

Effet des parois rainurées (« riblets ») sur la structure d'une couche limite turbulente

Eric Coustols

ONERA/DMAE, Département Modèles pour l'Aérodynamique et l'Énergétique, Unité Turbulence : Modèles et Prévisions, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex, France

(Reçu le 3 mai 2001 ; accepté le 1 juin 2001)

Résumé — Depuis plusieurs années, l'ONERA a consacré un effort important aux recherches pour tenter de réduire la traînée de frottement, sachant que cette dernière composante représente environ 40 à 50% de la traînée totale d'un avion de transport transsonique moderne. Parmi les méthodes passives généralement étudiées, la modification de la géométrie de la paroi par l'utilisation de rainures longitudinales ou « riblets », semble être la plus attrayante car elle est relativement facile à mettre en œuvre et très prometteuse pour une application à l'avion. Ainsi, dans cet article, une synthèse des études expérimentales menées à l'ONERA et dans le monde, pour évaluer les performances de telles parois rainurées, est proposée. Des résultats typiques de modifications de l'écoulement turbulent, mesuré ou calculé, seront également analysés, afin de documenter les effets significatifs attribués à la présence de ces parois rainurées dans l'écoulement. © 2001 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

turbulence / frottement / couche limite / réduction de traînée / rainures

Abstract — Effect of grooved surfaces (riblets) on the structure of a turbulent boundary layer. A very important research effort has been developed at ONERA for these last years in the field of friction drag reduction. Indeed, for transonic aircraft applications, friction contribution accounts for about 40-50% of the total drag. Among the existing passive methods, the widely known ability of riblets or grooved surfaces to reduce turbulent skin friction has been well demonstrated under variety of tests, for numerous flow conditions. Thus, a synthesis of experimental investigations undertaken both at ONERA and in the world to ascertain riblets efficiency is given. Moreover, typical features related to the effect of grooved surfaces on turbulent flows are provided in order to shed light on the understanding of the mechanisms of such a passive manipulation. © 2001 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

turbulence / friction / boundary layer / drag reduction / riblets-ribs

1. INTRODUCTION

La prise de conscience de l'organisation de la turbulence dans une couche limite a conduit à essayer d'agir sur sa structure, en vue notamment de réduire la traînée de frottement. L'examen de la décomposition de la traînée d'un avion de transport révèle que la part du frottement aérodynamique est toujours importante : de l'ordre de 30 % pour un avion supersonique, de l'ordre de 45 % pour un avion de type Airbus et jusqu'à 80 % pour un avion d'affaires de type Falcon [1, 2]. Ainsi, il n'est pas surprenant que l'ONERA ait consacré depuis de nombreuses années un effort important pour tenter de réduire cette traînée de frottement.

Pour des applications aérodynamiques, plusieurs procédés ont été envisagés pour réduire la traînée de frottement. On distingue ceux destinés à réduire le frottement lorsque la couche limite qui se développe sur la paroi est turbulente et ceux qui visent à retarder la transition du régime laminaire au régime turbulent. Dans la première catégorie de procédés, la modification de la paroi sous forme de rainures longitudinales, dénommées « riblets », apparaît comme étant une méthode passive très attrayante et très prometteuse. Pendant longtemps, on a cru que le meilleur moyen de minimiser le frottement était de rendre la paroi aussi lisse que possible ; cela vaut mieux, bien sûr, que d'avoir affaire à une paroi complètement rugueuse, mais l'emploi de parois non planes s'est révélé intéressant.

Il est souvent mentionné que l'idée originale de ces parois striées est issue d'observations zoologiques : certaines peaux de requins montrent l'existence de micro

E-mail address: Eric.Coustols@oncert.fr (E. Coustols).

structures longitudinales et transversales. De fait, dans des présentations médiatiques, ces surfaces rainurées sont dénommées «peaux de requins». Ceci est un peu abusif car, d'une part, certains types de requins ont des structures de peau différentes et, d'autre part, des essais en soufflerie, à partir d'échantillons reproduisant la structure de cette peau de requin, n'ont pas conduit à des résultats très probants.

