

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique et Énergies renouvelables

**Thème**

Réduction de frottement dans une couche limite au  
moyen des Riblets

Devant le jury composé de :

Présenté par :

MANCOURI Khaled

Président

- HADA Abdelouahed

BOUSBIA Seif Eddine

Examineur

- GHUERFI Khaled

BERKANE Houda

Encadreur

2017-2016

# Remerciement

En préambule à ce travail,

On souhaiterait adresser nos remerciements les plus sincères  
aux personnes qui ont apporté leur aide

et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire

on tient d'abord à remercier notre prof

**" Mme.BERKANE.Houda "**

ainsi que l'ensemble de l'équipe d'enseignants

d'histoire contemporaine de l'Université

de" **Echahid Hamma Lakhdar** " d'El-oued

pour la qualité de leur enseignement.

On n'oublie pas aussi nos parents pour leurs soutiens bienveillants.

On souhaiterait remercier également nos amis

et nos proches notamment **M. BOKHARLA**

pour leur encouragement tout

au long de la réalisation de ce mémoire

Merci à tous et à toutes ...

# Dédicace

*À mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la  
patience,  
le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans  
eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui*

*Mon père : GHERFI ALI*

*Ma mère: GHERGHOUT SALIHA*

*A mes très chers frères*

*A mes très chères sœurs*

*A tout les enseignants et les profs qui m'ont appris durant toutes mes  
années d'étude et*

*tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*A tous mes collègues de la promotion 2017 plus spécialement : "ELHANI,  
MESSOUDE, BACHIR, BILAL, CHAOUKI, BILAL,  
ABDELOUAHED"*

*A mes amies: MAROUANE, YAHIA, IMADE, FAOUZI,*

*DHIA ELHAKÈ ....*

*Je dédie cet humble travail*

*KHALED. GHUVERFI*

# Dédicace

*À mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la  
patience,  
le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans  
eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui*

*Mon père : HADA LAID*

*Ma mère: MOBARKA BELILA*

*A mes très chers frères*

*A mes très chères sœurs*

*A tout les enseignants et les profs qui m'ont appris durant toutes mes  
années d'étude et*

*tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*A tous mes collègues de la promotion 2017 plus spécialement : "ELHANI,  
MESSOUDE, BACHIR, BILAL, CHAOUKI, BILAL, KHALED "*

*A mes amies: MAROUANE, SMAIL, CARBI,  
FARES, MOHMMED, TDJANI ....*

*Je dédie cet humble travail*

*ABDELOUAHED.HADA*

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b>	<i>Développement d'une couche limite le long d'une plaque plane.</i>	Page 2
<b>Figure I.2</b>	<i>Profil de vitesse d'une couche limite turbulente [10]</i>	Page 8
<b>Figure I.3</b>	<i>Paroi rainurée.</i>	Page 9
<b>Figure I.4</b>	<i>Différentes géométries de "riblets" essayées à la NASA Langley [16].</i>	Page 10
<b>Figure I.5</b>	<i>Schéma de l'interaction hypothétique entre les tourbillons contrarotatifs et les "riblets" [1].</i>	Page 12
<b>Figure II.1</b>	Processus de simulation	Page 19
<b>Figure II.2</b>	répartition des points sur le profil	Page 20
<b>Figure II.3</b>	géométrie de profil	Page 21
<b>Figure II.4</b>	frontières de domaine de calcul	Page 21
<b>Figure II.5</b>	faces entourant le profil	Page 22
<b>Figure II.6</b>	Mailler les segments des faces	Page 23
<b>Figure II.7</b>	Les conditions aux limites	Page 24
<b>Figure II.8</b>	<i>Processus de génération d'un maillage dans le GAMBIT</i>	Page 25
<b>Figure III.1</b>	<i>Représentation du problème étudié</i>	Page 26
<b>Figure III.2</b>	<i>la distribution de vitesse dans une paroi rainurée d'après Kim et al.</i>	Page 27
<b>Figure III.3</b>	<i>la distribution de vitesse dans une paroi rainurée calculés par fluent</i>	Page 27
<b>Figure III.4</b>	Comparaison entre la distribution de vitesse dans une plaque plane et rainurée	Page 28
<b>Figure III.5</b>	<i>Représentation de la distribution de pression statique dans une paroi rainurée.</i>	Page 29
<b>Figure III.6</b>	<i>Représentation de la distribution de pression statique dans une plaque lisse.</i>	Page 29
<b>Figure III.7</b>	<i>: Représentation de la distribution de l'énergie cinétique turbulente dans une paroi rainurée</i>	Page 30
<b>Figure III.8</b>	<i>: Représentation de la distribution de l'énergie cinétique turbulente dans une plaque lisse.</i>	Page 30
<b>Figure III.9</b>	<i>Représentation graphique de l'effet des parois rainurées sur l'écoulement</i>	Page 31



## **Liste des symboles :**

$U_{\infty}$ : La vitesse de l'écoulement à l'infini. [m/s]

$\delta$ : épaisseur de la couche limite [m]

$A$ : surface [ $m^2$ ]

$\mathbf{u}$ : Vecteur de vitesse [m/s]

$\nu$ : viscosité cinématique turbulente [ $m^2/s$ ]

$\Theta$ : épaisseur de la quantité de mouvement [m]

$Re_c$ : Nombre de Reynolds critique [sans unité]

$L$ : Longueur [m]

$\tau_t$ : tension de Reynolds

$\tau_p$  tension de paroi

$C_f$ : Coefficient de frottement [sans unité]

$C_p$  Coefficient de pression [sans unité]

$U_{\tau}$ : Vitesse de frottement [m/s]

$\rho$ : densité [ $kg/m^3$ ]

$y^+$ : la distance à la paroi normalisée. [sans unité]

$S^+$  Espacement des rivets sans dimension,  $S^+ = U_{\tau}/\nu$

$x; y; z$ : Cartésien coordonne [dimensionnelles]

$p$ : Pression [Pa]

$\tau$ : Contrainte visqueuse

$U, V$ : Composantes de la vitesse dans le plan (x, y).

$K$ : énergie cinétique de la turbulence.

$\varepsilon$ : taux de dissipation de la turbulence.

$\alpha$ : Angle de crête [deg]

$\overline{UV}$ : Stress de cisaillement turbulent primaire [ $m^2/s^2$ ]





## Liste des tableaux

Tableau II.1 constantes du modèle de turbulence k-  $\epsilon$  standard

Page 17

# Liste des matières

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Rappel De Quelques Notions Sur La Couche Limite</b>	
I.1 Définition et régimes d'écoulement.....	2
I.2 Les régions constituantes d'une couche limite turbulente.....	4
I.2.1 Région interne(loi de paroi).....	5
I.2.2 Région externe (loi de vitesses déficitaires).....	7
I.2.3 Recouvrement.....	8
I.3 Réduction de la traînée au moyen des Riblets.....	9
I.3.1 Paramètres géométriques des " riblets".....	9
I.3.2 Mécanismes d'action des "riblets".....	11
<b>Chapitre II : Procédure numérique</b>	
II.1 Formulation mathématique.....	14
II.1.1 Description du problème physique .....	14
II.1.2. Equations gouvernantes.....	14
II.1.2.1 Hypothèses simplificatrices .....	14
II.1.2.2. Equation de continuité .....	14
II.1.2.3. Equation de quantité de mouvement suivant x .....	15
II.1.2.4. Equation de quantité de mouvement suivant y.....	15
II.1.3 Modèle k –epsilon.....	16
II.1.3.1 Equation d'énergie cinétique turbulente .....	17
II.4 Conditions aux limites.....	18

<b>II.2.Présentation des logiciels de calcul.....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.1. Le pré-processeur Gambit.....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.2. Construction du maillage sous Gambit.....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.3 Le solveur Fluent.....</b>	<b>25</b>
<b>Chapitre III : Résultats et discussions</b>	
<b>III.1 Validation du code de calcul.....</b>	<b>26</b>
<b>III. 2 Evolution du profil de vitesse .....</b>	<b>28</b>
<b>III.3 Evaluation du champ de pression.....</b>	<b>29</b>
<b>III.4 Evaluation de l'énergie cinétique turbulente.....</b>	<b>29</b>
<b>III.5 l'effet des parois rainurées sur l'écoulement turbulent.....</b>	<b>31</b>
<b>III.6 Conclusion.....</b>	<b>31</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>32</b>



# **Introduction**

## Introduction :

La plupart des écoulements naturels ou rencontrés dans l'industrie sont turbulents [13]. Les écoulements turbulents bornés par une paroi sont l'un des problèmes le plus compliqué 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 [13].

La réduction de la traînée dans une couche limite turbulente a fait l'objet de nombreux travaux de recherche depuis plusieurs décennies. L'ensemble des techniques développées pour réduire la traînée est généralement catégorisé comme étant soit des méthodes actives ou soit des méthodes passives. Les méthodes actives nécessitent un apport extérieur d'énergie ou de masse telle que l'injection de bulles de gaz ou l'adjonction dans l'écoulement d'une quantité très faible de certains polymères. Contrairement aux méthodes actives, les méthodes passives ne requièrent aucun apport extérieur d'énergie ou de masse.

Parmi les méthodes passives pour réduire la traînée d'une couche limite turbulente, on retrouve deux techniques récentes qui utilisent des artifices que l'on peut qualifier de modérateur de turbulence. L'une fait appel à des lamelles et l'autre utilise des "riblets" à la paroi. Dans cette présente étude, on s'est intéressé particulièrement à cette dernière technique mentionnée qui consiste à modifier la géométrie de la paroi au moyen de fines rainures longitudinales appelées "riblets"

La motivation principale étant la maîtrise du logiciel "Fluent" en tant qu'outil de simulation numérique puissant, afin de déterminer quelque paramètre de la couche limite turbulente via des parois rainurées. Ce travail est décomposé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, on présente une brève description de la couche limite turbulente et leurs régions constituantes. Les paramètres géométriques des riblets ainsi que leurs mécanismes d'action sont présentées.

La simulation numérique de ce système sera l'objet de deuxième chapitre après avoir l'établissement des équations de Navier-Stokes moyennées sous forme adimensionnelle.

Dans le dernier chapitre, nous évaluerons et discuterons les résultats des simulations.

Enfin, des conclusions sur les résultats seront présentées.



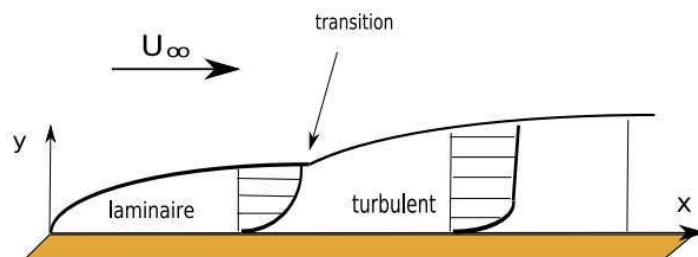
**Chapitre I :Rappel de  
quelques notions sur la  
couche limite**

Pour comprendre de quelles façons des "riblets" agissent sur une couche limite turbulente pour produire des réductions de traînée, il faut connaître certaines caractéristiques propres à cette couche limite. Ce chapitre présente quelques notions théoriques sur cette couche limite ainsi que les paramètres géométriques des riblets et leurs mécanismes d'action .

