

Une étude aérodynamique d'une pale d'éolienne à axe horizontal

An aerodynamic Study of wind turbine blade

Ismail Sossey-Alaoui¹, Bouchaïb RADI²

¹Laboratoire LIMII, Université Hassan 1^{er}, F.S.T Settat, Maroc, i.sosseyalaoui@gmail.com

²Laboratoire LIMII, Université Hassan 1^{er}, F.S.T Settat, Maroc, bouchaib.radi@yahoo.fr

RÉSUMÉ. L'objet du présent article est de simuler numériquement un écoulement aérodynamique autour d'une pale d'éolienne. Deux simulations sont effectuées en utilisant ANSYS CFX ; d'abord, une section d'une pale d'éolienne soumise à un écoulement d'air, on utilisant trois modèles de turbulence différentes, sous une variété des angles d'attaque afin de choisir le modèle adéquat. Ensuite, l'utilisation de ce modèle dans une simulation 3-D d'une pale d'éolienne afin d'exposer ces performances aérodynamiques dans des domaines CFD complexes.

ABSTRACT. Present paper aims to numerically simulate an aerodynamic flow around a wind turbine blade. So two simulations are performed using ANSYS CFX ; first, a section of a wind turbine blade subjected to an air flow, using three different turbulence models under a variety of angles of attack in order to choose the appropriate model. And then, using this model in a 3-D simulation of a wind turbine blade to expose these aerodynamic performances in complex CFD domains.

MOTS-CLÉS. Aérodynamique, ANSYS CFX, turbulence, éolienne, CFD.

KEYWORDS. Aerodynamic, ANSYS CFX, CFD, turbulence, wind turbine.

Introduction

Les pays du monde entier mettent des efforts considérables dans le développement de la technologie de l'énergie éolienne qui présente une source d'énergie renouvelable propre, abondante et durable. L'énergie éolienne est un nouveau champ de recherche émergent, caractérisé par un degré élevé d'interdisciplinarité, dont l'industrie offre au monde une excellente occasion d'entamer le passage à une économie planétaire basée sur l'énergie renouvelable (BAZILEVS 2013).

Les écoulements rencontrés dans l'industrie ou tout simplement au quotidien sont pour la plupart dominés par des mouvements chaotiques : la turbulence. L'impact de la turbulence peut être positif ou négatif, l'ingénieur doit donc être capable de prédire ces effets lors de la conception des systèmes. Malheureusement, le mouvement turbulent est très complexe et présente la plupart du temps des caractéristiques tridimensionnelles et instables (TURBULENCE 2010).

La simulation numérique de la dynamique des fluides CFD,¹ complément des essais expérimentaux, contribue à réduire les coûts et le temps d'exécution pour les itérations de la conception, et est devenu un outil indispensable à chaque fois que la conception impliquant des fluides est nécessaire (XIAOLIN et CHEN 2015).

Le plan de l'article va directement découler de la mention que nous venons de faire de notre propos. Dans une première partie (§1) nous allons présenter les équations d'un problème aérodynamique. La deuxième partie (§2), est réservée à une brève exposition aux différentes modèles de la turbulence. La troisième partie (§3), sera dédiée à deux simulations numériques effectuées sous ANSYS CFX.

1. Plus souvent désignée par le terme anglais Computational Fluid Dynamics (CFD), C'est une des branches de la mécanique des fluides qui utilise des méthodes et des algorithmes numériques pour résoudre et analyser les problèmes d'écoulement de fluide.

1. Équation d'un problème aérodynamique

Les équations d'écoulement (les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) ont des solutions analytique pour des applications simples. Pour les problèmes des écoulements réels par exemple l'aérospatiale, la technologie de l'énergie, la construction d'automobiles... L'écoulement doit être déterminé expérimentalement ou numériquement.

1.1. Équations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes 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 unidimensionnels autour de la plaque plane. Par conséquent, ce système d'équations est résolu numériquement pour les cas généraux. Les équations de Navier-Stokes sous forme différentielle en coordonnées cartésiennes sont données par :

1.1.1. Équation de conservation de masse

L'équation de conservation de masse est donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho.u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho.v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho.w) = 0 \quad [1]$$

1.1.2. Équations de conservation de quantité de mouvement

Les équation de conservation de mouvement suivant les axes x, y et z s'écrivent sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho.u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho.u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho.u.v - \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho.u.w - \tau_{xz}) - \rho.g_x & = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho.v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho.v.u - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho.v^2 + p - \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho.v.w - \tau_{zy}) - \rho.g_y & = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho.w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho.w.u - \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho.w.v - \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho.w^2 + P - \tau_{zz}) - \rho.g_z & = 0 \end{cases} \quad [2]$$

1.1.3. Équation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie est donnée par :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \cdot \left(e + \frac{1}{2} \cdot \vec{u}^2 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \cdot u \left(h + \frac{1}{2} \cdot \vec{u}^2 \right) - (u \cdot \tau_{xx} + v \cdot \tau_{xy} + w \cdot \tau_{xz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \cdot v \cdot \left(h + \frac{1}{2} \cdot \vec{u}^2 \right) - (u \cdot \tau_{yx} + v \cdot \tau_{yy} + w \cdot \tau_{yz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho \cdot w \left(h + \frac{1}{2} \cdot \vec{u}^2 \right) - (u \cdot \tau_{zx} + v \cdot \tau_{zy} + w \cdot \tau_{zz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] \\ - \rho \cdot (u \cdot g_x + v \cdot g_y + w \cdot g_z) = 0 \end{cases} \quad [3]$$

Les équations de Navier-Stokes « complètes » sont les cinq équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Le terme « complètes » signifie que l'écoulement complètement ; c'est-à-dire décrit également avec les plus petits tourbillons et turbulences.

