

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPLUAIRE**

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université d' EL-Oued



Faculté des Sciences et Technologies

Département de Génie Mécanique

## ***MEMOIRE DE FIN D'ETUDE***

En vue de l'obtention du **diplôme licence académique**

Spécialité : mécanique énergétique

### **THEME**

# **ETUDE DE LA COUCHE LIMITE TURBULENTE SUR UNE PAROI RAINUREE**

Présenté par :

LAOUINI TAHAR

BEN DOUIEM SOUFIEN

Dirigé par:

M<sup>m</sup> : BERKANE HOUDA

Session:2012/2013

# REMERCIEMENTS

Avant tout nous tenant à remercier **Dieu** le tout puissant de nous avoir donné le courage et la force pour bien mener ce modeste travail.

Nous remercions notre encadreur M<sup>m</sup> **Berkane Houda** d'avoir accepté de nous encadrer ainsi que pour leur conseils instructifs et leur patience.

Nos remerciements sont également destinés aux membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenant à remercier nos **cher parents**, pour leur soutien moral et financier.

Enfin, pour toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la bonne conduite de ce projet.

## **DEDICACE**

Je dédie ce modeste travail :

**A** mes chers parents.

**A** mes chers frères.

**A** tout ma grande famille.

**A** tous mes amis, pour leur sincérité et leur gentillesse.

**A** mon binôme soufien.

**A** tout le groupe de génie mécanique.

**Laouini tahar**

## **DEDICACE**

Je dédie ce modeste travail :

**A** mes chers parents.

**A** mes chers frères.

**A** tout ma grande famille.

**A** tous mes amis, pour leur sincérité et leur gentillesse.

**A** mon binôme Tahar.

**A** tout le groupe de génie mécanique.

**Ben Douiem Soufien**

# NOMENCLATURE

## Caractères usuels

$L$	longueur de la plaque	$m$
$p$	Pression	$kg/ms^2$
$S$	distance entre deux plans parallèles	$m$
$U, V$	composantes de vitesse	$m/s$
$S^+$	espacement	$m$
$h^+$	hauteur	$m$
$y^+$	coordonnée normale	$m$

## Caractères grecs

$\delta$	épaisseur de la couche limite dynamique	$m$
$\mu$	viscosité dynamique	$kg/ms$
$\nu$	viscosité cinématique	$Kg/m^3$
$s$	surface de controle	$m^2$
$\tau$	tenseur des contraintes visqueuses	$kg/ms^2$
$\phi$	fonction de dissipation visqueuse	$m^2/s$
$\eta$		

## NOMBRES SANS DIMENSION

$C_f$	coefficient de frottement local	$\tau_w/(1/2) \rho U_e^2$
$Re$	nombre de Reynolds	$\rho U_o L/\mu$
$C, B$	constant	

# Introduction

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 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".

Ce travail est décomposé en 3 chapitres :

Dans le premier chapitre, on présente les différentes techniques de réduction de traînée pour les écoulement turbulents externes. On présente une brève description de la couche limite turbulente.

Au deuxième chapitre, on donne une description des logiciel de calcul.

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

Enfin, des conclusions sur les résultats seront présentées.

## Chapitre I

# RÉDUCTION DE LA TRAÎNÉE DANS LES ÉCOULEMENTS EXTERNES AU MOYEN DE "RIBLETS"

### I.1. 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.

#### I.1.1. Définition et régimes d'écoulement

La théorie de la couche limite a été introduite par Ludwig Prandtl au début du 20<sup>ième</sup> siècle [12]. 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 [12] comme exemple, examinons un cas bien connu qui est celui d'un écoulement sur une plaque plane (figure 1.1). 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 ( $u \approx 0.995 U_\infty$ ).