### I.1 Définition et régimes d'écoulement:

La théorie de la couche limite a été introduite par Ludwig Prandtl au début du 20<sup>ème</sup> siècle [5]. Cette théorie stipule qu'une couche mince de fluide est formée près d'une paroi lorsqu'un fluide est décéléré par l'effet des forces de friction le long de cette paroi. Dans cette couche, la vitesse du fluide est nulle à la paroi; c'est la condition de non glissement ( $u(x,0)=0$ ) et elle augmente avec la distance normale à la paroi pour atteindre une vitesse égale à celle de l'écoulement libre ( $U_\infty$ ).

Le développement d'une couche limite le long d'une paroi a été abordé par plusieurs auteurs [5] et [9] comme exemple, examinons un cas bien connu qui est celui d'un écoulement sur une plaque plane (figure I.1). Habituellement, lorsqu'un écoulement parcourt une distance suffisamment longue, la couche limite évolue pour former trois zones distinctes le long de son trajet. En premier lieu, le régime d'écoulement est généralement laminaire au voisinage du bord d'attaque ( $A$ ). En aval, si des perturbations sont présentes, la couche limite devient alors instable et traverse une zone de transition où elle devient turbulente. De plus, un autre trait propre au développement d'une couche limite est l'épaisseur ( $\delta$ ) de celle-ci qui augmente avec la distance ( $x$ ) mesurée à partir du bord d'attaque ( $A$ ). Cette épaisseur ( $\delta$ ) représente la distance normale mesurée entre la paroi et la frontière qui correspond à une vitesse approximativement égale à 99.5% de la vitesse de l'écoulement libre ( $u \approx 0.995 U_\infty$ ).



**Figure I.1** : Développement d'une couche limite le long d'une plaque plane.

Ce passage d'un régime laminaire à un régime turbulent peut, entre autres, être favorisé par la rugosité de la paroi ou par une turbulence dans l'écoulement extérieur à la couche limite. Cependant, certaines propriétés, tel que la vitesse ( $U_\infty$ ) et la viscosité ( $\nu$ ) du fluide, agissent d'avantage sur le régime d'écoulement d'une couche limite. Les études antérieures démontrent que le régime d'écoulement peut être caractérisé par un paramètre adimensionnel appelé nombre de Reynolds que l'on définit comme suit:

$$Re_L = \frac{U_\infty L}{\nu} \quad (I. 1)$$

Dans cette équation, le paramètre  $L$  est une certaine longueur caractéristique. Dans le cas d'un écoulement sur une plaque plane, cette longueur peut être  $x$  (distance mesurée à partir du bord d'attaque),  $\delta$  (épaisseur de la couche limite) ou  $\theta$  (épaisseur de la quantité de mouvement). Pour le cas particulier d'un corps profilé, la corde de la paroi courbée est généralement utilisée comme longueur de référence dans l'expression du nombre de Reynolds ( $Re_c$ ).

Selon l'application, la transition d'une couche limite laminaire à celle turbulente peut se produire lorsque ce nombre prend une valeur supérieure à une certaine valeur critique ( $Re_{cr}$ ). Pour un écoulement sur une plaque plane, cette valeur critique, du nombre de Reynolds en fonction de la distance  $x$  ( $Re_{x(cr)}$ ), se situe entre de  $\sim 10^5$  et  $\sim 4 \times 10^6$ .

En comparant la zone laminaire avec celle turbulente de la couche limite, on peut constater quelques différences dominantes dans leurs caractéristiques [3]. Signalons d'abord que la couche limite turbulente épaissit plus rapidement que la couche limite laminaire. De plus, on reconnaît que la distribution des vitesses diffère beaucoup d'un régime à l'autre.

Entre autres, un écoulement turbulent présente un profil de vitesse ayant une forme beaucoup plus pleine que celui d'un écoulement laminaire. Par ailleurs, on observe en régime turbulent de très grandes variations de vitesse au voisinage immédiat de la paroi ce qui assure la condition de non-glissement. De plus, la turbulence fournit un mécanisme de mélange beaucoup plus puissant que celui que l'on retrouve dans un écoulement laminaire. Par conséquent, la transition d'une couche limite laminaire à celle turbulente résulte habituellement par une augmentation de la traînée de frottement.

Dans une couche limite turbulente, le frottement total  $\tau$  est principalement composé de contraintes turbulentes que l'on appelle "tensions de Reynolds"  $\tau_t$ . Toutefois, connue sous la terminologie de "tensions de paroi"  $\tau_p$ , les contraintes mesurées très près de la paroi sont dues essentiellement à la viscosité du fluide. Tout compte fait, dans l'ensemble d'une couche limite turbulente, la tension totale  $\tau$  est égale à la somme de  $\tau_t$  et  $\tau_p$ . Lorsque la couche limite est laminaire, la tension totale est uniquement composée de contraintes visqueuses. Ces contraintes turbulentes et visqueuses sont définies comme suit:

$$\tau_t = \rho(u'v') \quad (I. 2)$$

$$\tau_p = \mu \frac{dU}{dy} \quad (I. 3)$$

Reliée à cette contrainte pariétale  $\tau_p$  de même qu'au coefficient de frottement  $C_f$ , la vitesse de frottement  $U_\tau$ , est aussi une quantité auquel on se réfère régulièrement:

$$U_\tau \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}} = U_\tau \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (I. 4)$$

Dans la majorité des applications où il est avantageux de réduire la traînée, les nombres de Reynolds mesurés sont généralement suffisamment élevés pour garantir une couche limite pleinement turbulente. Par exemple, dans le domaine de l'aérodynamique, ces valeurs calculées, en fonction de la corde ( $Re_c$ ), peuvent être de l'ordre de  $(4 \cdot 10^7)$  pour les ailes d'avions et de  $(3 \text{ à } 6 \cdot 10^8)$  pour leurs fuselages [13]. Afin de réduire la traînée de frottement turbulent, plusieurs techniques tentent d'agir sur le mécanisme de formation de la turbulence.

## I.2 Les régions constituantes d'une couche limite turbulente:

Tout d'abord, à cause de la viscosité et la condition de non-glissement à la paroi, on observe dans une couche limite turbulente des comportements indépendants du profil des vitesses (figure I.2). Associées à ces comportements, on distingue au moins deux régions principales de cette0 couche limite. L'une d'elles, située près de la paroi, est appelée région interne, et l'autre, éloignée de la paroi, est appelée région externe. Appartenant à la fois à ces deux régions, il existe une zone appelée recouvrement qui raccorde ces derniers.

### I.2.1 Région interne(loi de paroi):

Située près de la paroi, la région interne qui occupe environ 15% de la couche limite est dominée par l'effet de la viscosité. Si cette région est suffisamment mince, on admet que son profil des vitesses  $U(y)$  dépend essentiellement de la contrainte de frottement pariétal  $\tau_p$ , de la masse volumique  $\rho$  et de la viscosité dynamique  $\mu$  du fluide:

$$U = U(y, \tau_p, \rho, \mu) \quad (I.5)$$

Habituellement, pour étudier les écoulements à proximité d'une paroi, on substitue ces variables par *des variables de paroi* rendues sans dimension. à l'aide de la vitesse de frottement  $U_c$ . Les variables de paroi utilisées sont la *vitesse réduite*  $U^+$  et la coordonnée normale réduite  $y^+$

$$U^+ = \frac{U}{U_c} \quad (I.6)$$

$$Y^+ = \frac{y U_c}{\nu} \quad (I.7)$$

En introduisant ces variables de paroi à la relation (I.5), on obtient une fonction générale appelée "loi de paroi":

$$U^+ = f(y^+) \quad (I.8)$$

Cette loi est considérée comme universelle et s'applique à la région interne d'une couche limite turbulente. Par la terminologie de "loi universelle", on veut exprimer l'indépendance de cette loi par rapport aux conditions de l'écoulement loin de la paroi. La loi de paroi est alors indépendante du gradient de pression, de l'épaisseur de la couche limite  $\delta$  et de la vitesse de l'écoulement libre  $U_\infty$ .

La région interne est généralement subdivisée en trois autres régions (figure I.2). En commençant par celle située le plus près de la paroi, on retrouve tout d'abord la sous-couche laminaire", ensuite la région tampon et la plus éloignée étant la région turbulente. Dans ce qui suit, notons que les valeurs qui délimitent l'emplacement des régions sont approximatives.

1. **Sous-couche "laminaire"** ( $y^+ < 3$ ): Cette région est appelée sous-couche laminaire sans pour autant posséder les caractéristiques d'un écoulement laminaire. En effet, contrairement à un écoulement laminaire, cette mince couche de fluide possède de fortes fluctuations de vitesse. La dénomination de sous-couche "laminaire" vient plutôt du fait que, dans cette région située très près de la paroi (figure I.2), la contrainte visqueuse est prédominante et le profil de vitesse est considéré comme linéaire. En y introduisant les variables de paroi (I-6) et (I-7), la loi de paroi (I-8) résulte en une relation souvent appelée "loi linéaire":

$$U^+ = y^+ \quad (I. 9)$$

2. **Région tampon** ( $3 < y^+ < 40$ ): Dans la zone extérieure à la sous-couche "laminaire" ( $y^+ > 3$ ) (figure I.2), la loi de paroi (I-8) semble avoir été confirmée dans plusieurs circonstances. Cependant, le problème de l'universalité de cette loi est surtout débattu pour la région tampon. Cette région est certainement plus sensible aux variations des conditions du développement de la couche limite. De plus, dans cette région tampon ("buffer layer"), la contrainte turbulente  $r_t$ , est du même ordre de grandeur que la contrainte visqueuse  $r_p$ .
3. **Région turbulente** ( $y^+ > 40$ ): Dans la région -turbulente (figure I.2), la contrainte visqueuse est négligeable par rapport à la contrainte turbulente. La relation (I.5) qui représente le profil de vitesse  $U(y)$  ne dépend plus que de trois variables. De plus, afin d'assurer le raccordement de cette région avec la région extérieure, il est avantageux d'examiner le comportement suivant:

$$\frac{dU}{dy} = \frac{dU}{dy}(y, r_p, q) \quad (I. 10)$$

L'analyse dimensionnelle délimite cette relation à un seul groupement sans dimension. En introduisant les variables de paroi à ce groupement pour ensuite l'intégrer, on aboutit à la loi logarithmique suivante:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C \quad (I. 11)$$

Déterminées expérimentalement, la valeur de la constante  $x$  de Von Karman est  $0.41$  et celle de la constante  $C$  d'intégration est à peu près égale à  $5$ . Cette relation, faisant partie de la loi de paroi, est donc universelle par définition. De plus, à cause de l'application de cette loi logarithmique, la région turbulente est parfois appelée "région inertielle logarithmique".

