

## EFFECT DE L'ÉPAISSEUR DU PROFIL SUR LE DÉVELOPPEMENT DE LA COUCHE LIMITE TURBULENTE

Amal ABDOU<sup>1</sup>, Lakhdar BAH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de physique énergétique, Université de Constantine 1, Constantine, Algérie, amelabdou03@yahoo.fr

<sup>2</sup>Laboratoire de physique énergétique, Université de Constantine 1, Constantine, Algérie, Bahi.lak@gmail.com

### RÉSUMÉ

L'étude de la couche limite turbulente est devenue un sujet d'intérêt ces dernières années dans la recherche scientifique en particulier dans l'aérodynamique où elle intervient notamment dans la conception des ailes d'avion et les turbomachines pour améliorer leurs performances. Le présent travail contribue à l'étude numérique de la couche limite turbulente développée sur un profil bidimensionnel de type NACA. La modélisation de l'écoulement est basée sur les équations de Navier-Stokes moyennées, le modèle  $k-\epsilon$  est utilisé pour modéliser la turbulence. La simulation numérique est effectuée par les logiciels Gambit, qui génère le maillage, et Fluent qui résout le problème modélisé par la méthode des volumes finis. L'objectif principal de ce travail est d'examiner l'effet de l'épaisseur relative du profil sur l'épaisseur de la couche limite turbulente, sur le coefficient de frottement et le coefficient de pression en utilisant trois profils d'épaisseur relative 009,0012 et 0015 respectivement.

**Mots Clés:** *Couche Limite, Turbulence, NACA, Coefficient de Pression, Coefficient de Frottement.*

---

### NOMENCLATURE

#### Symboles :

C corde de profil, m  
 $C_p$  coefficient de pression,  
 $C_f$  coefficient de frottement,  
P pression,  $Nm^2$   
K énergie cinétique de la turbulence,  
 $m^2s^{-2}$   
Re nombre de Reynolds.  
 $U_\infty$  vitesse à l'infini,  $ms^{-1}$   
U, V composantes de la vitesse,  
 $ms^{-1}$ .

#### Lettres grecques :

$\epsilon$  taux de dissipation de turbulence  
 $m^2s^{-3}$   
 $\rho$  masse volumique,  $kgm^{-3}$   
 $\alpha$  angle d'attaque. degré.  
 $\tau_w$  contrainte de frottement  
pariétal.  $Nm^2$   
 $\nu_t$  viscosité cinématique turbulente,  
 $m^2s^{-1}$

---

### 1. INTRODUCTION

La plupart des écoulements naturels ou rencontrés dans l'industrie sont turbulents [1]. Les écoulements turbulents bornés par une paroi sont l'un des problèmes les plus compliqués dans l'industrie. En présence d'une paroi, une couche très mince s'établit au voisinage de celle-ci appelée couche limite. Dans cette région, la vitesse varie rapidement, d'une valeur nulle à la paroi à une valeur de l'écoulement externe et en dehors de laquelle, les effets de la viscosité ne sont négligeables [2]. Le concept de la couche limite introduit par L. Prandtl en 1904,

joue un rôle majeur dans la mécanique des fluides [1], en particulier dans l'aérodynamique où elle intervient notamment dans la conception des ailes d'avion et les turbomachines pour améliorer leurs performances. Elle est le siège de forts gradients des champs conservatifs [3]. L'étude de la couche limite turbulente, dans les écoulements pariétaux, occupe une place prépondérante dans la compréhension des différents mécanismes de transport et de transfert effectués au voisinage de la paroi. Elle a fait l'objet de nombreux travaux théoriques et expérimentaux. Les résultats de ces études ont permis d'importantes améliorations de systèmes industriels notamment dans les domaines aéronautiques et aérospatiaux [3]. La présente recherche, constitue une modélisation numérique d'un écoulement turbulent 2D autour d'un profil. La simulation numérique est réalisée à partir des équations de Navier-Stokes moyennées. La turbulence est prise en compte à l'aide d'un modèle à deux équations de transport, k-ε, proposé par Jones et Launder (1972) qui se base sur le concept Boussinesq (1877) [4]. L'intérêt principal de ce travail est d'étudier l'effet de nombre de Reynolds, de l'angle d'attaque et d'épaisseur de profil sur le comportement de la couche limite turbulente.