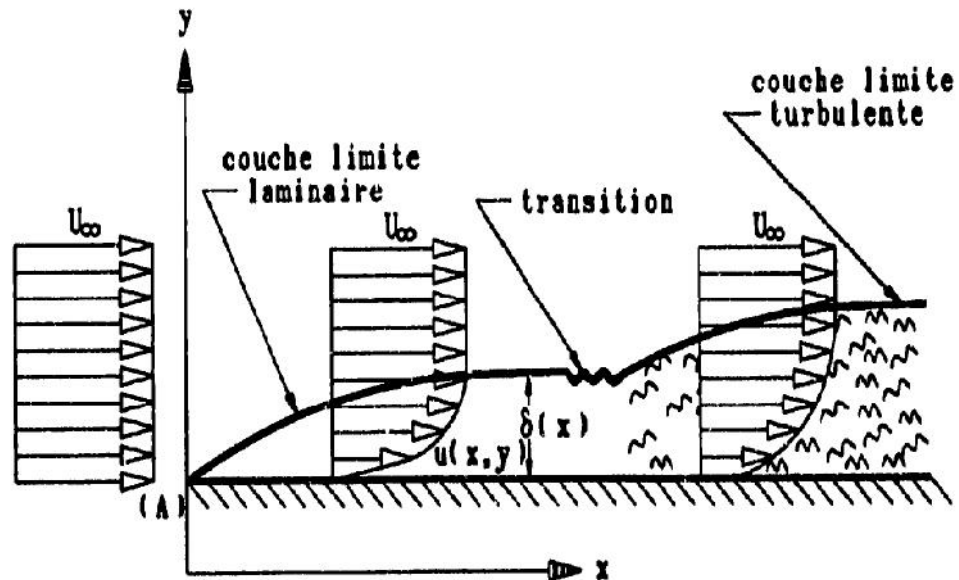


Figure 1.1 : Développement d'une couche limite le long d'une plaque plane.

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:

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

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 [06]. Signalons d'abord que la couche limite turbulente épaisse 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:

$$\tau_t = -\rho(u'v') \quad (1-2)$$

$$\tau_p = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \quad (1-3)$$

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:

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}} = U_\infty \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (1-4)$$

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  $(4 \times 10^7)$  pour les ailes d'avions et de  $(3 \text{ à } 6 \times 10^8)$  pour leurs fuselages [09].

Afin de réduire la traînée de frottement turbulent, plusieurs techniques tentent d'agir sur le mécanisme de formation de la turbulence. Pour cette raison, les deux prochaines sections portent spécifiquement sur la couche limite turbulente. Ces sections décrivent d'abord les différentes régions qui composent la couche limite turbulente pour ensuite étudier sa structure et son mécanisme de production de turbulence.

### **I.1.2. 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 1.2). Associées à ces comportements, on distingue au moins deux régions principales de cette 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.1.2.1. 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:

$$U=U(y, \tau_p, \rho, \mu) \quad (1-5)$$

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  $U_\tau$ . Les variables de paroi utilisées sont la vitesse réduite  $U^+$  et la coordonnée normale réduite  $y^+$ :

$$U^+ = U/U_\tau \quad (1-6)$$

$$y^+ = y U_\tau / \nu \quad (1-7)$$

En introduisant ces variables de paroi à la relation (1-5), on obtient une fonction générale appelée "loi de paroi":

$$U^+ = f(y^+) \quad (1-8)$$

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  $U_\infty$ . Différentes expressions pour cette fonction  $f(y^+)$  ont été obtenues expérimentalement par plusieurs auteurs dont quelques unes seront énoncées.

La région interne est généralement subdivisée en trois autres régions (figure 1.2). 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 turbulent. Dans ce qui suit, notons que les valeurs qui délimitent l'emplacement des régions sont approximatives.

***i- 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 1.2), la contrainte visqueuse est prédominante et le profil de vitesse est considéré comme linéaire. En y introduisant les variables de paroi (1-6) et (1-7), la loi de paroi (1-8) résulte en une relation souvent appelée "loi linéaire":

$$U^+ = y^+ \quad (1-9)$$

***ii - région tampon ( $3 < y^+ < 40$ ):*** Dans la zone extérieure à la sous-couche "laminaire" ( $y^+ > 3$ ) (figure 1.2), la loi de paroi (1-8) semble avoir été confirmée dans plusieurs circonstances. Cependant, le problème de l'universalité de cette loi est surtout débattue 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  $\tau_t$ , est du même ordre de grandeur que la contrainte visqueuse  $\tau_p$ .

*iii - région turbulente ( $y^+ > 40$ ):* Dans la région turbulente (figure 1.2), la contrainte visqueuse est négligeable par rapport à la contrainte turbulente. Il s'en suit que la relation (1-5) 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:

$$\frac{dU}{dy} = \frac{dU}{dy}(y, \tau_p, \rho) \quad (1-10)$$

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:

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

Déterminées expérimentalement, la valeur de la constante  $\kappa$  de von Kârmân 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.1.2.2. région externe (loi de vitesses déficitaires) :**

De gros tourbillons prédominent la région externe de la couche limite. Il s'en suit que 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 cette 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 (1.2) a été développée pour cette région externe (figure 1.2). 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:

$$\frac{U_\infty - U}{U_\tau} = \phi(\eta) \text{ avec } \eta = \frac{y}{\delta} \quad (1-12)$$

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.1.2.3. 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 (1-11) et la loi de vitesses déficitaires (1-12) 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:

$$U_\tau = U_\infty \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad d'où: \quad \sqrt{\frac{C_f}{2}} = \frac{1}{\chi} \ln \sqrt{\frac{C_f}{2}} \frac{U_\infty \delta}{\nu} B + C \quad (1-13)$$

Où B et C sont des constantes d'intégration.