### I.2.2 Région externe (loi de vitesses déficitaires) :

De gros tourbillons prédominent la région externe de la couche limite. La contrainte visqueuse, étant négligeable, n'intervient plus de façon explicite. Notons aussi que, dans cette structure, le régime turbulent existe plutôt de façon intermittente. Le phénomène d'intermittence crée des échancrures à l'interface de la couche limite. Par conséquent, l'emplacement de la frontière de la couche limite varie dans une région très étendue ( $0.5 < y/\delta < 1.2$ ). Pour le moment, on s'intéresse plutôt au mouvement moyen de l'écoulement. À cet égard, signalons que le paramètre  $\delta$  exprime donc une valeur moyenne de l'épaisseur de la couche limite.

Afin de permettre un raccordement avec la région interne, une loi compatible avec la loi logarithmique (I.11) a été développée pour cette région externe (figure I.2). Celle-ci appelée la loi de vitesses déficitaires, c'est à dire le déficit de vitesse par rapport à la vitesse extérieure ( $U_\infty - U$ ), est définie comme suit:

$$\frac{U_\infty - U}{U_c} = (5) \arccos 5 = \frac{y}{\delta} \quad (\text{I. 12})$$

Dans la région externe, notons d'abord l'utilisation de l'épaisseur de la couche limite ( $\delta$ ) comme longueur de référence. De plus, signalons que cette relation, contrairement à la loi de paroi appliquée à la région interne, n'est pas universelle. C'est à dire, cette loi de vitesses déficitaires peut être influencée par les variations des conditions dans lesquelles se développe la couche limite.

### I.2.3 Recouvrement:

Tel que vue précédemment, dans une couche limite turbulente, le profil de vitesse de la région interne et de la région externe se comporte de façon indépendante. Toutefois, afin qu'une telle approche soit vraisemblable, il faut une zone de raccordement qui appartient à la fois aux deux régions. C'est à dire, une zone où la loi logarithmique (I-11) et la loi de vitesses déficitaires (I-12) peuvent coexister. Dans la région de recouvrement, le profil de vitesse satisfait simultanément à ces deux lois si le coefficient de frottement, pour sa part, obéit à la relation:

$$U_c = U_{ce} \int \frac{C_f}{2} dx \text{ où } \int \frac{C_f}{2} = \frac{1}{x} \ln \int \frac{C_f U_{ce} \delta}{2} B + C \tag{I.13}$$

Où B et C sont des constantes d'intégration.

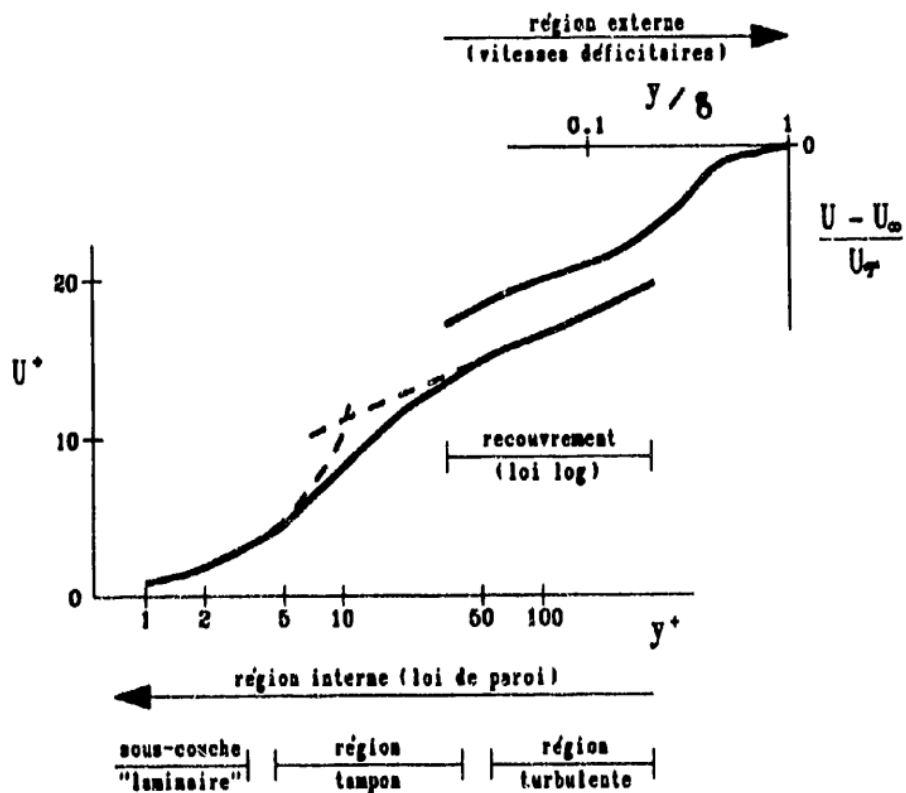


Figure I.2: Profil de vitesse d'une couche limite turbulente [10]

### I.3 Réduction de la traînée au moyen des Riblets:

Les premiers indices concernant la possibilité de réduire la traînée de frottement turbulent à l'aide de fines rainures ou "riblets", furent remarqués suite à des études zoologiques [2].

Comparativement à d'autres espèces, les requins sont reconnus pour leur rapidité de nage. Cette aptitude réduit ainsi leur propre traînée. Ces petites structures ont été observées sur des fossiles de plus de 100 millions d'années. Malgré le fait qu'il y a plus d'une centaine d'années que les biologistes connaissent la forme particulière de ces petites structures, les premiers auteurs à spéculer sur leurs influences dans le domaine de la dynamique des fluides ne fut remarquée qu'à la fin des années 60. Suite à cette discussion, on peut conclure que la nature a développé des surfaces performantes dans la réduction de traînée depuis déjà bien longtemps et encore une fois, il serait avantageux de prendre celle-ci comme modèle.

#### I.3.1 Paramètres géométriques des " riblets":

Orientés parallèlement à un écoulement, des "riblets" sont de fines rainures qui modifient la surface d'une paroi pour réduire la traînée de frottement turbulent (figure I.3). Cette paroi rainurée est généralement obtenue par usinage classique ou en apposant à la surface un revêtement en vinyle.

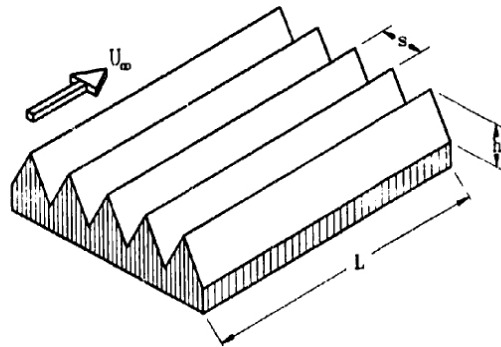
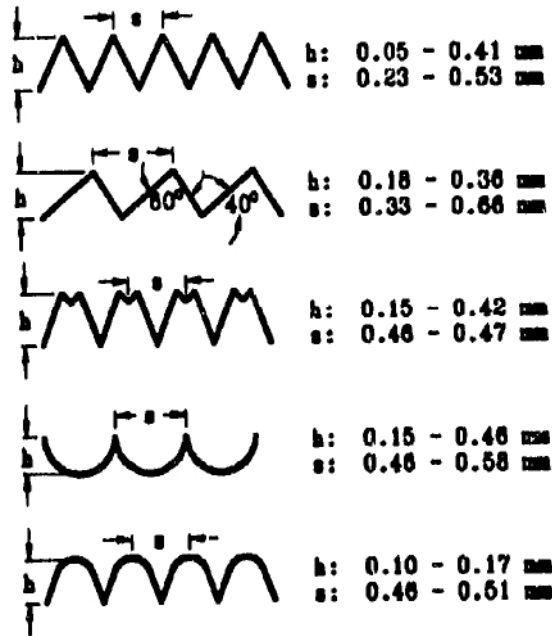


Figure I.3 :Paroi rainurée.

Tel que montré sur la figure I.4, les rainures peuvent prendre différentes formes. Cependant, des études paramétriques intensives, menées à la NASA-Langley par [16] ont montré que les rainures de forme triangulaire sont généralement les plus performantes.



**Figure I.4:** Différentes géométries de "riblets" essayées à la NASA Langley [16].

[3], pour sa part, a effectué des essais expérimentaux utilisant des "riblets" à surfaces tridimensionnelles. Ayant des résultats comparables avec les riblets longitudinaux, ces derniers semblent offrir aucun avantage compte tenu qu'il est plus compliqué de fabriquer ce type de paroi.

Selon [16], il est possible d'améliorer la réduction de traînée si les creux de ces "riblets" sont un peu courbée ou en modifiant les pointes. Cependant, à cause de la petitesse physique de ces micro-structures, il est très difficile de modifier ces "riblets" avec suffisamment de précision sur un rapport optimum de  $h/s = 1$ .

D'ailleurs, des modifications résultent plus souvent par des riblets non uniformes d'où l'efficacité de ceux-ci est plus souvent réduite qu'améliorée. Effectivement, des essais effectués par [6] ont démontrés qu'une courbure aux creux ou un arrondissement des crêtes des "riblets" a plutôt un effet négatif sur la performance de ceux-ci.

Pour ces raisons, les "riblets" triangulaires et symétriques semblent être la forme la plus optimale ainsi que la plus pratique. De plus, une comparaison des "riblets" usinés dans de

l'aluminium avec ceux fabriqués en vinyle a démontré une structure plus uniforme pour la surface en vinyle [16]. D'autres résultats obtenus par [16] ont montré que ces "riblets" restent insensibles à un désalignement inférieur à 15 degrés. Par contre, aucune réduction de traînée n'a été observée pour des angles supérieurs à 30 degrés. Leurs travaux de recherche ont aussi démontré que la performance des "riblets", sur la réduction de traînée, est indépendante des conditions de l'écoulement en amont et du nombre de Reynolds de l'écoulement libre. En fait, la réduction de traînée dépend plutôt des variables de paroi des "riblets" dont l'espacement  $s^+$  et la hauteur  $h^+$ , en unités de paroi, sont définies comme suit:

$$S^+ = \frac{sU_c}{P} \quad (I. 14)$$

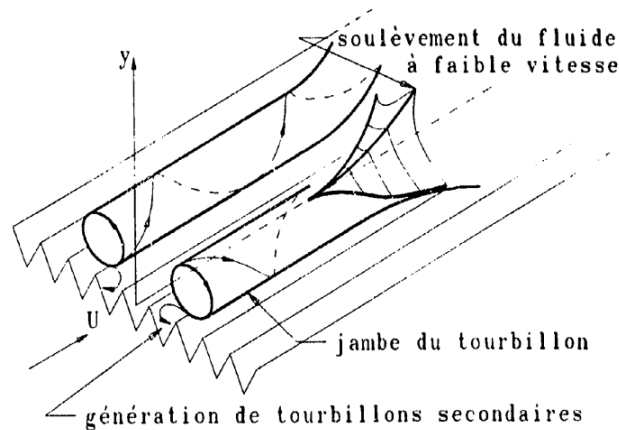
$$h^+ = \frac{hU_r}{P} \quad (I. 15)$$

Utilisant des "riblets" triangulaires, il est possible d'obtenir des réductions du coefficient de traînée lorsque les espacements  $s^+$  des "riblets" sont inférieurs à 30 unités de paroi. Toutefois, des réductions maximums de traînée ont été obtenues pour un espacement ( $s^+=15$ ) et une hauteur ( $h^+=13$ ) de l'ordre de 15 unités de paroi.