Après avoir rappelé les principales caractéristiques d'une couche limite turbulente, les performances des parois rainurées seront évoquées pour plusieurs types d'écoulement turbulent et différents régimes. De nombreuses études à caractère fondamental ont montré avec les moyens de mesure de laboratoire que les parois rainurées pouvaient réduire le frottement de façon significative. Dans un contexte plus proche des applications, des essais réalisés sur une maquette d'Airbus A320 dans la soufflerie SIMA de l'ONERA, ont confirmé les performances de ces parois rainurées, conduisant Airbus Industrie et ses partenaires à réaliser des essais en vol sur l'avion prototype A320 en novembre 1989.

Plusieurs explications ont été avancées concernant les mécanismes d'action de ces parois rainurées ; les réductions importantes sur le frottement turbulent peuvent être attribuées à des effets d'origine purement visqueuse (écoulement fortement ralenti dans les creux des rainures) ou à une modification de la structure de la turbulence au sein de la couche limite. Du fait des faibles dimensions des rainures, les évaluations des modifications résultantes de l'écoulement turbulent sont très délicates. Cependant, quelques approches seront commentées car elles ont notamment permis de valider certaines hypothèses faites sur les mécanismes d'action de ces «riblets».

De nombreuses tentatives de calcul (simulation numérique directe ou approche de type couche limite) ont été menées à bien pour des écoulements interne et externe se développant sur des parois rainurées. Quelques résultats ont cependant permis de vérifier certaines observations expérimentales sur la modification de l'écoulement turbulent ; ils seront très brièvement évoqués dans la dernière partie de l'article.

2. STRUCTURE DE LA COUCHE LIMITE TURBULENTE

Bien que la turbulence soit un phénomène aléatoire et non linéaire propre aux écoulements non prévisibles, une couche limite turbulente est, en fait, constituée d'un ensemble de mécanismes relativement bien identifiés

et organisés. L'analyse spectrale, outil capable d'identifier une gamme étendue d'échelles de longueur et donc de structures, et les mesures de corrélations spatio-temporelles des composantes de vitesse en deux points ont permis de découvrir cette organisation de la turbulence. L'identification qui en résulte classe les structures en deux catégories : celles qui portent l'énergie et celles responsables de la dégradation d'énergie cinétique en chaleur (dissipation), sachant que la taille des structures les plus énergétiques augmente généralement avec la distance à la paroi. Un écoulement turbulent est la superposition de tout un ensemble de mouvements d'échelles variées ; l'analyse spectrale révèle que l'énergie est répartie sur une gamme de fréquences très étendue, correspondant à un ensemble de structures turbulentes de taille variable depuis l'épaisseur physique de la couche limite, δ , jusqu'à quelques dizaines d'unités de paroi, grandeur caractéristique de la région de proche paroi définie dans les lignes qui suivent.

La couche limite turbulente se décompose en deux régions caractéristiques : l'une, loin de la paroi, est contrôlée par la turbulence : c'est la région externe ; l'autre, près de la paroi, est dominée par la viscosité : c'est la région interne. Dans chaque région, la turbulence est caractérisée par une échelle de longueur et une échelle de vitesse [3]. L'échelle de longueur caractéristique de la région interne est la longueur visqueuse ν/U_τ , où U_τ représente l'échelle de vitesse ou vitesse de frottement, définie par $(\tau_p/\rho)^{1/2}$. $U^+ = U/U_\tau$ et $y^+ = yU_\tau/\nu$ sont appelées les variables internes ou variables de paroi. Dans la région externe, l'échelle de longueur de la turbulence est donnée par l'épaisseur de la couche limite, δ , et une échelle de vitesse est fournie par la vitesse de frottement U_τ .

Pour un nombre de Reynolds relativement élevé, l'écoulement turbulent est tel que la production et la dissipation de la turbulence sont importantes dans la région interne ; dans la région externe, la turbulence est entretenue par l'excédent d'énergie turbulente produit dans la région interne et transportée par des mouvements turbulents. Les deux régions sont en perpétuelle interaction par l'intermédiaire de structures d'échelles de longueur et de temps différentes ; de nombreuses expériences ont confirmé l'existence d'une séquence cyclique, liée à la production de la turbulence, qui relie ces deux régions. De façon générale, plusieurs événements caractéristiques ont été identifiés faisant intervenir des structures communément dénommées «structures cohérentes» [4, 5].

