer avec les résultats expérimentaux.

La figure 7 résume les conditions aux limites utilisées dans la simulation et la figure 8 représente le maillage appliqué. Le maillage est un facteur important pour la précision, le temps de calcul et la robustesse d'une simulation numérique. Il doit répondre surtout à la résolution des régions présentant un fort gradient, notamment aux niveaux des couches limites et des zones à écoulement turbulent. Le maillage utilisé est un maillage de 9999 éléments et 4000 nœuds, un raffinement du maillage autour de la surface du profil aérodynamique est réalisé pour capturer le gradient de pression avec précision au niveau de la couche limite.

Domain	Boundaries	
Default Domain		Boundary - INLET
Type	INLET	
Location	INPUT	
Settings		
Flow Regime	Subsonic	
Mass And Momentum	Cartesian Velocity Components	
U	vitesse*cos(ALPHA)	
V	vitesse*sin(ALPHA)	
W	0.0000e+0 [m s^-1]	
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio	
Boundary - INTER PERIODIQUE Side 1		
Type	INTERFACE	
Location	PERIOD HAUT	
Settings		
Mass And Momentum	Conservative Interface Flux	
Turbulence	Conservative Interface Flux	
Boundary - INTER PERIODIQUE Side 2		
Type	INTERFACE	
Location	PERIOD BAS	
Settings		
Mass And Momentum	Conservative Interface Flux	
Turbulence	Conservative Interface Flux	
Boundary - OUTLET		
Type	OUTLET	
Location	OUTPUT	
Settings		
Flow Regime	Subsonic	
Mass And Momentum	Average Static Pressure	
Pressure Profile Blend	5.0000e-2	
Relative Pressure	0.0000e+0 [Pa]	
Pressure Averaging	Average Over Whole Outlet	
Boundary - SYM		
Type	SYMMETRY	
Location	SYM ARRIERE, SYM AVANT	
Settings		
Boundary - PROFIL		
Type	WALL	
Location	PROFIL	
Settings		
Mass And Momentum	No Slip Wall	
Wall Roughness	Smooth Wall	

Figure 7. Les conditions aux limites de la simulation

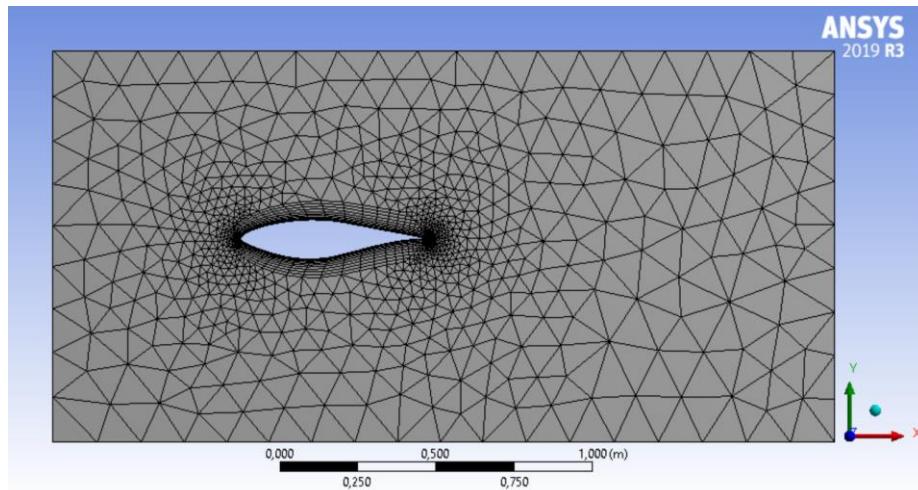


Figure 8. Maillage fluide

4.5. Résultats et discussions

Les variations de pression sur la surface du profil aérodynamique S809 aux angles d'attaque de 1,02° ; 4,1° ; 14,24° et 20,15° sont montrés dans les figures 9,10,11 et 12.

Tout d'abord on peut observer que les courbes C_p des trois modèles de turbulence $k-\omega$, $k-\epsilon$ et SST sont confondues pour les différents angles d'attaque utilisés.