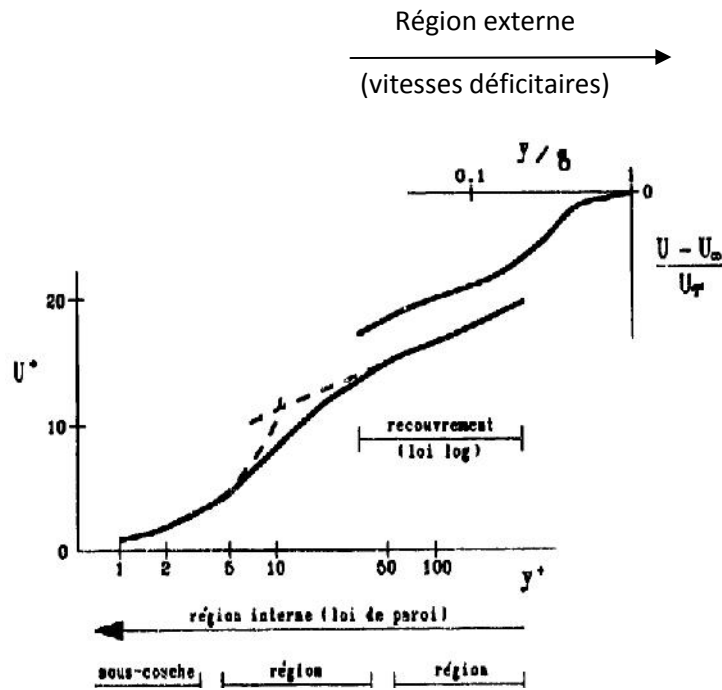


Figure 1.2: Profil de vitesse d'une couche limite turbulente [06].

## I.2. la réduction de la traînée de frottement turbulent dans les écoulements externes au moyen de "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 [02].

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.2.1 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 1.3). Cette paroi rainurée est généralement obtenue par usinage classique ou en apposant à la surface un revêtement en vinyle.

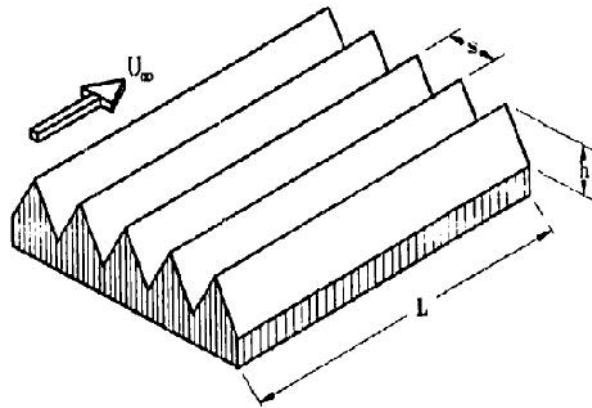


Figure 1.3: Paroi rainurée.

Tel que montré sur la figure 1.4, les rainures peuvent prendre différentes formes. Cependant, des études paramétriques intensives, menées à la NASA-Langley par WALSH et al. ([1984]; [1983]; [1982]; [1980]; [1978]) ont montré que les rainures de forme triangulaire sont généralement les plus performantes.

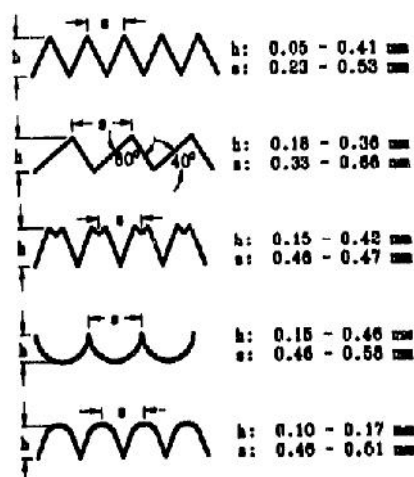


Figure 1.4: Différentes géométries de "riblets" essayées à la NASA Langley [14].