## 2. MODELE MATHEMATIQUE

L'écoulement turbulent, visqueux, bidimensionnel, stationnaire et sans transfert de chaleur autour du profil étudié est régi par les équations de Navier-Stokes moyennées suivantes :

*Equation de continuité :*

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

*Equation de quantité de mouvement suivant x :*

$$\frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + (v + \nu_t) \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

*Equation de quantité de mouvement suivant y :*

$$\frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + (v + \nu_t) \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

*Equation d'énergie cinétique turbulente k :*

$$\frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_k - \varepsilon \quad (4)$$

*Equation du taux de dissipation d'énergie cinétique turbulent ε :*

$$\frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{c_1}{k} \varepsilon P_k - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

La simulation numérique est faite par les logiciels Gambit, qui génère le maillage, et Fluent qui résout le problème modélisé par la méthode des volumes finis. La méthode des volumes finie, sans doute la plus employée actuellement, est caractérisée par son avantage de satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et de l'énergie. Elle consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes élémentaires où chaque volume élémentaire entoure un nœud [5]. Le schéma d'apwind second ordre est utilisé pour discrétiser les termes convectifs des équations de quantité de mouvement, de l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation de l'énergie cinétique. L'algorithme Simple est utilisé pour la correction vitesse-pression.

## 3. RESULTATS

Les trois profils symétriques utilisés sont; Naca0009, Naca0012 et Naca0015. Sur ce type de profil le point d'épaisseur maximal se trouve à 30% de la corde à partir du bord d'attaque.

### *Génération de maillage*

Le maillage généré par le mailleur Gambit est de type de maillage "C" adapté au type de 'écoulement étudié. Horizontalement, l'infini est considéré à 14 fois la corde en amont du bord d'attaque du profil et 20 fois la corde en aval du bord de fuite. Verticalement, l'infini est situé à une distance 15 fois la corde. La figure 1 représente un maillage plus raffiné à proximité de la paroi du profil pour détecter les détails de la couche limite.

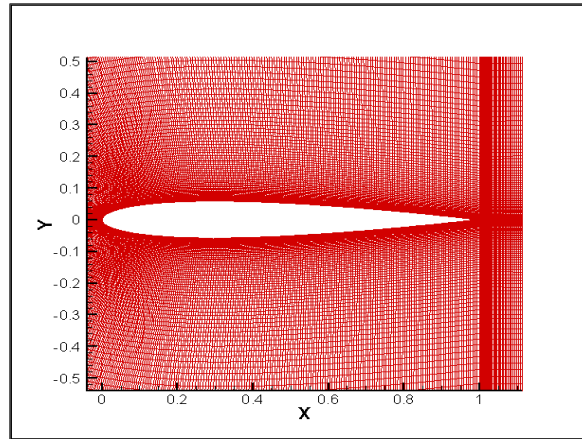


FIGURE 1. Maillage raffiné à proximité de la paroi du profil de NACA0012

### *Effet de l'épaisseur du profil sur l'épaisseur de la couche limite turbulente*

On présente, tout d'abord l'évolution du profil de vitesse sur le profil NACA0012. En premier lieu, la vitesse moyenne est nulle à la paroi à cause de la condition de non glissement. Ensuite la vitesse augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la paroi du profil jusqu'à atteindre la couche externe. Ce gradient de vitesse détermine l'épaisseur de la couche limite. Sur la figure suivante, sont représentés les profils de vitesse, pour plusieurs stations, obtenus pour un nombre de Reynolds  $Re = 10^6$  et une incidence nulle,  $\alpha=0^0$ . On remarque bien sur la figure (2), que l'épaisseur de la couche limite augmente le long du profil c'est-à-dire que l'épaisseur augmente en allant vers le bord de fuite. . A une station  $x/c=0.3$ , elle est de  $y/c=0.012$ , à la station  $x/c=0.6$  elle est de  $y/c=0.021$  et à  $x/c=0.9$ ,  $y/c=0.03$ . Ce qui démontre que l'épaisseur de la couche limite est très faible comparé à la corde du profil, malgré ça, elle est le siège des phénomènes de frottement la cause principale de la consommation énergétique.