Pour $\alpha=1,02^\circ$, les trois modèles semblent bien prédire la distribution de pression. Les courbes Cp des valeurs calculées et mesurées présentent presque la même allure, avec une erreur qui ne dépasse pas les 12 % pour la plupart des points.

Pour les angles $4,1^\circ$; $14,24^\circ$ et $20,15^\circ$ pour l'intrados (représenté par la partie supérieure des courbes) les modèles semblent plus ou moins bien prédire le coefficient de pression, les courbes des Cp calculés et mesurés ont presque la même allure. Pour l'extrados (représenté par la partie inférieure des courbes) les modèles de turbulence semblent mal prédire la distribution de pression avec une erreur pouvant dépasser les 40% en quelques points. Grosso modo, ces trois modèles de turbulences peuvent donner des résultats acceptables pour la simulation et le calcul du Cp, si on raffine encore plus le maillage autour du profil on peut arriver à une réduction de l'erreur commise et donc à une amélioration des calculs mais il faut s'attendre à un temps de simulation plus important.

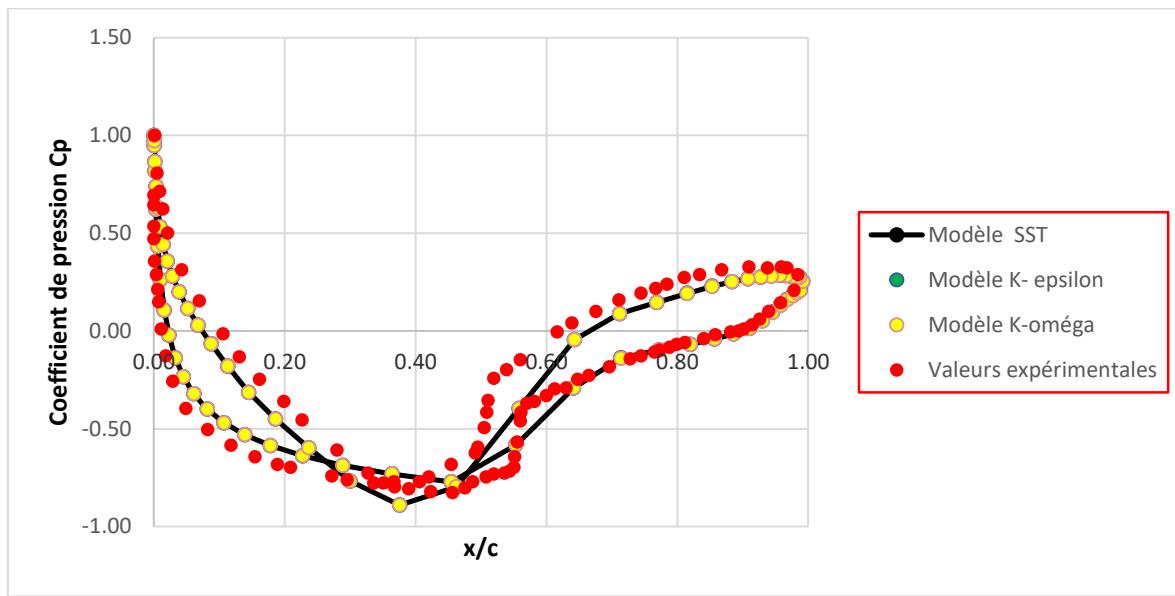


Figure 9. Coefficient de pression Cp en fonction du modèle de turbulence comparé aux valeurs expérimentales pour $\alpha = 1,02^\circ$