BECHERT [1987], 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 WALSH et LINDEMANN [1984], il est possible d'améliorer la réduction de traînée si les creux de ces "riblets" sont un peu courbés 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 COUSTOLS et al. [1987] 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 [WALSH et LINDEMANN 1984]. D'autres résultats obtenus par WALSH et LINDEMANN [1984] ont montré que ces "riblets" restent insensibles à un désalignement inférieur à 15 degrés. Par contre, aucune réduction de traînée ont 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:

$$s^+ = s U_\tau / \nu \quad (1-14)$$

$$h^+ = h U_\tau / \nu \quad (1-15)$$

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% [NGUYEN 1988], 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.2.2. 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 BACHER et SMITH [1985]. Ces derniers suggèrent la génération de tourbillons secondaires qui affaibliraient les tourbillons contra-rotatifs et retiendraient l'écoulement à faible vitesse dans les rainures (figure 1.5).

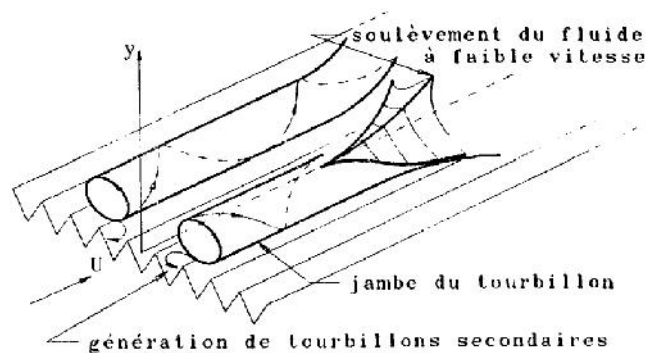


Figure 1.5: Schéma de l'interaction hypothétique entre les tourbillons contrarotatifs et les "riblets" [01].

Une deuxième explication du mécanisme d'action a été développée par FULACHIER et al. [1987] et appuyée par les observations du groupe de la NASA-Langley [WILKINSON et al. 1987]. 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 FULACHIER et al. [1987], 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 VUKOSLAVCEVIC et al. [1987], 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 au 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.

CHOI [1989] suggère que l'action des "riblets" sur ces tourbillons font partie d'un mécanisme qui contribuerait de façon importante à la réduction de la traînée. La phase d'éclatement est la principale source de production de frottement turbulent. À cette phase d'éclatement, on peut associer un mouvement transversal des tourbillons longitudinaux. Selon lui, l'action des "riblets" serait relié aux restrictions qu'imposent ces derniers dans l'écartement de ces tourbillons. Ceci résulterait en un éclatement prématuré qui, par conséquent, serait affaibli.

Pour appuyer cette explication, voici quelques uns des changements produits par des "riblets" sur une couche limite turbulente:

- L'intensité de la turbulence fut réduite jusqu'à 10%.
- La durée de l'éclatement près de la paroi est deux fois plus court.
- La fréquence d'éclatement est augmentée.
- La composante fluctuante du frottement à la paroi a été significativement réduite.

Plusieurs études ont comparé l'écoulement d'une surface rainurée avec celui d'une surface lisse. En plus de celles citées ci-haut, on peut noter les observations suivantes:

Tout d'abord, des mesures au laser effectuées par PULLES [1988] lui ont permis de conclure que seul l'écoulement dans la région interne de la couche limite est influencé par les rainures sur la paroi. Selon BACHER et SMITH [1985], les plus grands effets se retrouvent dans la région inférieure à 15 unités de paroi ( $y^+ < 15$ ).

Selon SAWYER et WINTER [1987], les variations dans le frottement d'une paroi rainurée par rapport à celle d'une paroi lisse se manifestent dans les profils de vitesse par un changement du terme constant de la loi de la paroi. Sur ce point, VUKOSLAVCEVIC et al. [1987] ont observé un soulèvement de la loi de la paroi dans la région logarithmique. Ceci suggère un épaississement de la sous-couche. Ayant aussi observé le soulèvement des profils de vitesse moyenne, CHOI [1989] a adapté la loi logarithmique, à une paroi rainurée. Ces résultats démontrent que le terme constant C de cette loi est augmenté à 6.89. Par contre, la pente reste inchangé.

En réalité, certaines de ces études ont été faites dans le but de déterminer l'origine virtuelle des profils de vitesse moyenne sur une paroi rainurée. L'emplacement de l'origine virtuelle (figure 1.6) est généralement défini par la hauteur protubérante  $h_p$  mesurée à partir de la crête du "riblet" vers le creux. Pour le cas particulier des "riblets" triangulaires, BECHERT et al. [1989] ont déterminé théoriquement la hauteur protubérante  $h_p$  comme étant égal à 0.18 fois l'espacement  $s$ .