Malgré une augmentation de la surface mouillée d'environ 40% [10], les "riblets" réalisent des réductions nettes de la traînée de frottement turbulent. En réalité, si des réductions nettes de l'ordre de 10% sont obtenues en rainurant une paroi, ceci indique une réduction moyenne de 50% sur le coefficient de frottement.

### I.3.2 Mécanismes d'action des "riblets":

Suite à l'interprétation de nombreux résultats obtenus soit par visualisation, soit par anémométrie à fils chauds ou au laser, quelques explications sur les mécanismes d'action des "riblets" ont été proposées. Une première explication a été proposée par [1]. Ces derniers suggèrent la génération de tourbillons secondaires qui affaibliraient les tourbillons contrarotatifs et retiendraient l'écoulement à faible vitesse dans les rainures (figure I.5).



**Figure I.5:** Schéma de l'interaction hypothétique entre les tourbillons contrarotatifs et les "riblets" [1].

Une deuxième explication du mécanisme d'action a été développée par [8] et appuyée par les observations du groupe de la NASA-Langley [17]. On suggère que la réduction de la traînée de frottement provient des faibles vitesses de l'écoulement existant dans les creux des rainures. C'est-à-dire, en maximisant les surfaces à faible frottement, on suppose qu'il est possible d'obtenir une réduction globale par rapport à une surface plane, malgré l'augmentation de la surface mouillée.

En supposant que cette réduction de traînée est causée par ces régions à faible gradient de vitesse, selon [8], cette dernière devrait être aussi valable en écoulement laminaire qu'en régime turbulent. Donc, pour permettre des espacements entre les "riblets" de plusieurs millimètres, ils ont effectué des expériences à des vitesses très faibles, c'est à dire, en régime laminaire. Ceux-ci leur ont alors permis d'effectuer des mesures dans les creux des "riblets". Ces mesures ont été prises avec un vélocimètre à laser. Leurs résultats ont montré une augmentation du gradient de vitesse près des crêtes des "riblets". Par contre, une réduction importante de ce gradient a été mesurée dans les creux des "riblets" ce qui confirme l'hypothèse initialement suggéré. De plus, leurs résultats illustrent des vitesses transversales négligeables dans les creux ce qui élimine la possibilité de tourbillons dans ceux-ci. Une visualisation par injection de colorant a indiqué que l'écoulement sur une paroi rainurée est plus stable et mieux organisé que celui sur une paroi lisse.

Selon [14], la turbulence est presque inexistante dans la moitié inférieure des creux des rainures, Cependant, dans la partie supérieure de ces creux, il y a parfois de fortes fluctuations dans le sens de l'écoulement. Ces fluctuations proviendraient des pénétrations, à grande

vitesse, du fluide. En effet, contrairement à l'écoulement sur une paroi lisse, sur paroi rainurée ce fluide n'atteindrait presque jamais la surface des "riblets" sauf près des crêtes. Pour cette raison, comparativement à une paroi lisse, le frottement sur la surface des "riblets" serait suffisamment réduit pour compenser l'augmentation de la surface mouillée. Il s'en suivrait, par conséquent, des réductions nettes de traînée.

Tout compte fait, ces études démontrent que les "riblets" agissent de plusieurs manières sur la couche limite turbulente et que probablement, il y a plus qu'un seul de ces mécanismes qui contribuent à la réduction de la traînée.

# **Chapitre II : Procédure numérique**

## II.1 Formulation mathématique

### II.1.1 Description du problème physique :

La couche limite turbulente développée sur un profil sera décrite par les équations de Navier Stokes complète. Par l'application de la décomposition de Reynolds, des termes supplémentaires apparaissent, dites tenseurs de Reynolds, et le système devient ouvert. Pour la fermeture, nous allons utiliser le modèle  $k-\epsilon$ . Ce dernier, donne une description plus réaliste des phénomènes d'interaction turbulente en suivant l'évolution de chaque paramètre turbulente par des équations de transport.

### II.1.2. Equations gouvernantes :

Les équations régissant le problème sont les équations de continuité, qui expriment la conservation de masse, et de quantité de mouvement. Pour une formulation simple du problème, nous allons supposer quelques hypothèses.

#### II.1.2.1 Hypothèses simplificatrices :

Nous supposons, alors, que :

- l'écoulement est permanent.
- l'écoulement est bidimensionnel.
- l'écoulement est incompressible
- le fluide est visqueux.
- absence de transfert de chaleur.
- Compte tenu des hypothèses précédentes, les équations de base régissant l'écoulement sont
- données respectivement par :

#### II.1.2.2. Equation de continuité :

**II.1.2.3. Equation de quantité de mouvement suivant x :**

$$\frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.2})$$

**II.1.2.4. Equation de quantité de mouvement suivant y**

$$\frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.3})$$

Pour résoudre le système d'équations (II.1), (II.2) et (II.3), une approche statistique sera utilisée. Elle consiste à décomposer chaque grandeur des équations de Navier-Stokes en une grandeur moyenne et une fluctuation [6].

$$\left( \Phi = \overline{\Phi} + \Phi' \right)$$

Où  $\Phi$  représente  $p$ ,  $u$  et  $v$ .

Le système d'équations (II.1), (II.2) et (II.3) devient :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.4})$$

$$\frac{\partial (\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'v'})$$

$$\frac{\partial (\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{v})}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'v'})$$

Les équations moyennées font apparaître des termes de corrélations doubles des fluctuations. Ils proviennent de la non-linéarité des équations de bilans. Ces termes, appelés tensions de Reynolds, traduisent l'effet de la turbulence sur l'évolution du mouvement moyen et rendent les systèmes d'équations ouverts (plus d'inconnues que de relations). C'est la conséquence de la prise de moyenne des équations instantanées qui introduit une perte d'information. Se pose alors le problème de la fermeture du système, c'est-à-dire du lien entre les corrélations doubles et le champ moyen [14].

Il existe plusieurs modèles de fermeture. On utilise le modèle k-epsilon.

### II.1.3 Modèle k –epsilon :

Le modèle  $k - \epsilon$  est un des modèles les plus utilisés pour la modélisation de la turbulence. C'est un modèle à deux équations de transport proposé par Jones et Lauder (1972) qui se base sur le concept Boussinesq (1877) [12]. Il utilise la viscosité turbulente pour relier les contraintes de Reynolds et les termes de flux turbulents aux variables moyennes de l'écoulement, et emploie l'hypothèse du gradient de diffusion pour relier les contraintes de Reynolds aux gradients de vitesse moyennes et à la viscosité turbulente :

Concept de Boussinesq :

$$\overline{u_i' u_j'} = v_t \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \frac{2}{3} v_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (\text{II.5})$$

La viscosité turbulente est modélisée en fonction d'une échelle de longueur turbulente  $l_t$  et d'une échelle de vitesse turbulente  $v_t$

$$v_t = C_\mu \cdot l_t \cdot \epsilon \quad (\text{II.6})$$

Dans ce modèle l'échelle de vitesse  $v_t$  est calculée à partir de l'énergie cinétique turbulente  $k$ . L'échelle de longueur de turbulence est estimée à partir de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation  $\epsilon$ .

Echelle de vitesse :

$$v_t = \sqrt{k} \quad (\text{II.7})$$

$$l_t = \frac{\sqrt{k^3}}{\epsilon} \quad (\text{II.8})$$

Echelle de longueur de turbulence :

En effet, la viscosité turbulente est :

$$v_t = C_\mu \frac{K^2}{\epsilon} \quad (\text{II.9})$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\epsilon} \quad (\text{II.10})$$

### II.1.3.1 Equation d'énergie cinétique turbulente :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\Phi} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + p_k - \rho \varepsilon \quad (\text{II.11})$$

$$\leftarrow 1 \rightarrow \quad \leftarrow 2 \rightarrow \quad \leftarrow 3 \rightarrow \quad \leftarrow 4 \rightarrow$$

$$P_k = \mu_i 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^2$$

- (1) représente le taux de variation de l'énergie cinétique  $K$ .
- (2) représente le transport par diffusion de l'énergie cinétique.
- (3) représente la production de l'énergie cinétique turbulente par cisaillement.
- (4) représente la dissipation de l'énergie cinétique turbulente  $K$ .

### II.1.3.2 Equation du taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\Phi} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_1 \varepsilon}{k} P_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.12})$$

$$\leftarrow 1 \rightarrow \quad \leftarrow 2 \rightarrow \quad \leftarrow 3 \rightarrow \quad \leftarrow 4 \rightarrow$$

- (1) représente le taux de variation de  $\varepsilon$ .
- (2) représente le transport par diffusion de la dissipation de l'énergie cinétique.
- (3) représente le taux de production de  $\varepsilon$ .
- (4) représente la dissipation  $\varepsilon$

Où les constantes du modèle ci-dessous, d'après Launder et Spalding (1974), sont réunies dans le tableau suivant

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.33

**Tableau II.1** : constantes du modèle de turbulence  $k-\epsilon$  standard

Donc le système devient :

- **Equation de continuité :**

$$\left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{II.13})$$

- **Equation de quantité de mouvement suivant x :**

$$\frac{\partial(\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.14})$$

- **Equation d'énergie cinétique turbulente :**

$$\frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{v})}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.15})$$

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

$$\frac{\partial u k}{\partial x} + \frac{\partial v k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_k \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_k \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_k - \epsilon \quad (\text{II.16})$$

#### II.4 Conditions aux limites :

Dans des calculs avec le système des équations de mouvement d'un fluide, on rencontre principalement trois types de frontières différentes: les parois solides, les frontières libres et des plans de périodicité. Pour chacune de ces frontières, les conditions aux limites doivent fournir de l'information sur l'état des champs à l'extérieur du domaine d'intégration au calcul dans le domaine [25]. Pour notre cas les conditions de périodicité n'interviennent pas.

## II.2. Présentation des logiciels de calcul

Gambit et Fluent sont des logiciels, sous licence commerciale, permettant de réaliser des simulations 2D ou 3D en mécanique des fluides allant de la construction du maillage avec Gambit à la résolution des équations de Navier Stokes et au post traitement avec Fluent. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, etc...) en raison de leur interface graphique puissante et de l'abondance de leurs options, ils permettent de réaliser des simulations sur tous types de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs et avec des modèles physiques variés (diphasique, turbulent, etc...).