Il est vrai que, les équations de Navier-Stokes sont valables pour presque tous les écoulements, mais le temps de calcul pour des applications techniques est beaucoup trop grand. Cependant, les équations de Navier-Stokes moyennées de Reynolds, reflètent la physique encore assez précis, et conduisent à des temps de calcul acceptables. Ces équations de petites turbulences ne sont pas résolus, mais modélisées par des modèles dits de turbulence.

2. 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 :

- 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 à zéro équation ou modèle algébrique, la viscosité turbulente est approchée par une équation algébrique simple et résolu une équation différentielle pour la vorticité. Le modèle de Baldwin-Lomax est un représentant typique.
 - 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 $k - \epsilon$, $k - \omega$ et le modèle SST² 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 transitoires, telles que les modèles simulation de large tourbillons LES³, simulation de tourbillons détachés DES⁴ et simulation numérique directe DNS⁵.

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 fines. Les modèles de turbulence couramment utilisés dans la pratique seront décrits un peu plus en détail ci-dessous. D'autres détails sont contenus dans (ANSYS 15). La plupart des modèles de turbulence sont des modèles statistiques.

3. Application à une pale d'éolienne

ANSYS CFX est un outil de calcul de la dynamique des fluides (CFD) de haute performance qui fournit des solutions fiables et précises rapidement et avec vigueur à travers une large gamme de CFD

2. SST acronyme utilisé dans la littérature anglo-saxonne (Shear Stress Transport).
3. LES acronyme utilisé dans la littérature anglo-saxonne (Large Eddy Simulation).
4. DES acronyme utilisé dans la littérature anglo-saxonne (Detached Eddy Simulation model).
5. DNS acronyme utilisé dans la littérature anglo-saxonne (Direct Numerical Simulation).

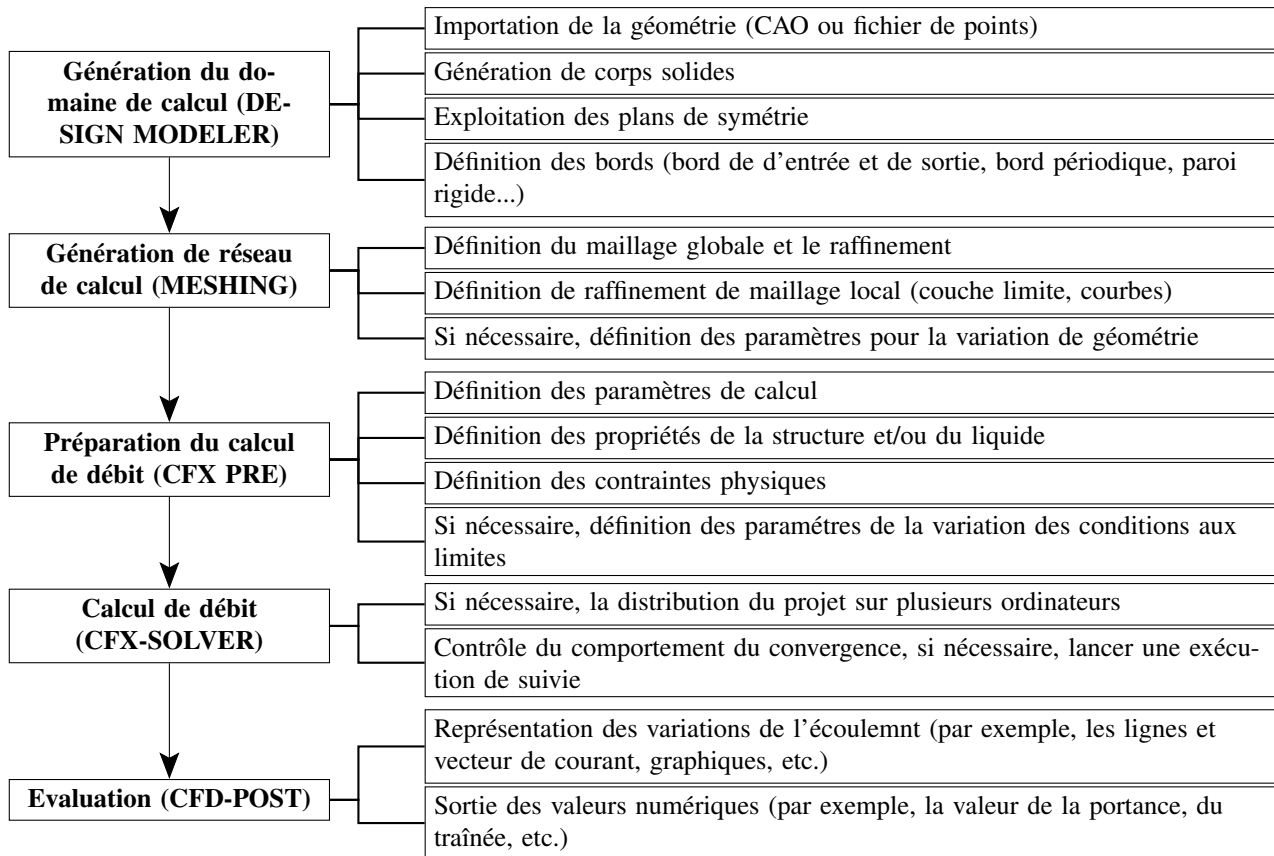


Figure 1. Description des sous-programmes appliqués au ANSYS CFX

et les applications multi-physique. CFX est reconnu pour sa précision exceptionnelle, la robustesse et la vitesse avec les machines tournantes telles que les pompes, ventilateurs, compresseurs, éolienne et turbines hydrauliques (ANSYS 16).