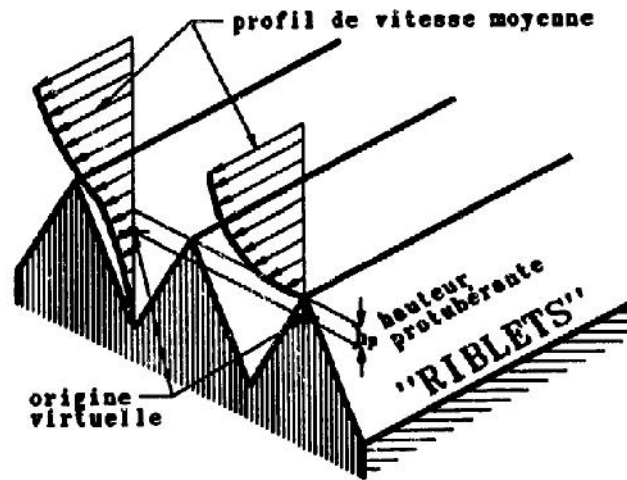


Figure 1.6 : Schéma de l'emplacement de l'origine virtuelle du profil de vitesse moyenne sur une paroi rainurée.

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

### PRESENTATION 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...) [16].

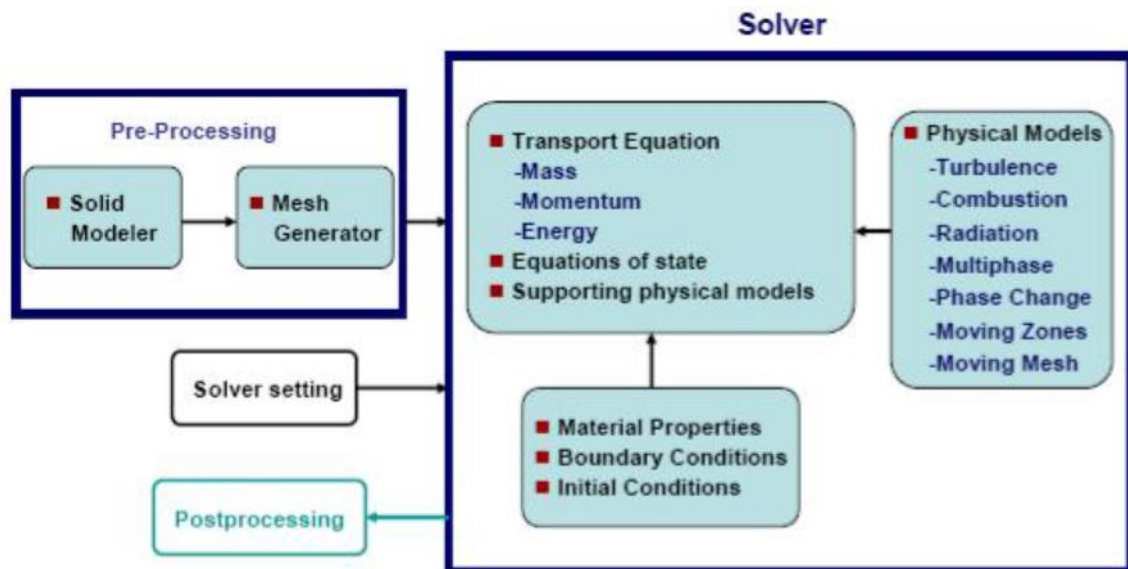


Figure 2.1 : *Processus de simulation*

#### II.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. Les défauts sont détectés à l'aide de son interface comportant plusieurs fenêtres d'outils de création, génération, vérification du maillage du modèle étudié et l'incorporation des conditions aux limites [17].

### **II.1.1. 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. Cela donne la répartition des points sur la profil.

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

#### **❖ Définir un domaine de calcul**

#### **❖ Créer un blocking**

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

#### **❖ Générer le maillage**

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

#### **❖ 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 d'adhérence (« Wall »). En amont du profil, on supposera connue la vitesse de l'écoulement et on imposera des conditions aux limites de type vitesse imposée (« Velocity inlet »). A la sortie du domaine de calcul,

on imposera la valeur de la pression, la pression atmosphérique par exemple et on optera pour des conditions de type sortie à pression imposée (« pressure outlet »).

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 ».