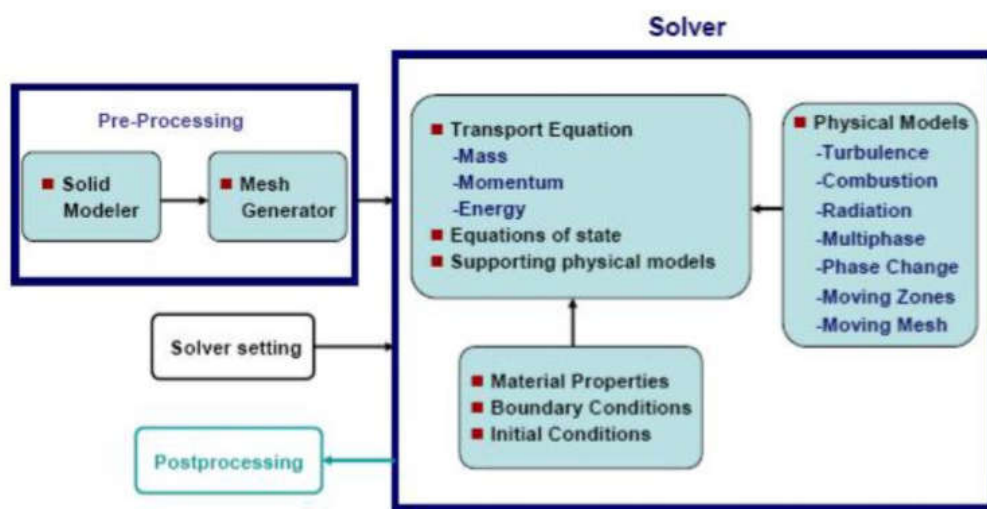


Figure 2.1 : Processus de simulation

### II.2.1. Le pré-processeur Gambit

C'est un pré processeur intégré pour l'analyse en CFD, il est utilisé pour construire une géométrie et générer son maillage (structuré ou non structuré, en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques), il peut réaliser des maillages complexe en deux ou trois dimensions avec des maillages rectangle ou triangle.

Les options de génération de maillage de Gambit proposent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon Gambit génère automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite.

## II.2.2. Construction du maillage sous GAMBIT

La première étape dans le processus de génération du maillage consiste à tracer le profil dont on souhaite évaluer les performances. On définira ensuite l'espace qui entoure le profil avant de mailler les différentes faces ainsi créées.

### ❖ Importer la géométrie :

On importe les points définissant le profil. Ces points sont les valeurs de coordonnées données. Cela donne la répartition des points sur le profil comme suit :

Connectez tous ces points en créant une courbe représentant le profil souhaité.

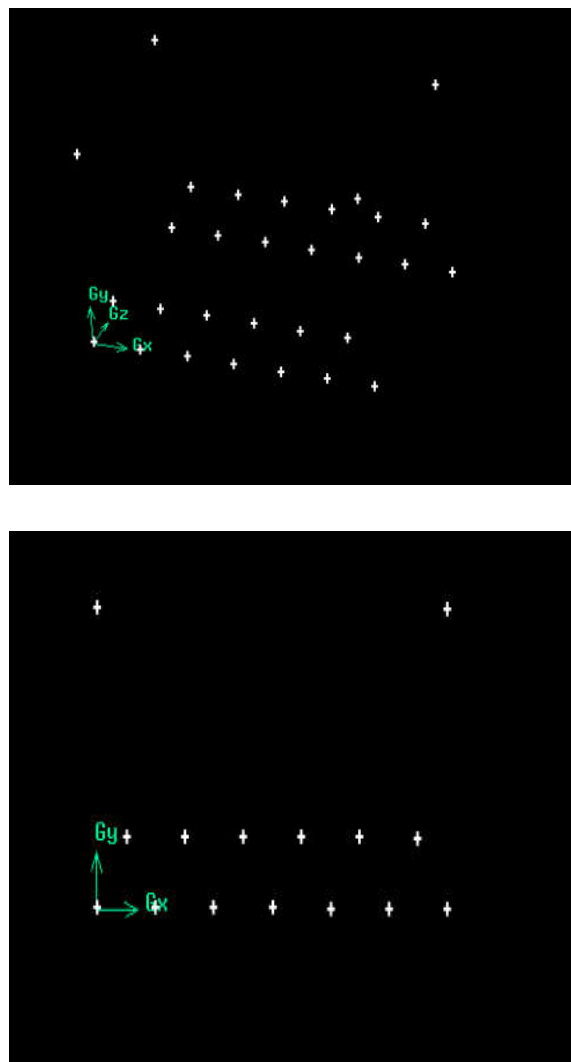


Figure II.2: répartition des points sur le profil

### ❖ Définir un domaine de calcul

Pour un problème de ce type, nous optons pour le maillage. On définit tout d'abord l'enveloppe extérieure. Cela fait par construire tous les points et segments de droite nécessaires à la construction d'un tel maillage,

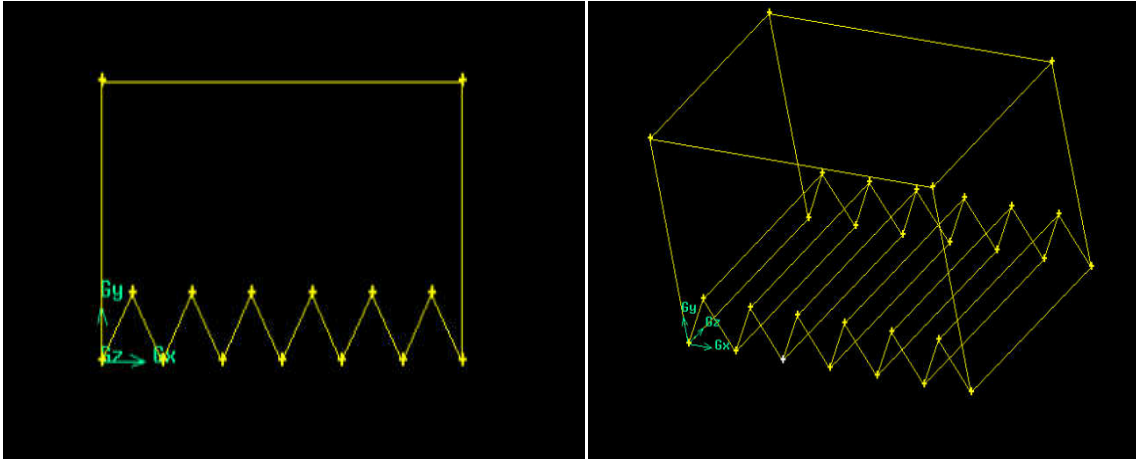


Figure II.3 : géométrie de profil

### ❖ Créer un blocking

Dans cette étape nous devons créer des blocs ou bien des faces qui entourent le profil. Chaque face est créée en assemblant tous les segments qui la composent.

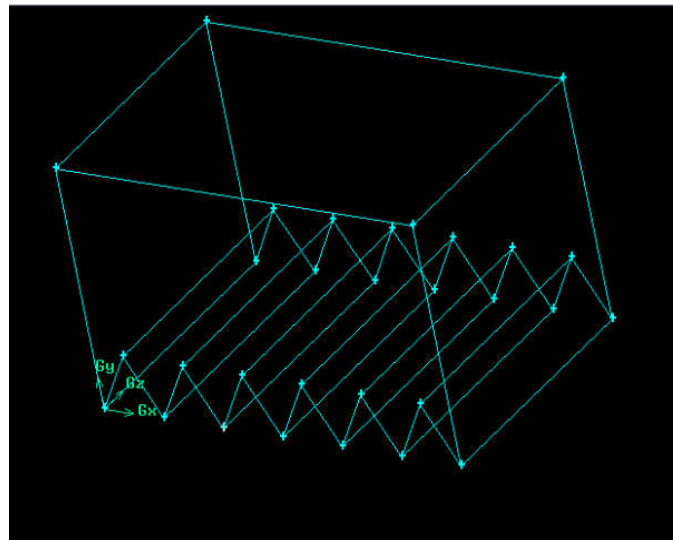
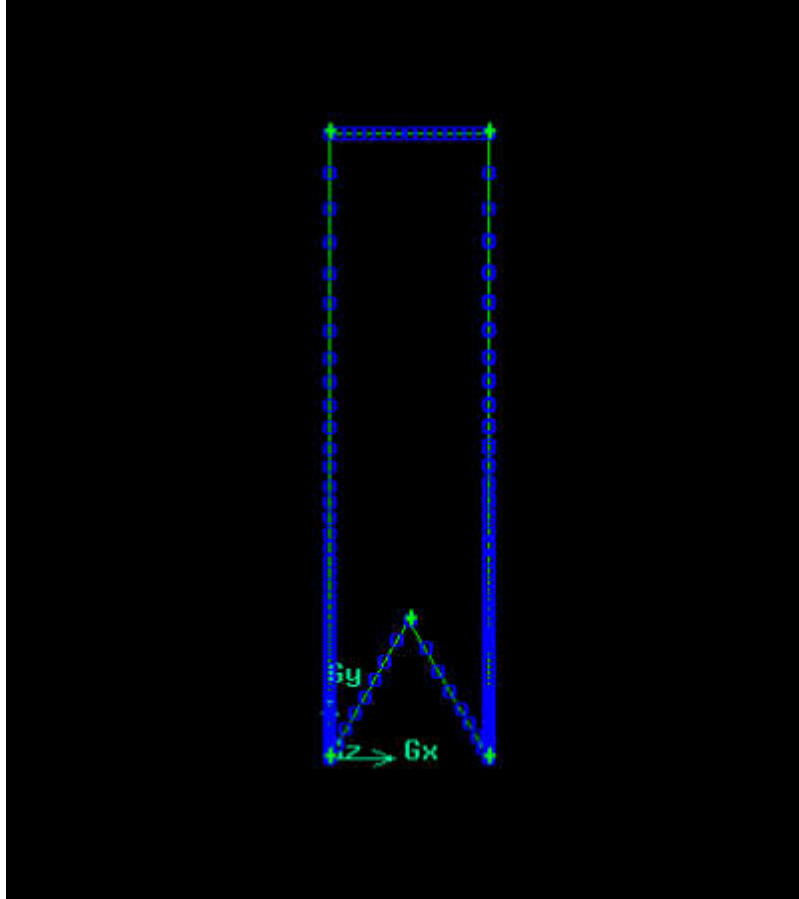