Le logiciel CFX possède de très bonnes interfaces qui permettent de réaliser facilement des simulations numériques (LREEPHASE2, HANCAO2011). Afin de calculer le débit numérique autour d'une pale d'éolienne, les séquences typiques de ce calcul sont illustrées à la figure 1.

3.1. Profil d'une pale d'éolienne soumise à un écoulement d'air

Dans cette étude, nous avons choisi un profil *S809* d'une pales de l'éolienne à axe horizontal, car il existe un nombre important d'expérimentation dans la littérature le concernant notamment (EXPER S809), dont les caractéristiques aérodynamiques sont représentatives. Le *S809* est un profil aérodynamique à écoulement laminaire d'une épaisseur de 21% conçue spécifiquement pour les applications dans les éoliennes à axe horizontal (EXPER S 809). Un croquis de la feuille d'aile est illustré à la figure 2. Un modèle *S809* de corde de 600 mm a été testé dans la soufflerie de $1,8\text{ m} \times 1,25\text{ m}$ à basse turbulence à l'université de technologie de Delft. Les résultats de ces tests sont rapportés par (SOMERS 1989) et sont utilisés dans ce travail pour comparer les résultats numériques. Cette partie a pour but de comparer les modèles $k - \omega$, $k - \varepsilon$ et SST, afin de permettre le choix d'un modèle pour les études d'aérodynamique. Ces différents modèles ont des constructions particulières qui n'apportent pas les mêmes atouts face à la résolution des équations, et donc ne donnent pas les mêmes résultats. La comparaison va se faire à partir des coefficients de portance, de traînée et de moment de tangage, pour une section de la pale d'éo-

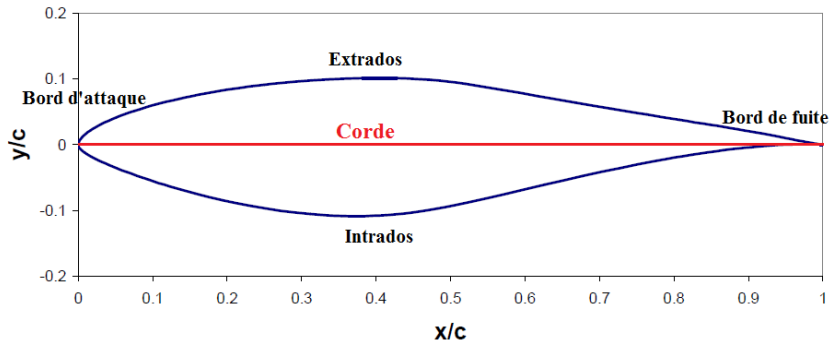


Figure 2. Section du profil S809

lienne à différents angles d'attaque, afin de mettre en avant les atouts de chacun des modèles notamment dans leur description des caractéristiques du profil, et commencera à soulever les différents problèmes de prédiction.

Un maillage de réseau de calcul qui remplit le domaine à l'intérieur duquel l'écoulement doit être calculé, est nécessaire. Ce domaine est limité par la géométrie de la frontière solide et tous les bords extérieurs (voir la figure 3). Les frontières lointaines a été employées ; les bords d'entrée et de sortie

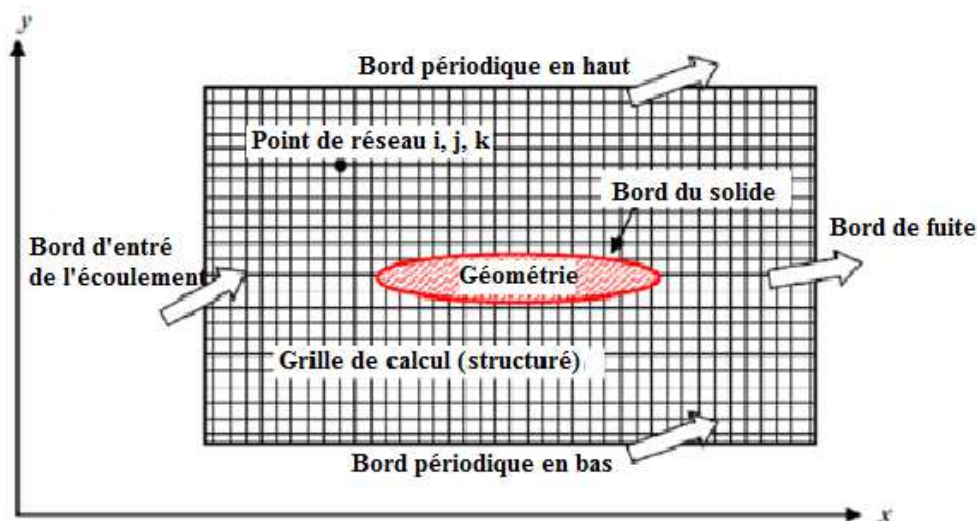


Figure 3. Définition de la zone de calcul

sont assez loin de la géométrie, pour qu'à eux les états de courant constants dominant, la précision de la géométrie n'est pas faussée, et permettre l'expansion complète du flux d'air, donc la longueur du domaine de calcul est déterminée à 35 fois celle de la longueur de la corde (c) et la largeur est déterminée à 30 fois celle de la longueur de la corde, comme représenté dans la figure 4. Le solide est coupé, puisque seulement l'interface au courant, c-à-d le bord du profil, est nécessaire au calcul de l'écoulement. La précision de la solution numérique et le comportement de convergence dépendent largement de la qualité et le raffinement du maillage. A cet effet la figure 5 montre un maillage-O locale hexaèdre raffiné dans la couche frontière du profil, en hexaèdre, l'erreur de troncature est plus petite qu'à tétraèdre en raison de l'obliquité inférieure, ce qui donne une bonne précision.