L'écoulement proche de la paroi est très agité et reste toujours turbulent ; il est constitué d'un ensemble de lanières longitudinales alternées à faible et à plus grande

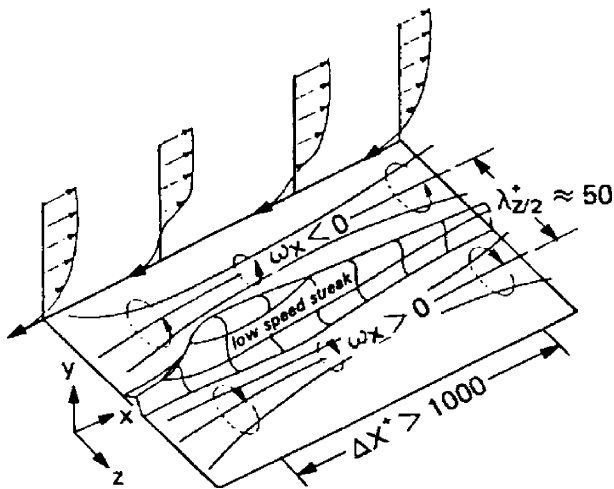


Figure 1. Structure de l'écoulement turbulent dans la région de paroi [4].

vitesse. On interprète ces résultats à l'aide d'un schéma de tourbillons contrarotatifs (figure 1). La dimension individuelle de ces tourbillons varie beaucoup dans le temps et l'espace autour d'une valeur moyenne, mais leur espacement transversal est approximativement constant et égal à 15 fois l'épaisseur de la sous-couche visqueuse, soit une centaine d'unités de paroi ($100U_{\tau}/\nu$) [4]. Ces tourbillons sont séparés par une bande d'écoulement à

faible vitesse, relativement large près de la paroi, mais plus étroite à des altitudes supérieure [5]. Ces tourbillons existent dans les régions de fort cisaillement, induisant des régions à forte et faible vitesse. Ils constituent des réminiscences de l'étape non linéaire de la zone de transition du régime laminaire au régime turbulent et sont souvent appelés tourbillons en épingle à cheveux ou «hairpin vortices» (figure 2).

L'interaction de ces bandes alternées et l'action sur l'écoulement des importantes fluctuations de vitesse induites provoquent le soulèvement des tourbillons contrarotatifs, chaque jambe de ces tourbillons se trouvant de part et d'autre de la lanière à faible vitesse, emprisonnant ainsi une partie de fluide [6]. Cette lanière s'élève progressivement, oscille violemment (instabilité secondaire) puis éclate dans un mouvement complètement chaotique. Cet éclatement est le point de départ du cycle de production d'énergie cinétique turbulente à travers un processus identifié sous la terminologie de «bursting»; des résultats d'essais montrent que 70 % de la production de turbulence dans une couche limite survient au cours de la phase d'éclatement. Les éjections («bursts», fluide à faible vitesse vers l'extérieur) et les balayages («sweep», fluide à vitesse élevée vers la paroi) constituent les deux contributions essentielles de l'activité turbulente. La figure 2 reprend les différentes étapes de cette phase intense de production de turbulence.

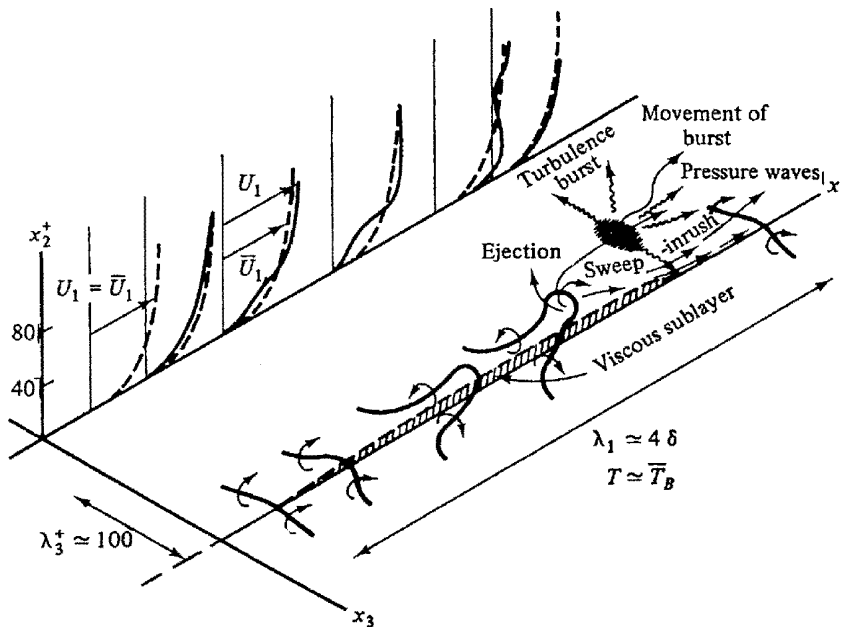


Figure 2. Schéma d'élévation et d'oscillation : cycle de «bursting» [6].