Figure II.4 : frontières de domaine de calcul

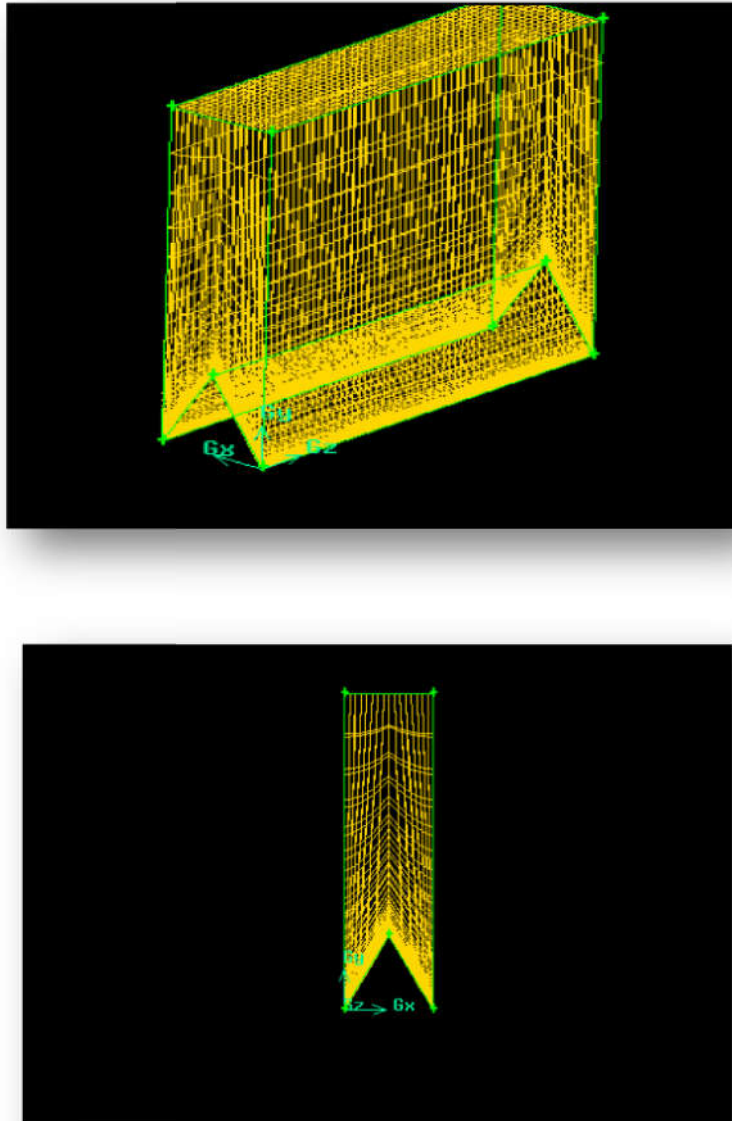
### ❖ Générer le maillage

Commençons par mailler les segments qui définissent le profil avec même nombre des points.



**Figure II.5 :** *faces entourant le profil*

Il ne reste plus qu'à mailler le reste du domaine de calcul. On utilise ici des maillages structurés quadrangulaires (« *quad-map* » pour Gambit). On commence par mailler les segments en veillant à imposer le même nombre de points de discrétisation sur les segments se faisant face. Il faut également doser l'espacement des points sur les différents segments de manière à obtenir un maillage régulier avec des mailles peu .Les lignes de réseau d' pessimiste de paroi sont plus proches que les lignes hon de paroi.

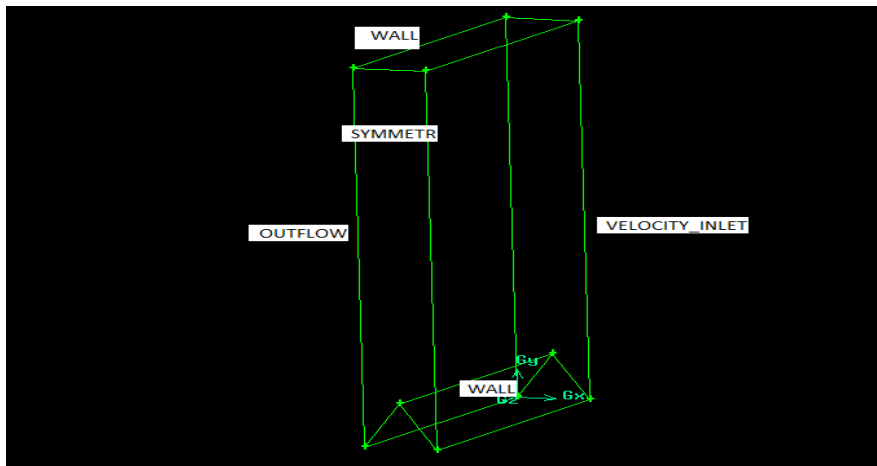


**Figure II.6 :** Mailler les segments des faces

#### ❖ Proposer les conditions aux limites

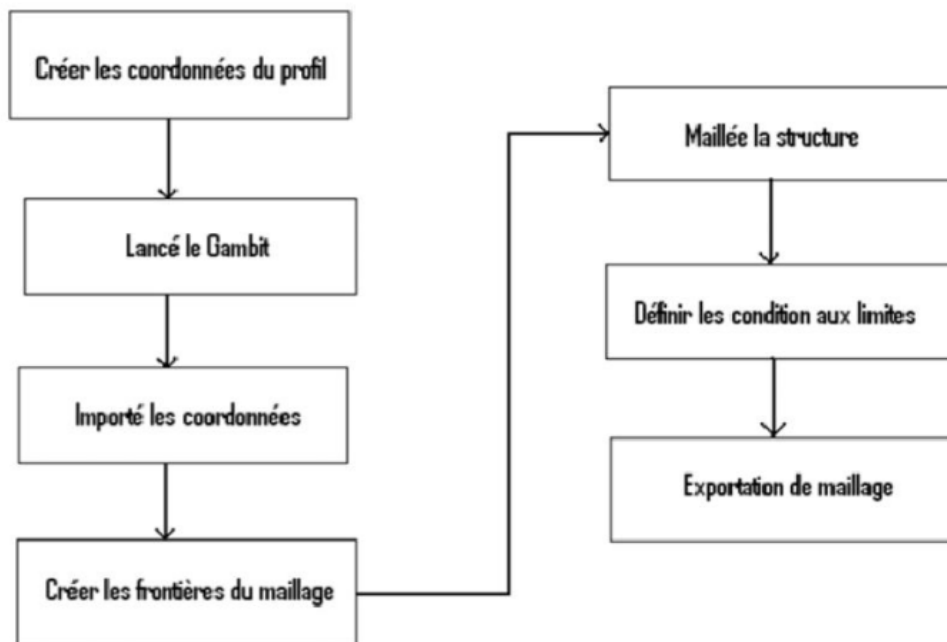
Il faut définir le type de conditions aux limites que l'on souhaite imposer sur les différentes limites du domaine de calcul. On commence par choisir le solveur qui sera utilisé par la suite : Solver/Fluent5/6. Sur le profil, on imposera des conditions.

(« Wall »). Riblet te fac on supposera connue la vitesse de l'écoulement et on imposera des conditions aux limites de type vitesse imposée (« Velocityinlet ») interne la sortie du domaine de calcul,(Outflow) .externe (symmetr) la cote Ces différents choix sont récapitulés ci-dessous.



**Figure II.7 :** Les conditions aux limites

Lorsque le maillage est terminé et que les conditions aux limites sont correctement imposées, il ne reste qu'à exporter ce maillage dans un format lisible par le solveur Fluent en l'occurrence. Ceci se fait par la commande File/Export/Mesh qui permet d'écrire un fichier de maillage avec l'extension .msh. Cochez l'option « Export 2-D mesh ».



**Figure II.8 :** Processus de génération d'un maillage dans le GAMBIT

### II.2.3 Le solveur Fluent

Une fois que le maillage pour notre problème est terminé, il faut passer à la résolution des équations du problème. Ces équations sont résolues au moyen d'un programme que l'on appelle solveur. Le solveur que nous avons utilisé pour notre problème est FLUENT. Ce solveur utilise la méthode des volumes finis. Cette méthode est souvent utilisée pour la résolution de problèmes d'écoulements numériques.

L'interface de FLUENT est relativement simple dans sa prise en main. Il faut commencer par importer un maillage sur lequel travailler. Une fois le maillage en place, on définit les paramètres nécessaires pour le calcul. On choisit le modèle physique du problème. On donne les paramètres initiaux comme le nombre de Mach. On règle les conditions initiales et aux limites. Selon le modèle, il faut aussi paramétrer la turbulence. Puis on lance le calcul. FLUENT contient également un outil de visualisation des résultats qui permet d'afficher les champs de pression, vitesse et autres.

La génération du calcul dans «FLUENT» passe par les étapes suivantes :

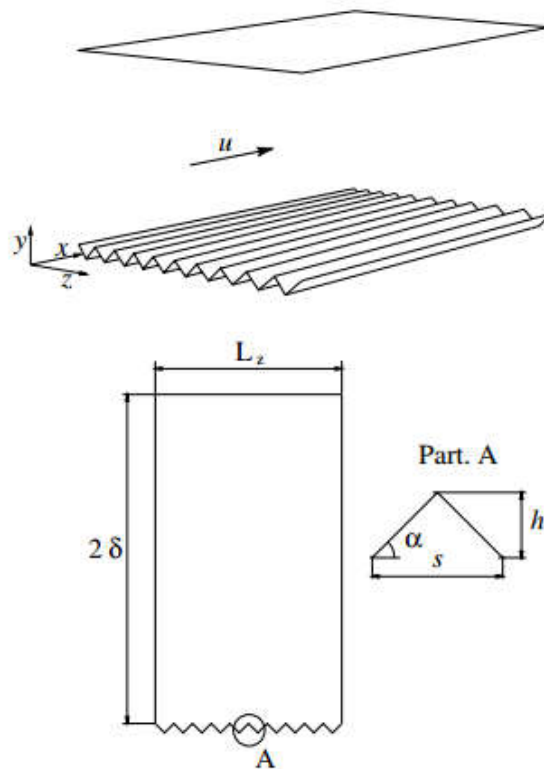
1. Charger la géométrie par Fluent. File Read Case
2. Vérification du maillage. Grid Check
3. Afficher le maillage. Display Grid
4. Définir le Model de solution. Define Solver
5. Définir le Model de Turbulence. Define Models Viscous
6. Définir la Matière. Define Materials
7. Définir les conditions aux limites. Define Boundary Conditions
8. Choix du control de solution. Solve Controls Solution
9. Enregistrer les informations liées au problème. File write Case & dat  
Le fichier Case (regroupe toutes informations liées à la géométrie).  
Le fichier dat (contient tous les paramètres et données des calculs).
10. Initialiser le calcul. Solve Initialize Initialize
11. Vérifier les résidus des calculs. Solve Monitors Residual
12. Choisir du nombre des itérations et lancer les calculs. Solve Iterate
13. Post traitement des résultats. (Display, Plot, Report etc ).



# **Chapitre III : Résultats et discussions**

Dans ce chapitre on présente les résultats de notre étude concernant la couche limite turbulente développée sur deux types de parois : lisse et rainuré. La distribution de vitesse, de pression et de l'énergie cinétique turbulente sur ces types de parois sont déterminées en recherchant l'influence des riblets ces derniers. Cependant, on présente à part le maillage obtenu à partir de notre code de calcul, les résultats obtenues par Fluent.

Les riblets se présentent sous la forme de surfaces striées ou rainurées longitudinalement, c'est-à-dire dans le sens de l'écoulement. Le plus grand nombre d'essais en soufflerie a été mené à bien avec des rainures de forme triangulaire où  $s$  dénote l'espacement entre deux rainures,  $h$  la profondeur des rainures et  $L$  la longueur de couche limite turbulente manipulée figure (III.1).



**Figure III.1 :** Représentation du problème étudié

### III.1 Validation du code de calcul

Pour valider notre code de calcul, la distribution de la vitesse sur une rainure est comparée aux résultats calculés Kim et al. présent dans la figure (III-2). La figure (III-3) démontre une bonne concordance entre les deux résultats.