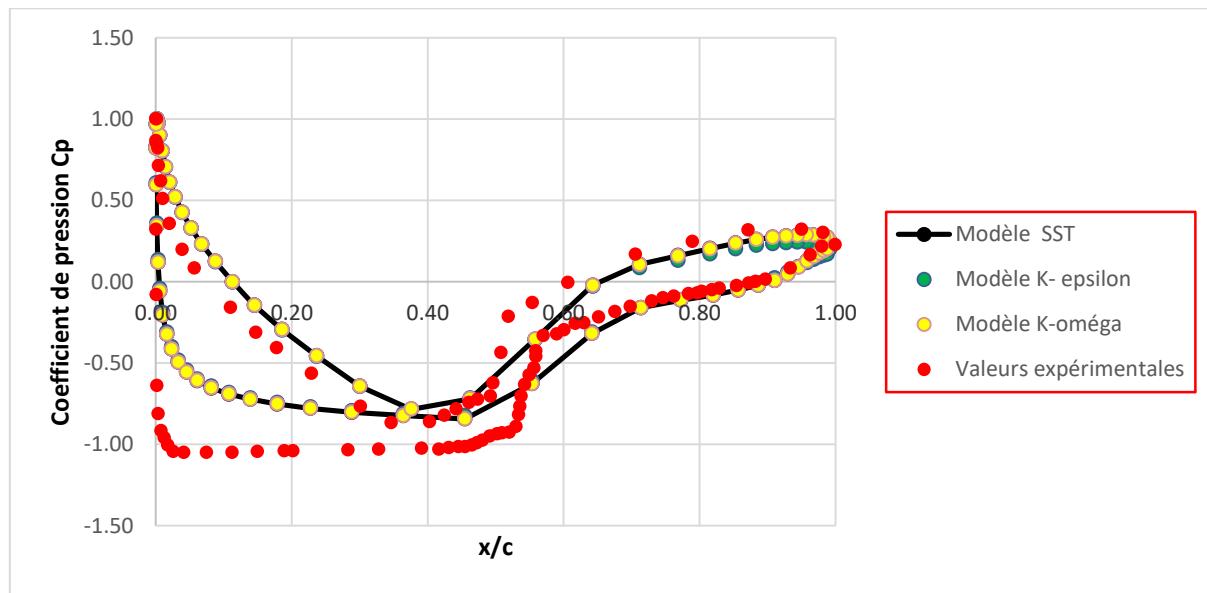


Figure 10. Coefficient de pression Cp en fonction du modèle de turbulence comparé aux valeurs expérimentales pour $\alpha = 4,1^\circ$

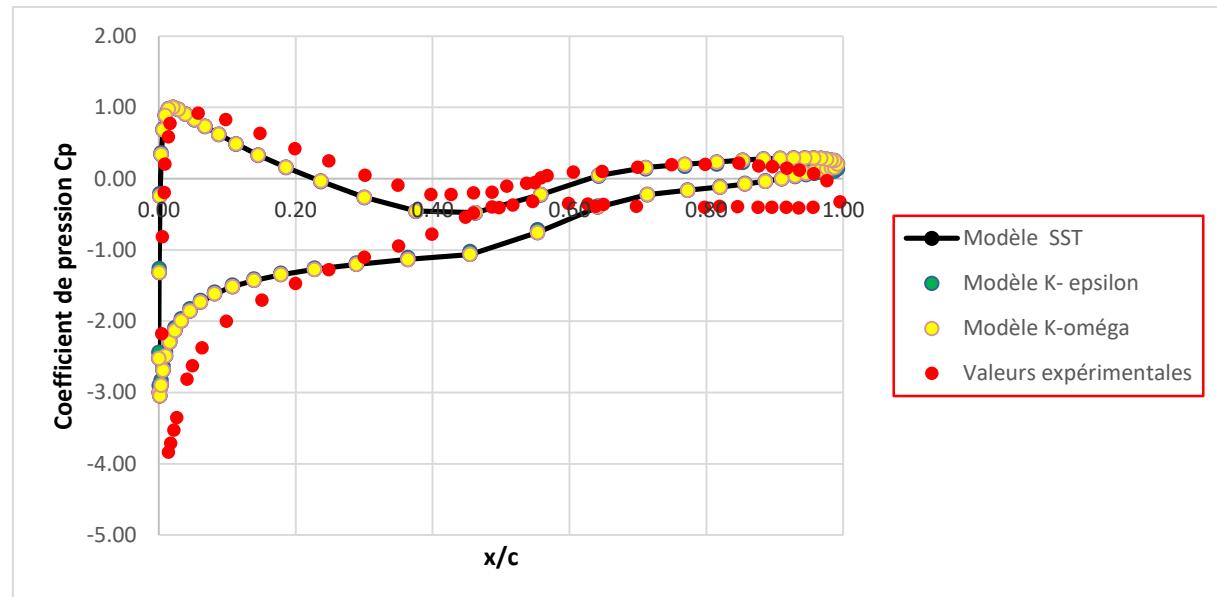


Figure 11. Coefficient de pression C_p en fonction du modèle de turbulence comparé aux valeurs expérimentales pour $\alpha = 14,24^\circ$