Figure 3. Visualisation de la région externe d'une couche limite turbulente [34].

Les tourbillons en épingle à cheveux constituent la structure dominante de l'écoulement turbulent [7]. La partie supérieure de ces structures a une intensité tourbillonnaire transversale relativement importante et lors de la phase d'étirement de ces tourbillons pendant le « bursting », il se pourrait que seuls les sommets soient actifs dans la région extérieure de la couche limite. Dans cette région est concentrée une contribution minimale de turbulence. La frontière extérieure de la couche limite présente un caractère intermittent, dû aux pénétrations massives de fluide non turbulent dans la couche limite (figure 3).

Cet entraînement de fluide irrotationnel complète le cycle d'événements individuels cohérents survenant lors du développement d'une couche limite turbulente, cycle faisant intervenir les grosses structures de la partie extérieure de la couche limite et les structures beaucoup plus fines proches de la paroi.

Ainsi, on peut penser réduire cette production de turbulence en détruisant un ou plusieurs types de structures cohérentes, en introduisant de nouvelles structures dans l'écoulement, voire en réorganisant les structures existantes. Le but recherché est de rompre ce cycle par quelque procédé que ce soit, afin de modifier les transferts énergétiques entre les régions interne et externe et, essentiellement, le transfert de quantité de mouvement vers la paroi.

Différents moyens actifs ou passifs ont été développés à cette fin [8–12]. Les procédés actifs peuvent conduire à des réductions massives du frottement mais perdent souvent de leur intérêt du fait d'un apport extérieur nécessaire d'énergie.

3. PERFORMANCES DES PAROIS RAINURÉES OU RIBLETS

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 (figure 4) où s dénote l'espacement entre deux rainures, h la profondeur des rainures et L la longueur de couche limite turbulente manipulée. Très peu d'études ont été réalisées sur l'influence du rapport s/h , pour pouvoir en tirer des conclusions sûres. Ce paramètre caractérise l'augmentation de surface mouillée : elle est, par exemple, de 120 % pour des rainures en forme de « V » lorsque $s/h = 1$.

De nombreuses expériences ont été réalisées initialement aux États-Unis, puis ultérieurement en Europe ou dans le monde sur des géométries de parois très variées. Ces essais ont mis en évidence, par le biais de moyens de mesure de type laboratoire, de réductions de traînée significatives pour des dimensions des rainures de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la sous-couche visqueuse.

Un exemple de résultats obtenus en soufflerie subsonique ou de recherche est fourni, pour des rainures triangulaires telles que $s/h = 1$, sur la figure 5. La quantité portée en ordonnée est le rapport de la traînée de frottement avec riblets à la valeur sur paroi lisse. En abscisse, s^+ désigne la valeur de l'espacement rendu sans dimension par l'échelle de longueur visqueuse de la couche limite turbulente : $s^+ = s \cdot U_\tau / \nu = s \cdot [(\tau_p / \rho)^{1/2}] / \nu$. Des gains de frottement sont obtenus pour des valeurs de s^+ inférieures à 15–20 unités de paroi.

Cette figure illustre toutes les difficultés de chiffrer correctement la réduction de frottement turbulent, suite aux techniques estimatives mises en place : variation de pression dans un écoulement de conduite, application de