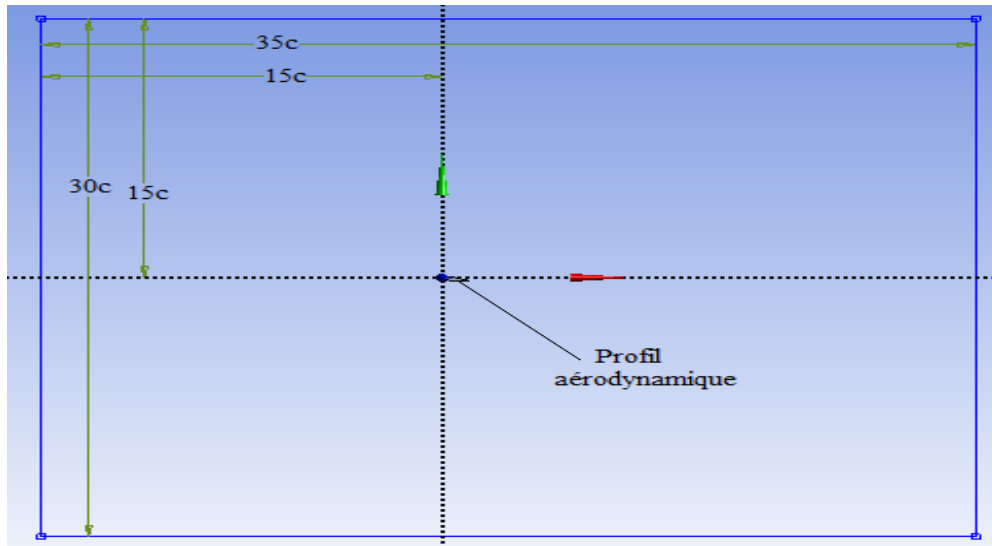


Figure 4. Dimension des bords extérieurs

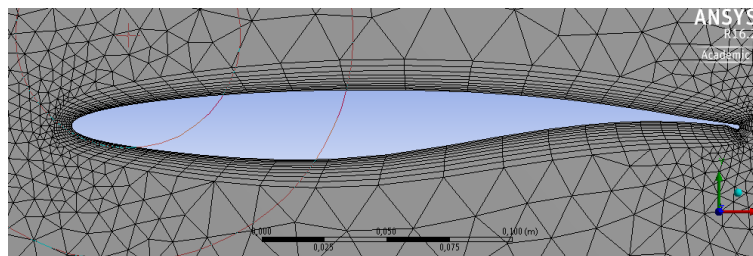


Figure 5. Maillage raffiné sur la couche de prisme autour du profil

3.1.1. Conditions aux limites

On définit les conditions aux limites pour les zones frontalières afin qu'ils soient physiquement significatives en tout cas.

- La valeur par défaut de la pression relative est calculée à 1 atm.
- Le maillage est constitué de 10 076 cellules quadrilatères, dont 165 sont sur la surface de contrôle des profils aérodynamiques.
- Dans l'équation de conservation d'énergie, l'énergie totale, est prise en compte, qui se compose de l'énergie interne, cinétique et potentielle (pour le fluide).
- Les termes de friction ne sont pas inclus dans l'équation de conservation d'énergie. Cela affecte la précision typiquement peu, mais permet d'économiser du temps de calcul et d'améliorer le comportement de convergence.
- Le modèle SST est le modèle de turbulence utilisé dans notre cas, il résout l'équation $k - \omega$ dans les régions près du paroi et l'équation $k - \varepsilon$ dans le reste du champ d'écoulement. Il en résulte une bonne précision en courts temps de calcul.
- Le calcul arrête lorsque la valeur résiduelle est inférieure à $1,5 \cdot 10^{-6}$. Cela signifie que toutes les lois de conservation doivent être respectées par une erreur de $1,5 \cdot 10^{-6}$.
- La température $T = 216,5 \text{ K}$ à une pression $p = 101325 \text{ Pa}$

Les conditions aux limites pour le domaine de calcul sont indiqués par des flèches dans la Figure 6.