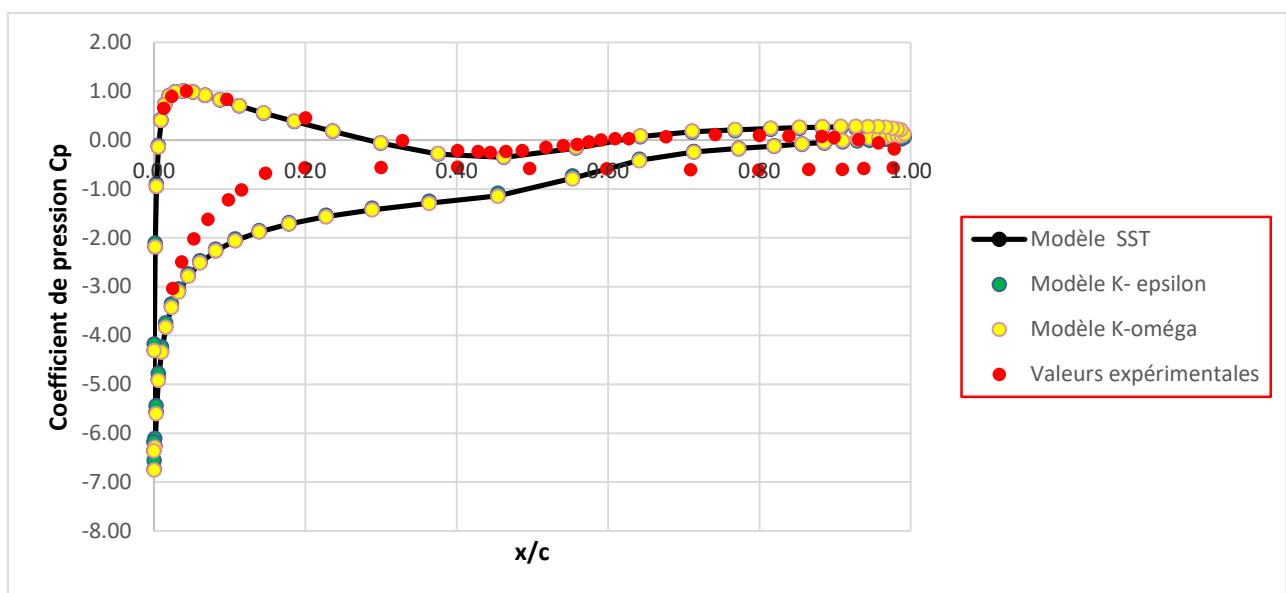


Figure 12. Coefficient de pression C_p en fonction du modèle de turbulence comparé aux valeurs expérimentales pour $\alpha = 20,15^\circ$