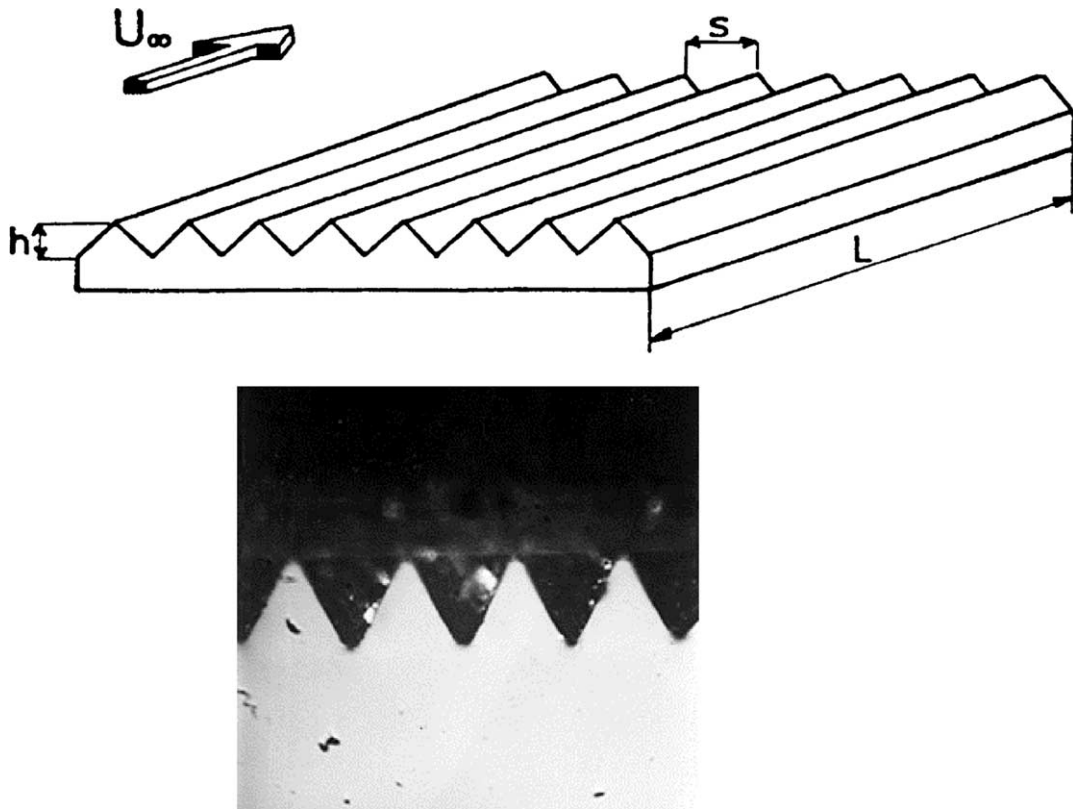


Figure 4. Exemple de section transversale d'une paroi rainurée en forme de «V».

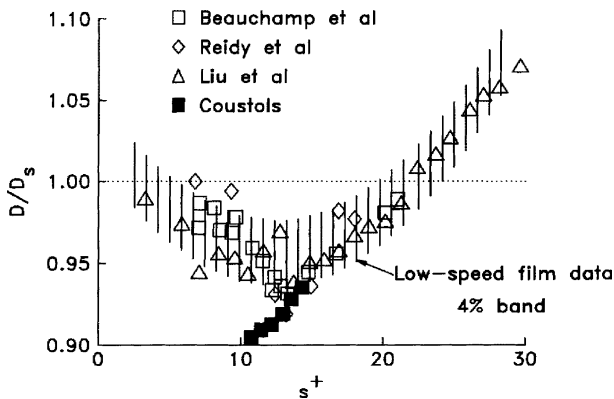


Figure 5. Efficacité des riblets en régime subsonique [13].

l'équation de quantité de mouvement, cisaillement à la paroi ou balance de paroi [13, 14]. Si l'efficacité des riblets ne fait aucun doute, ces résultats, obtenus sur des formes génériques, doivent surtout être interprétés en termes de tendance ou de positionnement relatif, le juge de paix restant la balance ou le dynamomètre, interne au corps recouvert de parois striées.

Plusieurs formes de section transversale des rainures, formes conventionnelles ou exotiques, ont été étudiées dans le monde entier : formes en dents de scie de type triangulaire «V», formes arrondies de type «U», ailettes de type «L», formes trapézoïdale voire formes hybrides.

Une compilation de résultats expérimentaux obtenus au tunnel à huile du DLR, pour certaines d'entre elles, est fournie sur la figure 6 extraite de [15]. Les fines rainures de type «L» fournissent des gains de traînée importants de l'ordre de 10% ; de par la fragilité des crêtes, cette forme ne pourrait être directement transposable dans un contexte industriel aéronautique.

En revanche, la forme trapézoïdale constituerait un bon compromis en maximisant la surface exposée au cisaillement minimal (creux) vis-à-vis des pics soumis à de forts cisaillements. Cette forme donne environ 50 à 60% de réduction supplémentaire par rapport à la forme en «V».