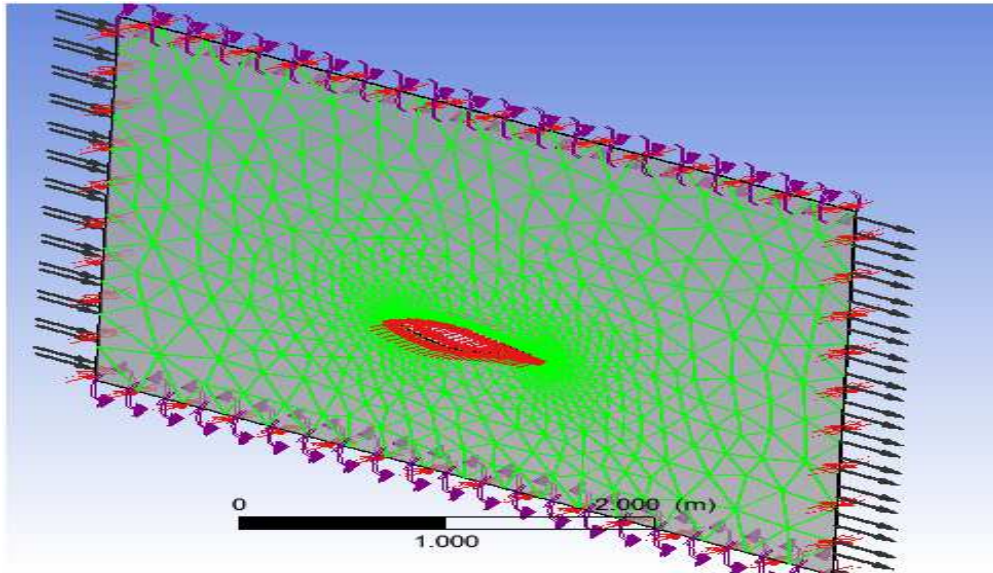


Figure 6. CFX-Pre : les conditions aux limites

3.1.2. Calcul du débit

Afin de comparer les données expérimentales avec le résultat de la simulation dans la même condition de test, le nombre de Reynolds a été établi à 1000000 et la vitesse du vent est de $23,8 \text{ m/s}$, et pour pouvoir comparer les valeurs des coefficients aérodynamiques calculés par les différents modèles et les valeurs expérimentales, nous avons utilisé les valeurs expérimentales moyennés trouvées dans (LREEPHASE 2). Le coefficient de la portance est défini comme étant perpendiculaire à la direction du flux d'air entrant ; Le coefficient de traînée est défini comme étant parallèle à la direction du flux d'air entrant et le centre du moment de tangage est réglé à $1/4$ de la longueur d'accord par rapport au bord d'attaque. La procédure de calcul est terminée après 300 itérations. La figure 7 montre les courbes des résidus pour la masse (rouge), impulsion-x (vert), impulsion-y (bleu) et l'équation de conservation de quantité de mouvement-z (jaune). La figure 8 montre les modèles de turbulence. Les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 présentent une

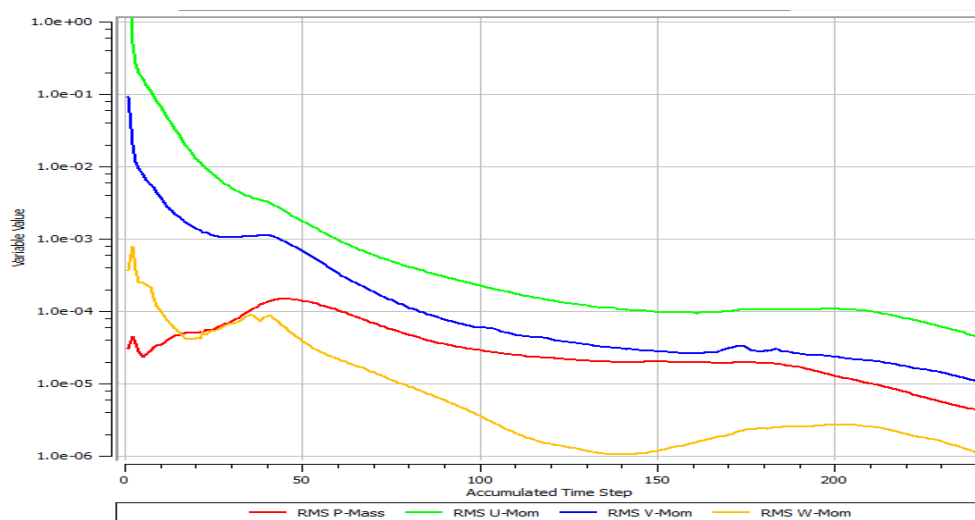


Figure 7. CFX-SOLVEUR : après la fin du cours de calcul

comparaison entre les coefficients aérodynamiques expérimentaux moyennés et les valeurs calculées à l'aide des différents modèles de turbulence pour différents angles d'attaque. Ces tableaux montrent qu'au

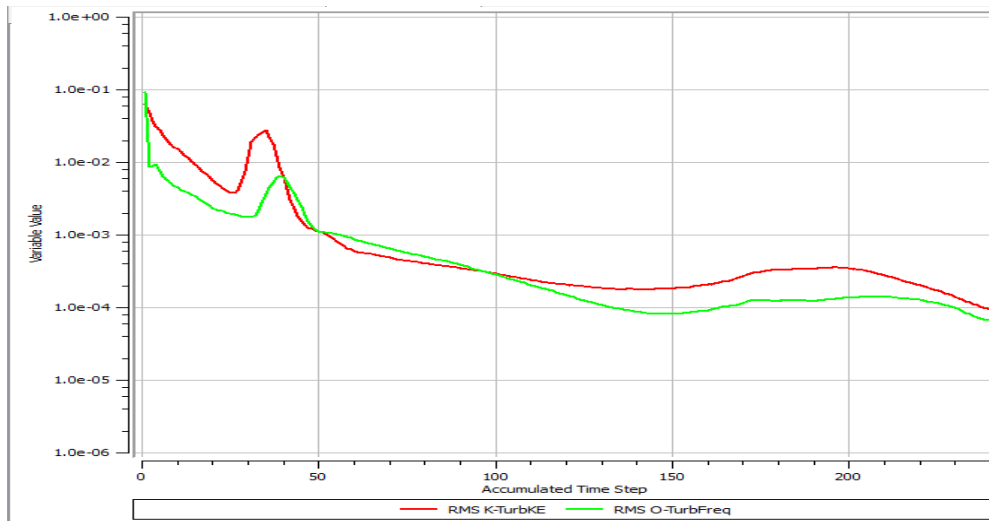


Figure 8. Les modèles de turbulence

$\alpha = 0^\circ$	modèle	calculé	expérimental	Erreur %
Coefficient de portance C_l	$K - \varepsilon$	0,1278	0,1469	13
	$K - \omega$	0,1102		24,98
	SST	0,1397		4,9013
Coefficient de traînée C_d	$K - \varepsilon$	0,0111	0,007	58,57
	$K - \omega$	0,0116		65,714
	SST	0,0084		20
Coefficient de moment C_m	$K - \varepsilon$	-0,0289	-0,0443	-34,7629
	$K - \omega$	-0,0358		-19,1873
	SST	-0,0448		-1,1286

Tableau 3.1. Comparaison entre coefficients aérodynamiques calculés et expérimentaux pour un angle de 0°