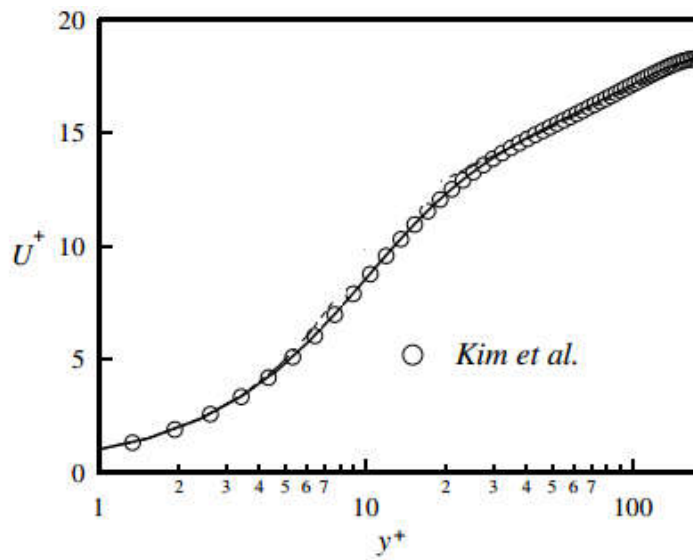


Figure III.2 : la distribution de vitesse dans une paroi rainurée d'après Kim et al.

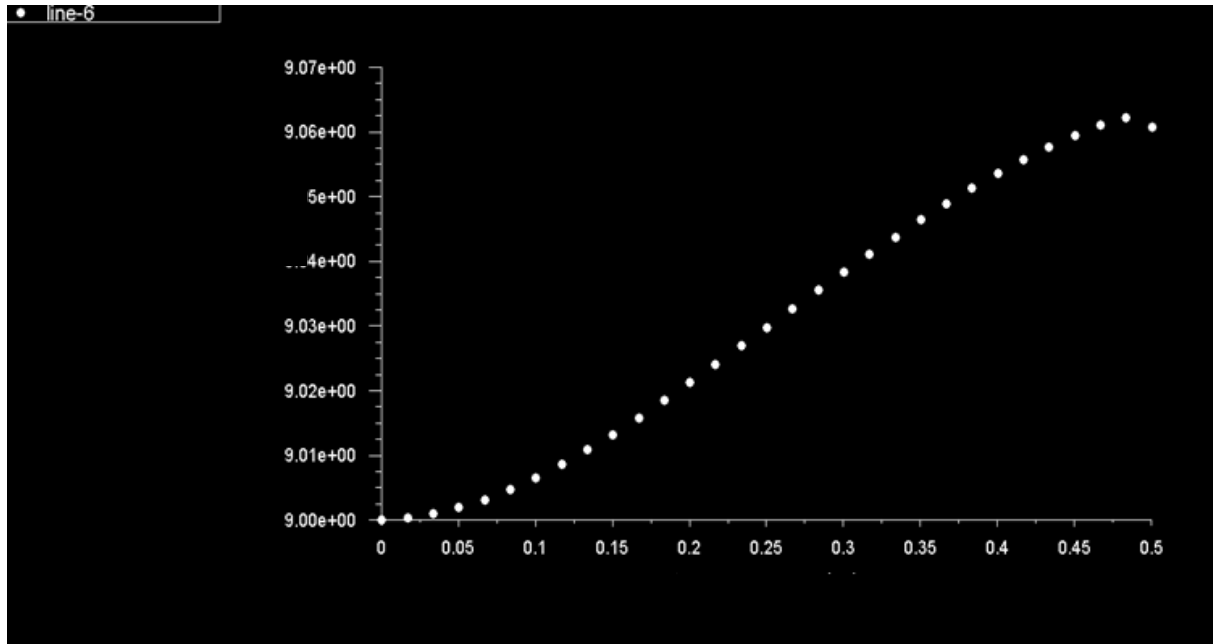
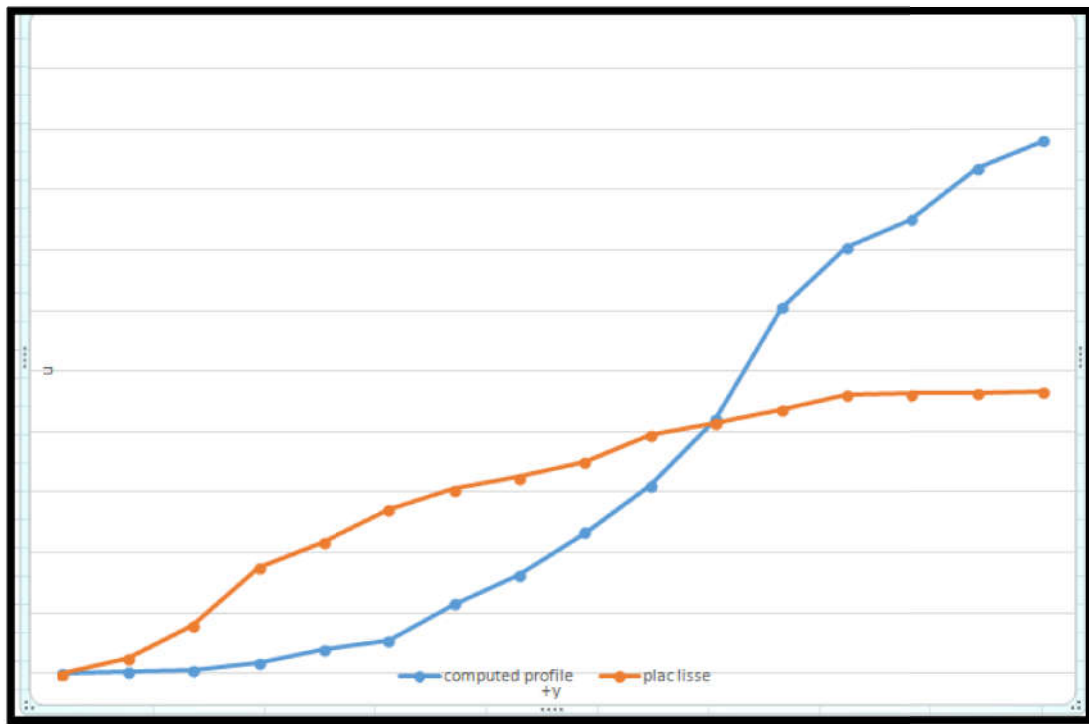


Figure III.3 : la distribution de vitesse dans une paroi rainurée calculés par fluent.

### III. 2 Evolution du profil de vitesse

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 figure (III.3).



**Figure III.4: Comparaison entre la distribution de vitesse dans une plaque plane et rainurée**

### III.3 Evaluation du champ de pression

Les figures (III.5) et (III.6) représentent la distribution de pression statique sur les deux types de parois. Comme la vitesse et la pression sont liées par l'équation de Bernoulli, on voit que la vitesse augmente aux endroits à faible pression et diminue dans les zones à haute pression.

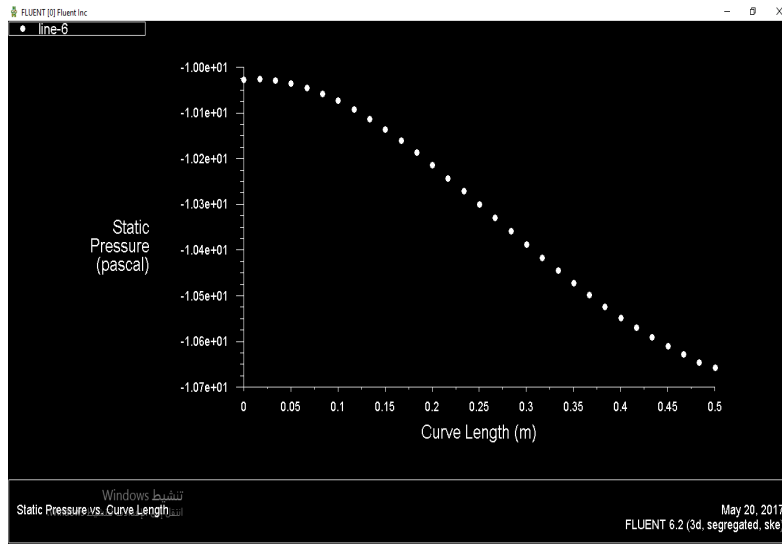


Figure (III.5) : Représentation de la distribution de pression statique dans une paroi rainurée.

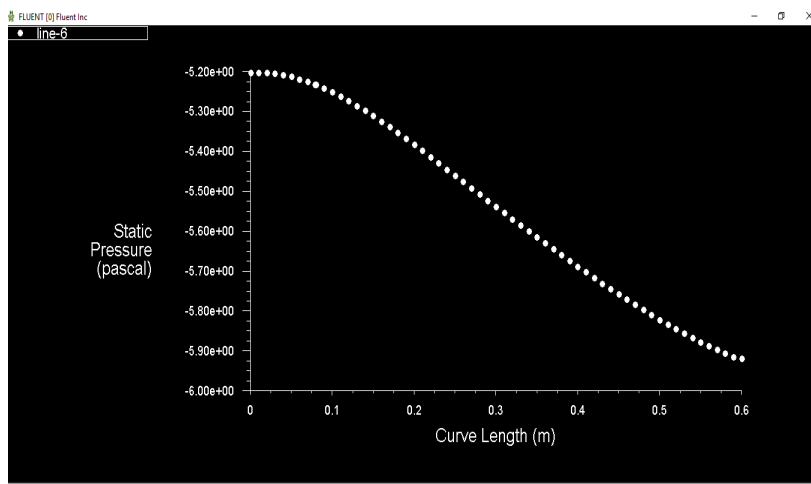
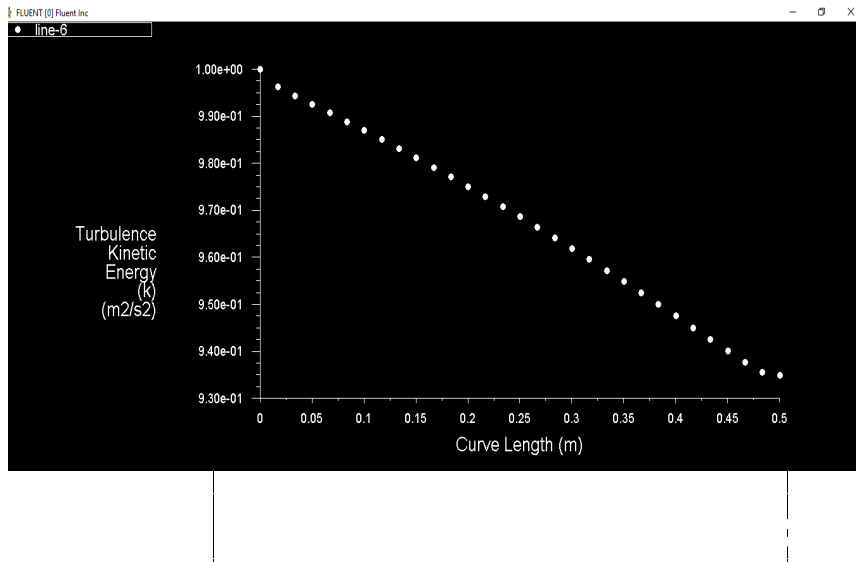