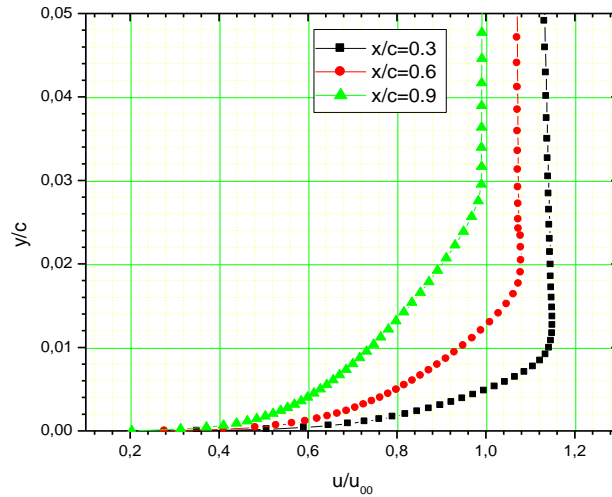


FIGURE 2. Profils de la vitesse pour plusieurs stations de profil NACA 0012 à  $\alpha=0^0$  et  $Re = 10^6$ .

On présente sur la figure 3 les profils de vitesses sur les profils NACA0009, NACA0012 et NACA0015 à la même station,  $x/c=0.69$ , et à  $Re=10^6$ . Sur le profil NACA0009, le profil de vitesse prend la forme classique de la couche limite, une vitesse nulle à la paroi ensuite celle-ci augmente progressivement jusqu'à atteindre la valeur maximale de la vitesse externe, indiquant que la couche limite reste attachée à la paroi en cette station. Par contre sur le profil NACA0012, on est en présence d'un point d'inflexion, au-delà duquel la couche limite commence à se décoller. A cette même station la couche limite est déjà décollée, sur le profil NACA0015, où on a un retour d'écoulement traduit par les valeurs négatives de vitesse.

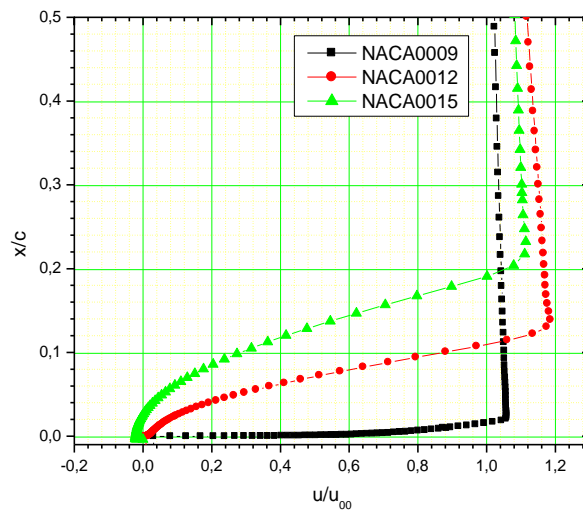


Figure 3. Profils de la vitesse sur les profils NACA0009, NACA0012 et NACA0015 à  $x/c=0.69$ ,  $Re=10^6$  et  $\alpha = 15^0$ .

*Effet de l'épaisseur de profil sur le coefficient de pression*

Sur la figure 4, on présente le coefficient de pression pour les profils NACA0009, 0012 et NACA0015. Le coefficient de pression  $C_p$  est donné par :

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2}$$

On remarque que le coefficient de pression ne change pas d'allure, mais change de valeurs suite au changement de l'épaisseur relative de chaque profil. Augmenter l'épaisseur relative, c'est augmenter la courbure du profil, ce qui augmente par conséquent la vitesse externe et diminue le coefficient de pression. L'épaisseur relative la plus élevée donne le coefficient de pression le plus bas.