$\alpha = 10^\circ$	modèle	calculé	expérimental	Erreur %
coefficients de portance C_l	$K - \varepsilon$	0,8383	1,337	37,2999
	$K - \omega$	0,7816		41,54
	SST	1,2124		9,319
coefficients de traînée C_d	$K - \varepsilon$	0,0322	0,02223	44,949
	$K - \omega$	0,0331		48,897
	SST	0,0232		4,3634
coefficients de moment C_m	$K - \varepsilon$	-0,1249	-0,0443	-21,45
	$K - \omega$	-0,1363		-32,5486
	SST	-0,0905		-11,97

Tableau 3.2. Comparaison entre coefficients aérodynamiques calculés et expérimentaux pour un angle de 10°

$\alpha = 20, 15^\circ$	modèle	calculé	expérimental	Erreur %
coefficients de portance C_l	$K - \varepsilon$	1,1158	0,9113	22,4404
	$K - \omega$	1,0732		17,765
	SST	1,0531		15,56
coefficients de traînée C_d	$K - \varepsilon$	0,2724	0,1851	47,1636
	$K - \omega$	0,2708		46,2993
	SST	0,2613		41,1669
coefficients de moment C_m	$K - \varepsilon$	-0,0736	-0,0903	-18,4939
	$K - \omega$	-0,0718		-20,487
	SST	-0,0758		-16,057

Tableau 3.3. Comparaison entre coefficients aérodynamiques calculés et expérimentaux pour un angle de $20, 15^\circ$

α (deg)	C_l			C_d			C_m		
	Calculé	Exp	Erreur %	Calcul	Exp	Erreur %	Calculé	Exp	Erreur %
0	0,1397	0,1469	4,9033	0,0084	0,007	20	-0,0448	-0,0443	-1,1081
5	0,7655	0,7609	0,6127	0,0127	0,0102	24,5098	-0,0998	-0,132	-24,3939
10	1,2124	1,337	9,319	0,0232	0,0222	4,5149	-0,1249	-0,1029	-21,4511
14,24	1,0599	1,1104	4,5458	0,0472	0,09	47,474	-0,0341	-0,0513	-33,5327
20,15	1,0531	0,9113	15,5618	0,2613	0,1851	41,1619	-0,0388	-0,0903	-56,9682

Tableau 3.4. Comparaisons entre coefficients aérodynamiques calculés et expérimentaux, Calculs totalement turbulents

niveau des coefficients aérodynamique les résultats proposés par le modèle SST s'approchent davantage des résultats expérimentaux que les deux autres modèles. Donc le modèle SST donne des résultats très proches de la réalité. En effet le mélange $k - \varepsilon$ loin de la paroi rigide et $k - \omega$ près de la paroi dans le cadre du modèle SST entraine une surévaluation du coefficients de portance par rapport aux autres modèles. Cette surestimation est sans doute du aux impactes de mélange de deux modèles $k - \varepsilon$ et $k - \omega$.

Le tableau 3.4 représente une comparaison entre les coefficients aérodynamiques de la simulation numérique et les expérimentaux trouvés dans (LREEPHASE 2, HANCAO 2011). La figure 9 présente le nombre de Mach sur le plan de symétrie.