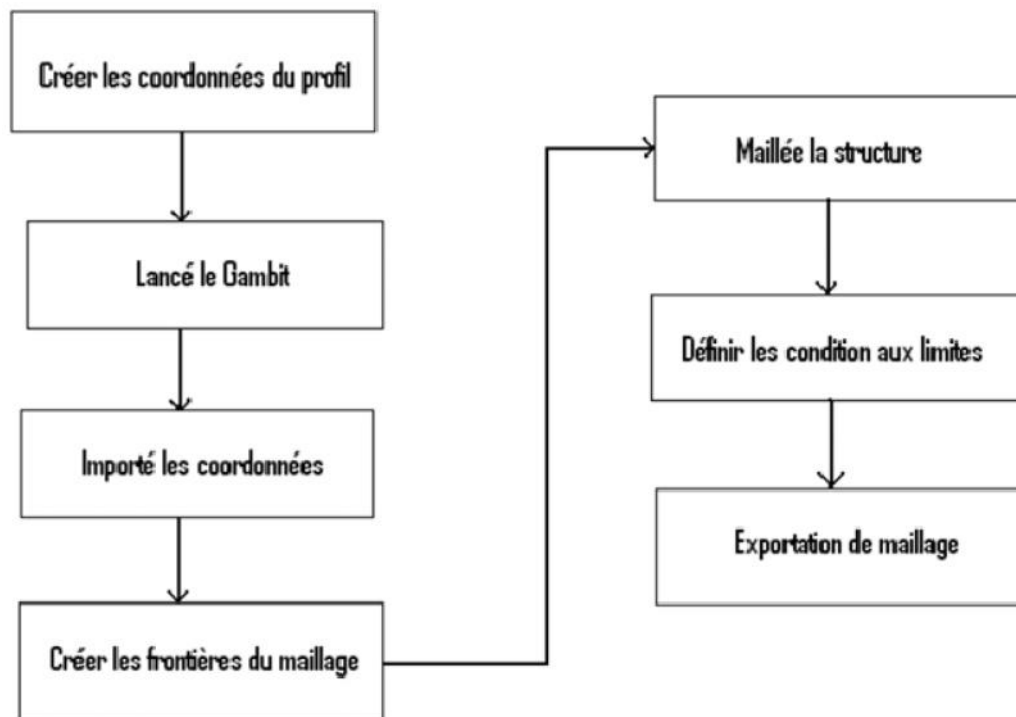


Figure 2.2 : *Processus de génération d'un maillage dans le GAMBIT*

## II.2. 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 qu'on nomme 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, Repport etc.)

## Chapitre III

### REPRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Dans ce chapitre on présente les résultats de notre étude concernant la couche limite turbulente développée sur une paroi rainurée sous forme de V. Les distributions de pression (figure 3-2) et de vitesse (figure 3-3) sur ce profil sont déterminées en recherchant l'influence de Riblets sur ce dernier.

On présente à part le maillage obtenu à de notre code de calcul, les résultats obtenues par Fluent. Le maillage généré, à partir de notre code de calcul, sur une paroi rainurée en V (figure 3-1).