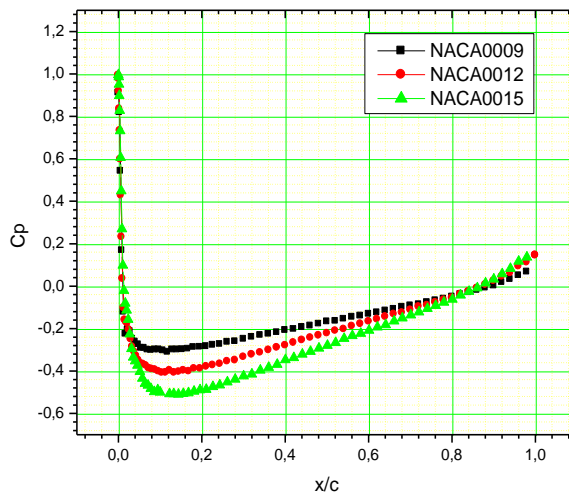


Figure 4. Distribution du coefficient de pression sur les profils NACA 0009, NACA0012 et NACA0015.  $Re = 10^6$  et  $\alpha = 0^\circ$

*Effet de l'épaisseur de profil sur le coefficient de frottement*

Sur la figure 5, on présente la distribution du coefficient de frottement sur les profils NACA0009, 0012 et NACA0015. Le coefficient de frottement  $C_f$  est donné par :

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2} \quad \text{où} \quad \tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

Il est clair que le coefficient de frottement décroît légèrement avec l'épaisseur. L'augmentation de l'épaisseur se traduit par une plus grande accélération de l'écoulement sur la partie amont du profil, engendrant ainsi une diminution des forces de frottement.

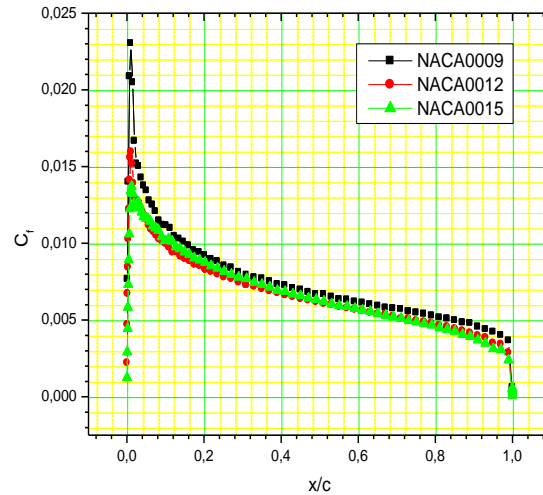


Figure 5. Distribution du coefficient de frottement sur les profils NACA 0009, NACA0012 et NACA0015.  $Re = 10^6$  et  $\alpha = 0^0$

#### 4. CONCLUSIONS

Dans ce travail une étude numérique de l'écoulement turbulent autour d'un profil NACA symétrique a été faite. La simulation numérique est faite avec les logiciels Gambit, qui génère le maillage, et Fluent qui résout le problème modélisé par la méthode des volumes finis. Les résultats obtenus ont montré que l'épaisseur de la couche limite turbulente augmente dans le sens de l'écoulement. Ainsi que, une augmentation de l'épaisseur du profil a tendance à décroître le coefficient de pression et augmenter le coefficient de frottement. On a remarqué aussi que l'augmentation de l'épaisseur du profil entraîne l'apparition de phénomène de décollement de la couche limite turbulente.

#### REFERENCES

- [1] H. Schlichting, *Boundary layer theory*, 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill, New York, 1979.
- [2] J. Berdberg, On the wall boundary condition for turbulence models, *Internal rapport 0/4, Sweden, 2000*.
- [3] G. Bellettre, Transferts de masse et de chaleur dans la couche limite pariétale et à l'intérieur d'une paroi poreuse plane soumise à de l'effusion ou de la transpiration, Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 1998.
- [4] J. Coustex, *Aérodynamique: Turbulence et couche limite*, ed Cepadues, 1989.
- [5] S. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill Book Comany.1980.