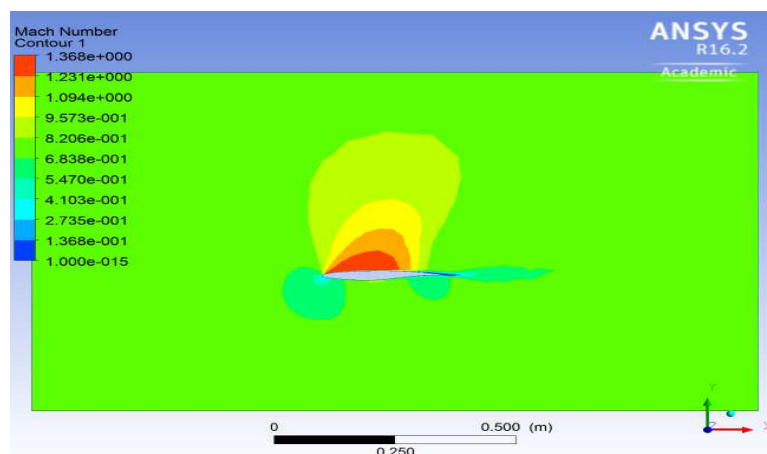


Figure 9. CFD-POST : Contours du nombre de Mach sur le plan de symétrie

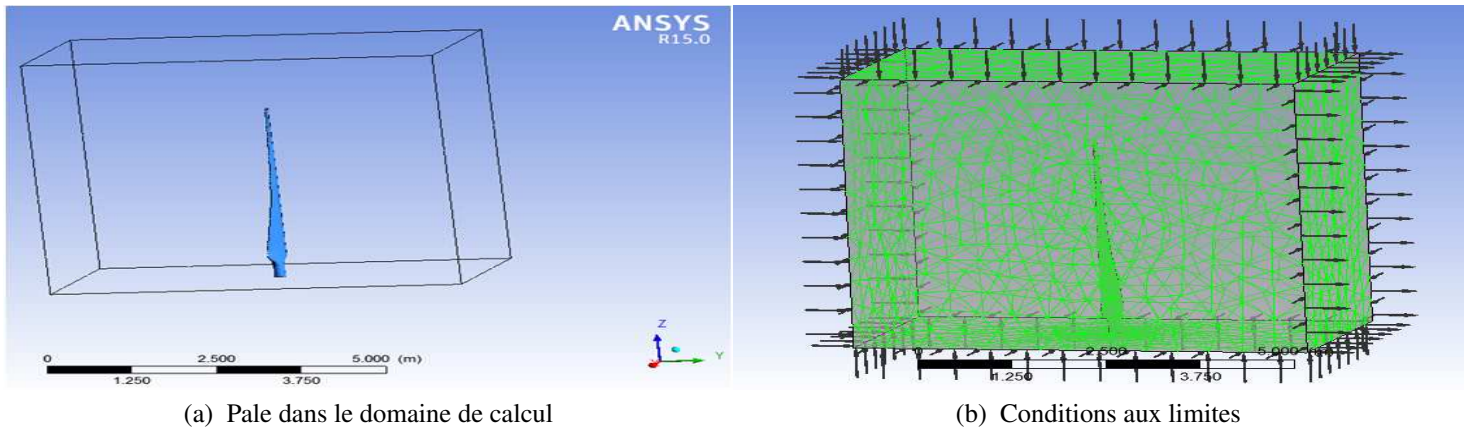


Figure 10. *Pale dans le domaine de calcul et les conditions aux limites*

3.2. Simulations aérodynamique d'écoulement d'air autour d'une pale d'éolienne

Les performances aérodynamiques de la pale d'éolienne peut être améliorée en utilisant CFD. Dans cette étude de cas, nous procédons à l'analyse de l'écoulement d'air passant par une pale d'éolienne. Supposons l'air à la température ambiante de 25°C pour le champ d'écoulement d'air avec une vitesse de 40 km/h soufflant de gauche à droite. Utiliser des conditions aux limites non glissante le long des parois de la pale et de la surface du sol. le but est de présenter le modèle d'écoulement d'air, ainsi que les distributions du champ de pression et de vitesse de l'écoulement autour de la pale. La figure 10 (a) montre la pale en 3D dans le domaine de calcul.

Dans l'analyse CFD, la qualité du maillage a un impact significatif sur le temps et la précision de la solution ainsi que le taux de convergence. Un bon maillage doit être assez fine pour capturer toutes les fonctionnalités d'écoulement pertinents, tels que la couche limite et la couche de cisaillement. Un bon maillage devrait également avoir des transitions souples et progressives entre les milieux de densité de maillage différent, pour éviter l'effet négatif sur la convergence et la précision. Dans notre cas le maillage en volumes finis a été adapté au domaine de calcul.

Les conditions aux limites fluides communes comprennent l'entrée, la sortie, les parois, et le plan de symétrie. Ils sont présentés par des flèches dans la figure 10 (b). Le modèle de turbulence utilisé est $k - \epsilon$ par défaut.

3.2.1. Visualisation de la solution

Une fois notre problème est configuré avec le domaine fluide maillé et les conditions aux limites spécifiées, il peut être déposé au solveur pour calculer la solution. le calcul est effectué après 100 itération (figure 11). Le contour de pression sur la pale est représenté à la figure 12 (a). Les lignes de courant autour de la pale sont présentés dans la figure 12 (b). On peut visualiser les résultats de l'écoulement sur un plan de section figure 13 (a). De même, on visualiser les ligne de courant sur un plan de section figure 13 (b).

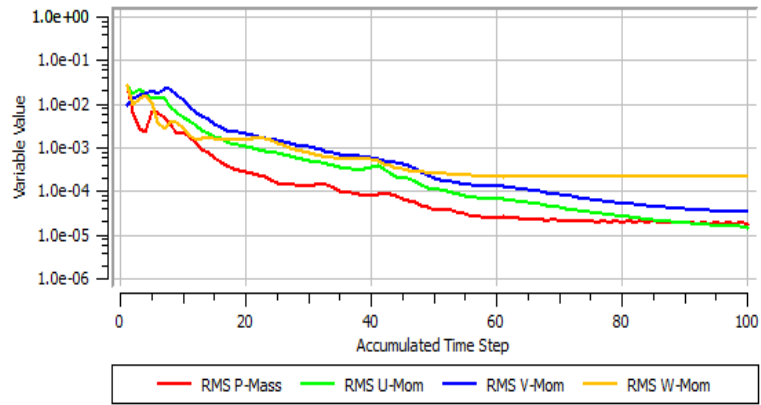
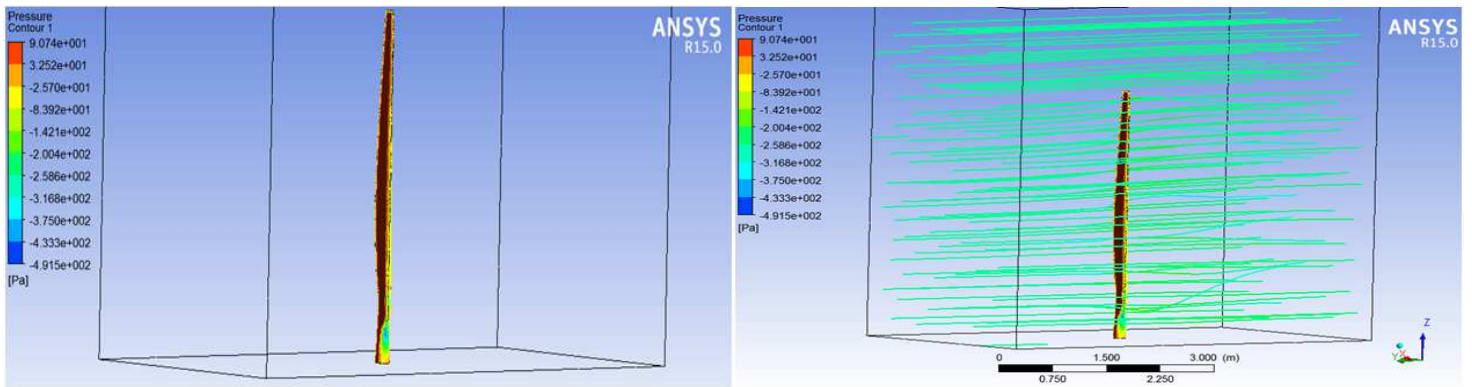