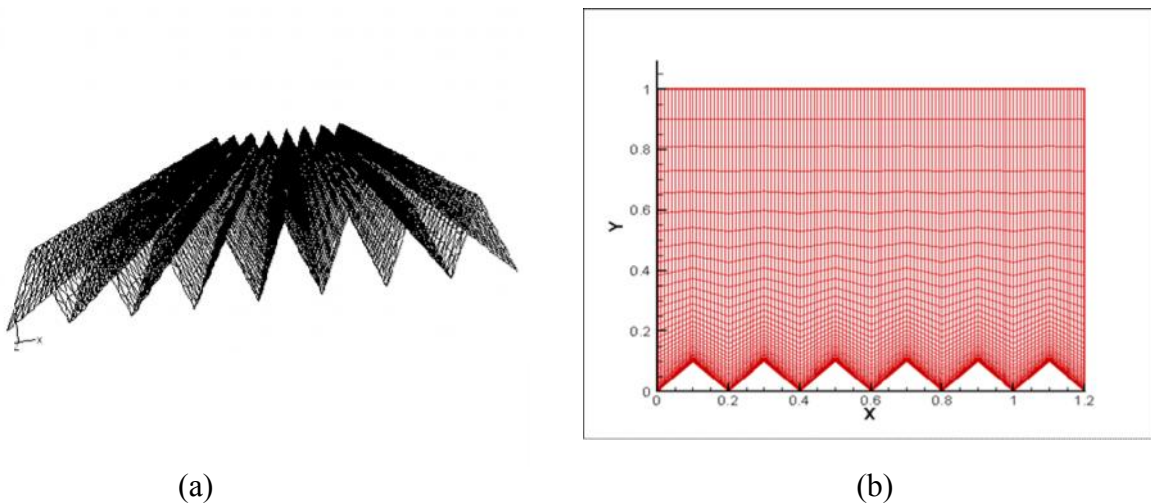


Figure 3.1 (a et b): *Maillage du domaine d'étude généré par Gambit.*

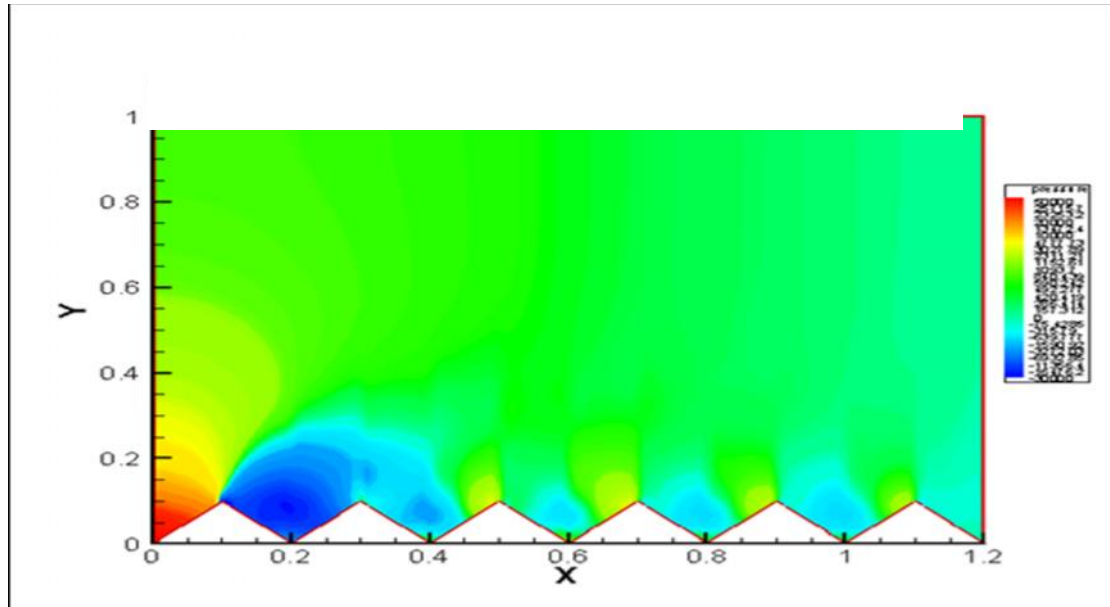


Figure 3.2 : La distribution de pression sur une paroi rainurée.

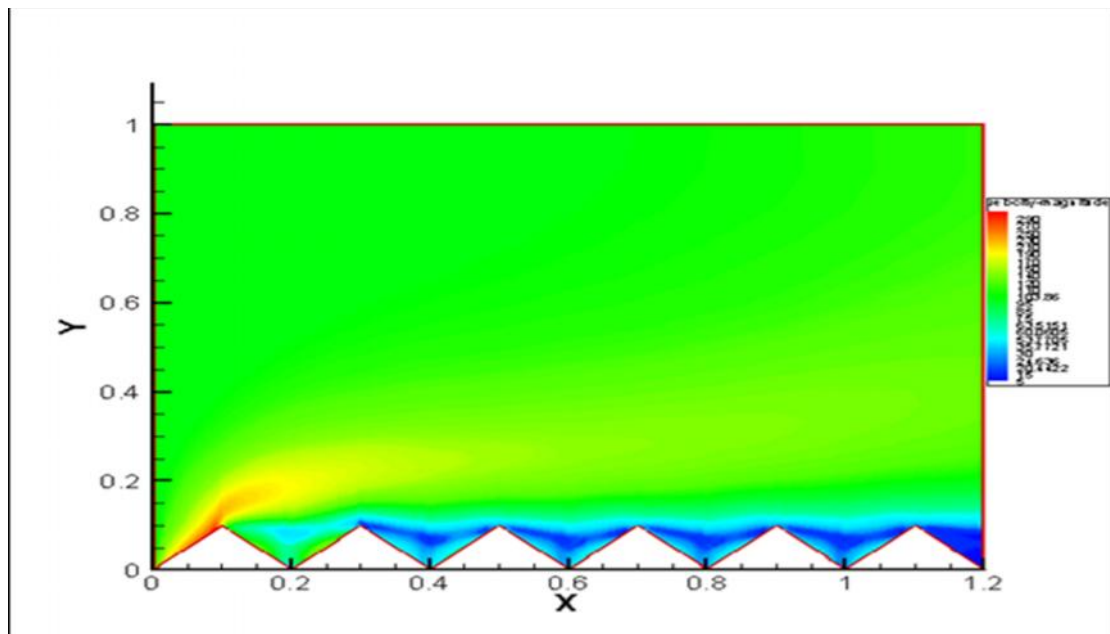


Figure 3.3 : La distribution de vitesse sur une paroi rainurée.