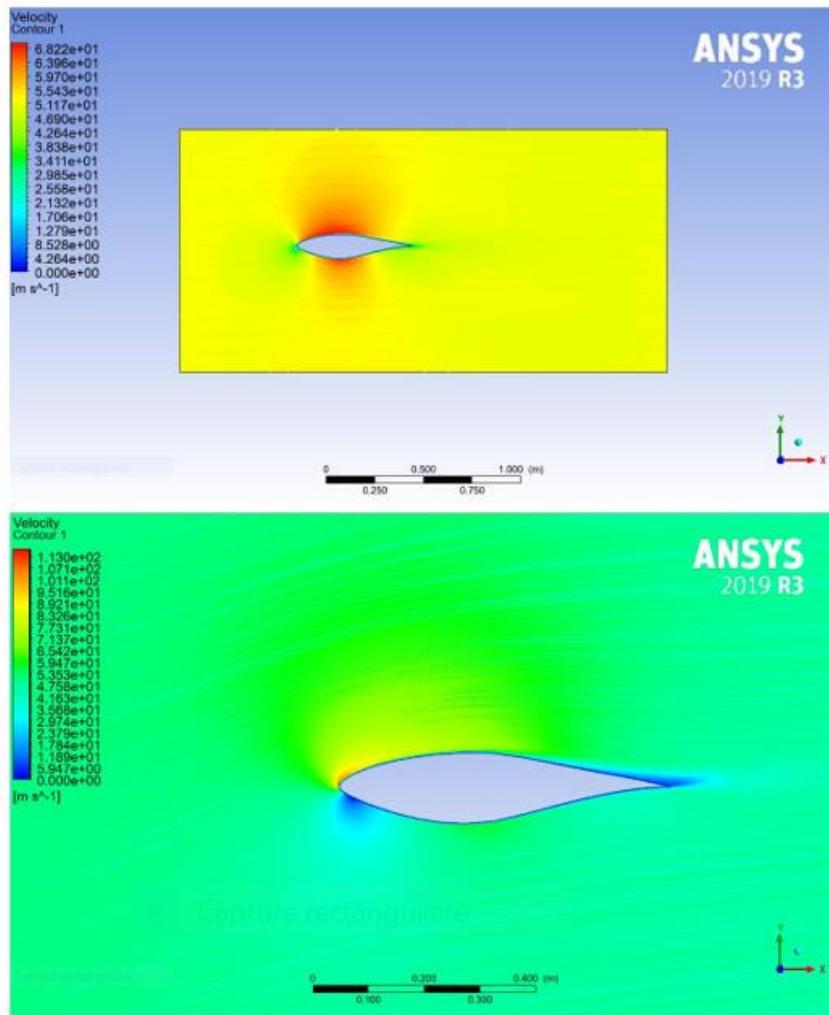


Figure 13. Contours de vitesse autour du profil aérodynamique pour $\alpha = 4,1^\circ$ (en haut) et pour $\alpha = 20,15^\circ$ (en bas)

5. Conclusion

Ce papier étudie numériquement l'effet de l'angle d'attaque sur la courbe C_p du profil S809 avec les trois modèles de turbulence $k-\omega$, $k-\epsilon$ et SST. Initialement, le profil aérodynamique S809 est simulé avec ANSYS/CFX et les résultats sont comparés avec l'expérience en soufflerie. Les résultats montrent que les trois modèles de turbulence précités donnent les même valeurs de C_p . Les comparaisons entre les résultats de la simulation numérique et les mesures expérimentales réalisées en soufflerie ont donné des résultats satisfaisants. Cependant, certains points de comparaison ont présenté des erreurs non négligeables qu'on peut les réduire en utilisant un maillage plus raffiné autour du profil. Pour les autres coefficients aérodynamiques (coefficient de portance, coefficient de traînée, etc.), plusieurs travaux ont démontré que le modèle de turbulence SST donne de bons résultats [SOS 18a].

Bibliographie

- [SOS 18a] SOSSEY-ALAOUI I., Contribution à l'étude aérodynamique et probabiliste d'une pale éolienne, Thèse de doctorat, Université Hassan 1^{er} Settat, 2018.
- [AHL 05] AHLSTRÖM A., Aeroelastic simulation of wind turbine dynamics, Thèse de doctorat. Royal Institute of Technology Stockholm, 2005.
- [SOM 97] SOMERS D., « Design and Experimental Results for the S809 Airfoil », 1997.
- [SCH 83] SCHAFFARCZYK A., *Introduction to wind turbine aerodynamics*, SPRINGER Editions, Londres, 1983.

[BUR 01] BURTON T., SHARPE D., JENKINS N., BOSSANYI E., *Wind energy handbook*, WILEY Editions, Chichester, 2001.

[GOM 14] GOMES A., BRITO R., ROSA H., « Experimental Analysis of an S809 Airfoil», *Revista de Engenharia Térmica*, n° 2, p. 28, 2014.

[SOS 18b] SOSSEY-ALAOUI I., RADI B., « Une étude aérodynamique d'une pale d'éolienne à axe horizontal », *Incertitudes et fiabilité des systems multiphysiques* (ISTE), 2018.