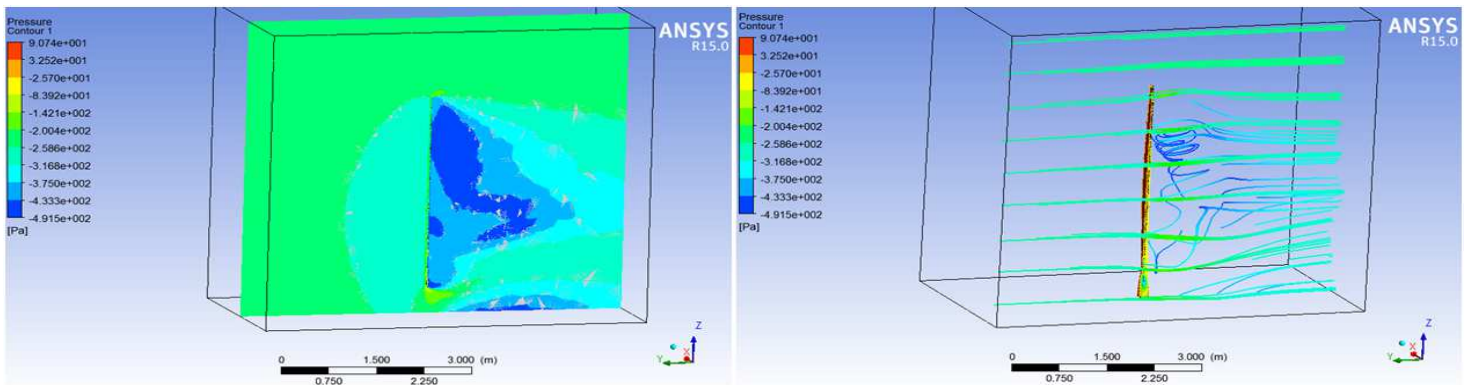
Figure 11. CFX-SOLVEUR : après la fin de calcul



(a) Contour de pression

(b) Lignes de courant

Figure 12. Contour de pression et de ligne de courant autour de la pale



(a) Un tracé de contour

(b) Un tracé de ligne de courant

Figure 13. Tracé de contour et de ligne de courant sur un plan de section

4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons discuté brièvement les principes de différents modèles de la turbulence, les conditions aux limites, et les procédures de simulation dans le cadre d'une analyse et modélisation CFD.

Deux simulations sont effectuées en utilisant ANSYS Workbench ; tout d'abord une section d'une pale d'éolienne soumise à un écoulement d'air on utilisant trois modèles turbulents différents sous une variété des angles d'attaque afin de choisir le modèle adéquat, ensuite une pale d'une éolienne sous des écoulements turbulents dans des domaines CFD complexes.

Dans cette modélisation aérodynamique bidimensionnelle du profil S809, la comparaison entre les résultats CFD et les données expérimentales montre que ANSYS-CFX est une référence fiable, surtout pour les angles d'attaque bas en utilisant le modèle turbulent $SST k - \omega$, cette simulation démontre aussi que le profil aérodynamique S809 a une meilleure performance aérodynamique.

Bibliographie

- MARCHESSE Y., *Mécanique des fluides, Modélisation de la turbulence - Application à la CFD*. Lyon : École Catholique d'arts et Métiers Mécanique et Énergétique, 2010.
- SHEN W. Z., SØRENSEN J. N., MIKKELSEN R., « Tip Loss Correction for Actuator/Navier–Stokes Computations. » *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005.
- CHKIR S., *Contribution à l'étude aérodynamique d'une éolienne par une méthode de sillage libre*. Paris : Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2010.
- CHEN X., LIU Y., *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. new york : CRC Press, 2015.
- D'HAMONVILLE T. T., ILINCA A. *Modélisation de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne, Phase 2 : Modèles turbulents* Université du Québec à Rimouski, 2009.
- ANSYS R., *ANSYS CFX-Solver guides d'utilisation.*, 2013.
- KOLMOGOROV A. N., « Curves in Hilbert space invariant with respect to a one-parameter group of motions. » *Dokl. Akad. Nauk*, 1990.
- MENTER F. R., « Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. » *AIAA Journal*, 1994.
- ANSYS R., *ANSYS CFX-Documentation.*, 2015.
- HAN C. *Aerodynamics Analysis of Small Horizontal Axis Wind Turbine Blades by Using 2D and 3D CFD Modelling* University of Central Lancashire, 2011.
- LAKRIDIS S., CHICK J. « CFD Modeling of the wake interactions of two wind turbines on a Gaussian hill. » *AIAA Journal*, 2009.
- BECHLER N., *Numerische Strömungsberechnung, Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele mit ANSYS Workbench.*, Neubiberg : Springer Vieweg, 2014.
- BOUNFOUR D. M., *Design and Experimental Results for the S809 Airfoil*. NREL/SR-440-6918, 1997.
- D'HAMONVILLE T. T., ILINCA A., *Design and Experimental Results for the S809 Airfoil.*, Université du Québec à Rimouski, 2008
- SIMMS D., CHRECK S., HAND M.M., FINGERSH L.J., *NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel : A Comparison of Predictions to Measurements*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, USA, 2001.
- HAND M.M., SIMMS D., SCHRECK S., FINGERSH L.J., COTRELL J. R., LARWOOD S.M., *Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI : Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, USA, 2001.
- SØRENSEN N. N., MICHELSEN J. A., SCHRECK S., « Navier–Stokes predictions of the NREL phase VI rotor in the NASA Ames 80 ft x 120 ft wind tunnel. » *Wind Energy*, 2002.