On remarque que ces résultats coïncide avec celle trouvées dans les articles qu'on déjà étudiées.

# Conclusion

Plusieurs études numériques ou expérimentales ont été faites à travers les différents laboratoires du monde, afin de caractériser l'écoulement turbulent. La réduction de traînée visqueuse en introduisant des modifications au niveau de la surface solide, constitue un objectif très important. Parmi l'ensemble des techniques de réduction développées, on s'intéresse à celle qui utilise des riblets, cette technique récente consiste à modifier la géométrie de la paroi au moyen de fines rainures longitudinales appelées "riblets".

Plusieurs études ont été menées afin de mettre en évidence les modifications de la couche limite engendrées par des rainures longitudinales de différentes formes (fines lamelles verticales, dents de scie,...). L'utilisation de Code de calcul FLUENT, nous a permis de déterminer les profils de pression ainsi que de vitesse au sein de la couche limite turbulente via des des rainures en V. Les résultats obtenus dans cette étude sont très encourageants et démontrent l'intérêt de l'utilisation des riblets.

Comme perspective, on propose d'étudier des formes de rainures différentes à l'aide de FLUENT.

## Bibliographie

- [01] 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.
- [02] BECHERT, D.W.; MARTENWERFER M. (1989) - "The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs" - J. Fluid Mech. - Vol. 206, pp. 105-129.
- [03] BECFIERT, D.W. (1987) - "Experiments on three-dimenslonal riblets" - International Conférence, The Royal Aeronautical Society, Vol. 2, pp. 425-431.
- [04] CHOI, KWING-SO (1989) - "Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets" - J. Fluid Mech. - Vol. 208, pp. 417-458.
- [05] E. Coustols, «Effet des parois rainurées « riblets » sur la structure d'une couche limite turbulente» Mec. Ind, (2001),2, 421-434.
- [06] COUSTEIX2, J. (1989) - "Couche limite laminaire" - Collection La Chevêche - Cepadues -Éditions.
- [07] 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.
- [08] FULACHIER, L.; DJENIDI, L.; ANSELMET, F. (1987) - "Couches limites sur parois rainurées longitudinalement ("riblets")" - 24' Colloque d Aérodynamique Appliquée Poitiers, pp. 1.16.
- [09] 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.

- [10] PULLES, C.J.A. (1988) - "Drag reduction of turbulent boundary layers by means of grooves surfaces" - Ph.D Thesis, Technical University of Eindhoven.
- [11] SAWYER, W.G.; WINTER, K.G. (1987) - "An investigation of the effect on turbulent skin friction of surfaces with streamwise grooves" - International Conférence, The Royal Aeronautical Society, Vol. 2, pp. 330-362.
- [12] SCHLICHTING, H. (1968) - "Boundary layer theory" - McGraw Hill Ed.
- [13] VUKOSLAVIĆ, 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.
- [14] WALSH, M.J.; LINDEMANN A.M. (1984) - "Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction" - ALAA 22<sup>nd</sup> Aerospace Sciences Meeting - AIAA-84-0347.
- [15] WILKINSON, S.P.; ANDERS, J.B.; LAZOS, B.S.; BUSINELL, D.M, (1987) - "Turbulent drag reduction research at NASA Langley - progress and plans -" – International Conférence, The Royal Aeronautical Society, Vol. 1, pp. 1-32.
- [16] Fluent 6.1 User's guide. February 2008. Fluent. Inc.
- [17] Gambit 2.1 User's guide. May 2003. Fluent. Inc.

## **Résumé**

Une étude numérique d'une couche limite turbulente sur une paroi rainurée gouvernée par les équations de Navier-Stokes moyennées est présentée. La simulation numérique est obtenue par les logiciels Gambit, qui génère le maillage, et Fluent qui résout le problème modélisé par la méthode des volumes finis.

La distribution de vitesse et la pression au sein de la couche limite sont présentées en recherchant l'influence de riblet sur ces derniers.

## **ABSTRACT**

A numerical study of a turbulent boundary layer on a grooved wall governed by the Navier-Stokes averaged equations is presented. The numerical simulation is obtained by Gambit by the software which generates the mesh and Fluent that solves the problem modeled by the finite volume method.

The velocity distribution and the pressure in the boundary layer are shown by investigating the influence of riblet thereon.