Les gains de traînée de frottement mesurés en soufflerie sont de l'ordre de 5 à 8% avec des rainures de section transversale classique (succession de petits triangles sé-

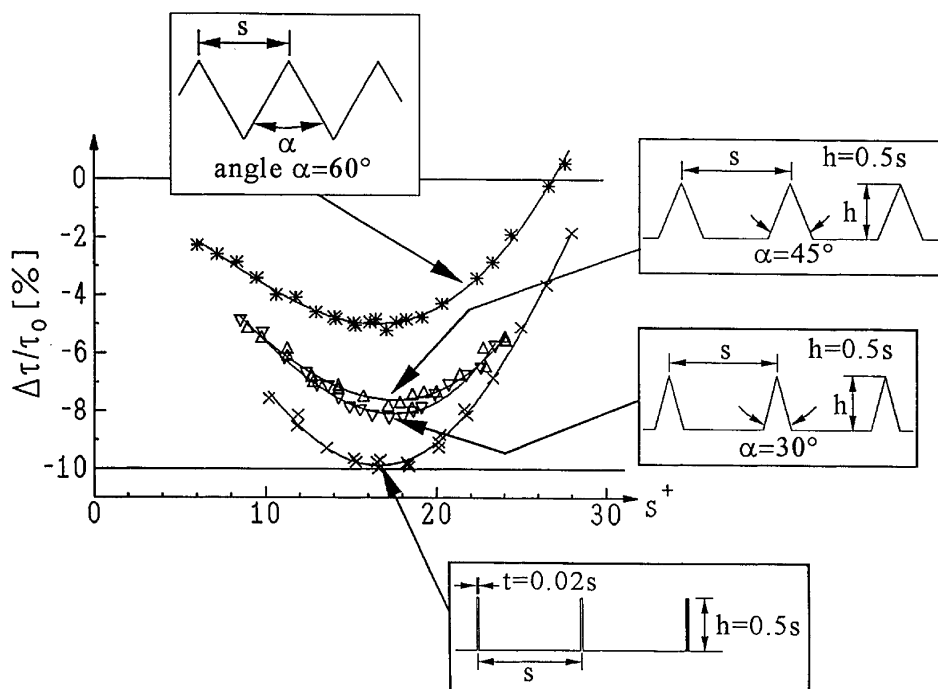


Figure 6. Performances de différentes géométries de rainures (DLR Berlin [15]).

parés ou non par un plat). Les sections dont les crêtes sont émoussées ont de moins bonnes performances que les rainures dont les pics sont aigus, car on augmente la surface soumise à un fort cisaillement. Il semblerait également que l'augmentation du rayon de courbure dans les creux donne des résultats favorables [14]. Toutes ces études ont permis de vérifier qu'une surface lisse n'est donc pas la forme géométrique de paroi qui fournit une traînée de frottement minimale.

L'effet de dérapage des rainures a été étudié par de nombreux auteurs en écoulement bidimensionnel; dans ce cas, la ligne des crêtes est inclinée par rapport à la direction de l'écoulement au loin. Jusqu'à un angle de 20° , l'effet bénéfique est conservé avec toutefois une réduction des performances de l'ordre de 10%. Au delà de 30° de dérapage, plus aucune réduction n'est obtenue même pour les faibles valeurs du paramètre s^+ [14, 16, 17]. Quelques essais ont seulement été effectués sur des ailes en flèche [9, 14, 16, 18–20]; des gains de l'ordre de 4–6% ont été obtenus à condition d'orienter les rainures suivant la direction de l'écoulement extérieur. Si une application à l'avion est envisagée, il faudra veiller à ne pas placer de rainures dans des régions d'écoulement tridimensionnel intense.

Ces résultats obtenus en écoulement à basse vitesse ont été confirmés aussi bien en régime transsonique qu'en régime supersonique sur des corps de géométrie de type générique : ogive/cylindre en transsonique [16, 21] (figure 7) et cône/cylindre en supersonique [22].

Une compilation de résultats obtenus en régime transsonique pour des rainures de section triangulaire ($s/h = 1$) est portée sur la figure 9, à partir d'essais en soufflerie réalisés sur une ogive/cylindre, sur une plaque plane ou en vol [13]. Les variations du coefficient de traînée de frottement ont été obtenues par des mesures directes (balance interne) ou indirectes (équation de quantité de mouvement, sondages de couche limite) justifiant que les résultats soient inclus dans une bande d'incertitude de $\pm 2\%$.