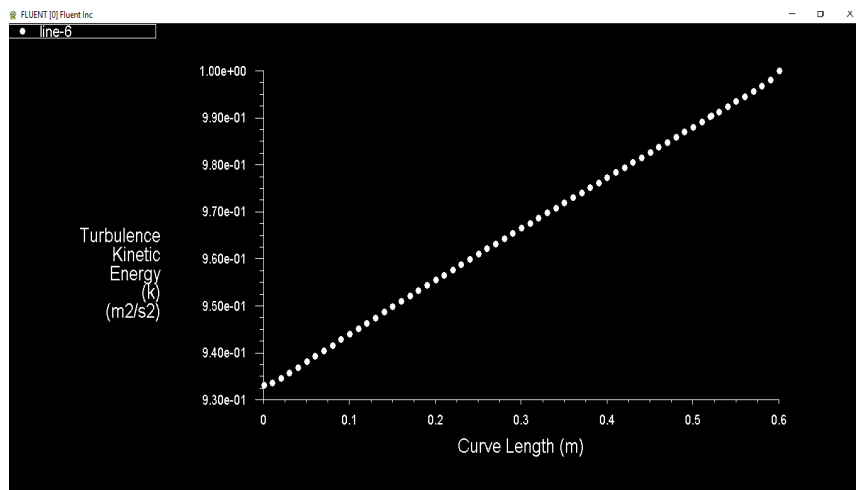
Figure (III.6) : Représentation de la distribution de pression statique dans une plaque lisse.

### III.4 Evaluation de l'énergie cinétique turbulente

Plusieurs explications ont été avancées concernant les mécanismes d'action de ces parois rainurées : effets d'origine purement visqueuse (les rainures induiraient dans les creux une région où l'écoulement est fortement ralenti, donc où le frottement est faible) ou modification de la structure de la turbulence au sein de la couche limite (restructuration de l'écoulement dans la région de paroi, écoulement moins tridimensionnel, diminution de l'agitation turbulente. . .).

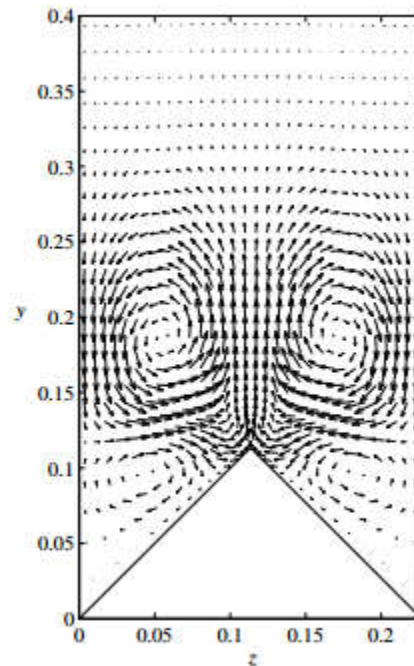


**Figure (III.7) :** Représentation de la distribution de l'énergie cinétique turbulente dans une paroi rainurée.



**Figure (III.8) :** Représentation de la distribution de l'énergie cinétique turbulente dans une plaque lisse.

### III.5 l'effet des parois rainurées sur l'écoulement turbulent



**Figure (III.9) :** Représentation graphique de l'effet des parois rainurées sur l'écoulement turbulent.

Il est clair également que les rainures modifient la structure de la turbulence au voisinage immédiat de la paroi. Les résultats, dans la région de paroi, sont tracés en variables réduites sur la figure (III.9) ; l'abscisse  $y$  caractérise la distance du point de mesure à la paroi de la rainure suivant une direction perpendiculaire au plan des crêtes. Au-dessus d'une crête, le gradient de vitesse longitudinale est augmenté de presque 100 %, alors que dans le creux, la réduction est si importante que la pente du profil de vitesse est pratiquement nulle

### III 6 Conclusion

La simulation numérique directe, qui résout par les équations de Navier–Stokes sans faire, a été utilisée : elle s'avère très utile, car aux approximations numériques près, elle reflète, en principe, le comportement réel de l'écoulement même dans ses détails les plus fins. Les simulations d'un écoulement dont une paroi était rainurée ont permis de vérifier certaines observations expérimentales sur la modification de l'écoulement turbulent



## conclusion

D'un point de vue pratique, les différentes techniques de réduction du frottement et de la turbulence dans un écoulement ne trouvent pas toutes un champ d'application, du fait des difficultés de leur mise en œuvre. Malgré cela, on continue à développer des études, utilisant certaines de ces techniques, dans le but de mieux comprendre les mécanismes responsables de cette réduction. De nombreux travaux réalisés sur les "manipulateurs" de couche limite turbulente, ont été consacrés à la comparaison ou l'optimisation de dispositifs permettant une réduction maximale du frottement. Mais depuis une vingtaine d'années, les études expérimentales et numériques, se sont attachées essentiellement à l'identification et à la compréhension des effets de ces dispositifs sur les mécanismes turbulents en couche limite et en définitive aux processus qui sont à la base de cette réduction.

En perspective on propose de faire une étude Dans le domaine de la réduction de traînée, la diminution du frottement constitue un enjeu considérable pour les applications aéronautiques industrielles futures. pour les applications aéronautiques industrielles futures. Parmi tous les procédés passifs envisagés pour contrôler, manipuler la couche limite turbulente en vue d'atteindre un tel objectif, les parois rainurées ou riblets ont montré un fort potentiel, faisant suite à de nombreux travaux réalisés pendant ces deux dernières décennies dans des laboratoires de recherche.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] **BACHER, E.V.; SMITH, C.R. (1985) - "A combined visualization-anemometry study of the turbulent drag reducing mechanisms of triangular micro-groove surface modifications" -*AIAA Shear Flow Control Conférence* - AIAA-85-0548, pp. 1-10.**
- [2] **BECHERT, D.W.; 13ARTENWERFER M. (1989) - "The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs" - *J. Fluid Mech.* - Vol. 206, pp. 105-129.**
- [3] **BECFIERT, D.W. (1987) - "Experiments on three-dimenslonal riblets" - *International Conférence, The Royal Aeronautical Society, Vol. 2, pp. 425-431.***
- [4] **CHOI, KWING-SO (1989) - "Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets" - *J. Fluid Mech.* - Vol. 208, pp. 417-458.**
- [5] **COUSTEIX2, J. (1989) - "Couche limite laminaire" - *Collection La Chevêche - Cepadues -Éditions.***
- [6] **COUSTOLS, E.; COUSTEIX, J.; BELANGER, J. (1987) - "Drag reduction performance on riblet surfaces and through outer layer manipulators" – *International Conférence, The Royal Aeronautical Society, Vol. 2, pp. 250-289.***
- [7] **COUSTOLS, E.; COUSTEIX, J. (1986) -"Réduction du frottement turbulent: modérateurs de turbulence" - *La Recherche Aérospatiale, No. 2, pp. 145-160.***
- [8] **FULACHIER, L.; DJENIDI, L.; ANSELMET, F. (1987) - "Couches limites sur parois rainurées longitudinalement ("riblets")" - 24' *Colloque d Aérodynamique Appliquée Poitiers, pp. 1.16.***
- [9] **HINZE, J.O. (1975) - "Turbulence" - *McGraw Hi l Ed.***
- [10] **NGUYEN, V.D. (1988) - "Sur les techniques de réduction de la traînée de frottement par la manipulation de la couche limite" - 56e *Congrès de l'ACFAS.***
- [11] **PULLES, C.J.A. (1988) - "Drag reduction of turbulent boundary layers by means of grooves surfaces" - *Ph.D Thesis, Technical University of Eindhoven.***
- [12] **SAWYER, W.G.; WINTER, K.G. (1987) - "An investigation of the effect on turbulent skin friction of surfaces with streamwise grooves" - *International Conférence, 7he Royal Aeronautical Society, Vol. 2, pp. 330-362.***
- [13] **SCHLICHTING, H. (1968) - "Boundary layer theory" - *McGraw Hill Ed.***

- [14] VUKOSI.AVc EVii, P.; WALLACE, J.M.; BALINT, J.-L. (1987) - "On the mechanism of viscous drag reduction using streamwise aligned riblets: a review with new results" - International Conférence, The Royal Aeronautical Society, Vol. 2, pp. 290-309.
- [15] WALSH, M.J. (1982) - "Turbulent boundary layer drag reduction using riblets" - A. IAA 20'h Aerospace Sciences Meeting AIAA-82-0169
- [16] WALSH, M.J.; LINDEMANN A.M. (1984) - "Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction" - AL4A 22"d Aerospace Sciences Meeting - AIAA-84-0347.
- [17] WILKINSON, S.P.; ANDERS, J.B.; LAZOS, B.S.; BUSIINELL, D.M, (1987) - "Turbulent drag reduction research at NASA Langley - progress and plans -" - International Conférence, The Royal Aeronautical Society, Vol. 1, pp. 1-32.
- [18] KIM, H.T.; KLINE, S.J.; REYNOLDS, W.C. (1971) - "The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer" - *J. Fluid Mech.*, Vol. 50, Part 1, pp. 133-160.



**Titre du mémoire:** Réduction de frottement dans une couche limite au moyen des Riblets

**Master :** Energétique et Énergies renouvelables

**Auteur:** hada abdelouahed , guerfi khaled

**Mots clés:** Riblets, formes géométriques, couche limite turbulente, vitesse.

**Résumé:**

Dans cette étude, nous avons mené une simulation de l'écoulement dans une couche limite turbulente sur une paroi rainurée. Ce type est l'un des types de contrôle de la couche limite pour modifier les propriétés du champ de vitesse, ce qui conduit à une réduction de coefficient la frottement. La modélisation effectuée par le code de calcul (FLUENT) a été en veillant à la compatibilité de notre étude avec les études précédentes.

---

**Report title:** Friction reduction in a boundary layer using Riblets

**Keywords:** Riblets, geometric shapes, turbulent boundary layer, velocity

**Abstract:**

In this study, we conducted a numerical study of flow through a triangular Riblet. This type of disturbance is considered a type of control of the turbulent boundary layers of changing the characteristics of the velocity field, which leads to reduction of the friction coefficient is modeled by Fluent.

---

**عنوان المذكرة:** الحد من الاحتكاك في طبقة الحدود عن طريق مجرى مثلثي

**الكلمات المفتاحية:** المجرى المثلثي, الشكل الهندسي, الطبقة الحدية المضطربة, السرعة.

**الملخص:**

في هذه الدراسة قمنا بإجراء دراسة عددية للجريان عبر صفيحة ذات مجرى مثلثي هذا النوع يعتبر من أنواع مراقبة الطبقات الحدية المضطربة من اجل تغيير خصائص حقل السرعة مما يؤدي إلى تخفيض معامل الاحتكاك. تتم النمذجة بواسطة (Fluent) وقد تم التأكد من توافق دراستنا مع الدراسات السابقة.