Des résultats très détaillés d'une maquette de type ogive/cylindre ont été obtenus dans la soufflerie T2 de l'ONERA/DMAE pour des nombres de Mach variables de 0,4 à 0,8 et plusieurs pressions génératrices, induisant une variation conséquente du nombre de Reynolds. Ces données ont servi à Walsh et al. pour préciser les limites de la bande d'incertitude du domaine transsonique [13]. En effet, différents espacements inter crêtes pour des rainures de type «V» ($s/h = 1$), depuis $23\ \mu\text{m}$ jusqu'à $76\ \mu\text{m}$, ont permis de couvrir pour les conditions d'es-

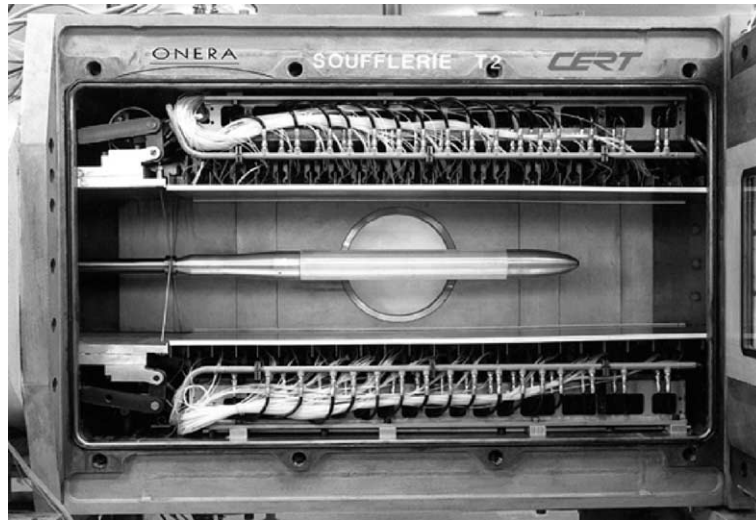


Figure 7. Essais sur une ogive/cylindre à la soufflerie T2 de l'ONERA/DMAE [16, 21].

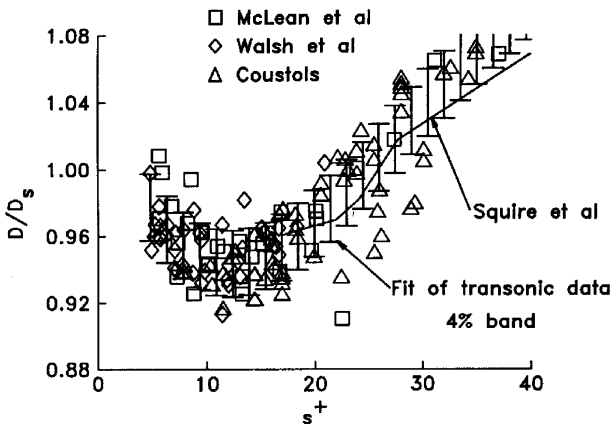


Figure 8. Efficacité des parois rainurées en régime transsonique [13].

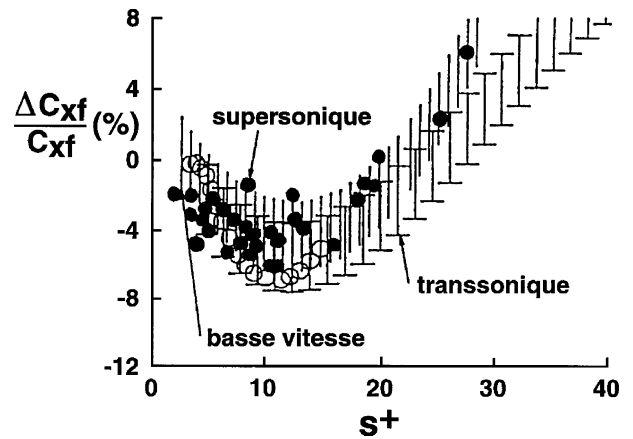


Figure 9. Efficacité des « riblets » en régimes subsonique, transsonique et supersonique [22].

sais énoncées ci-dessus la plage de variation s^+ : 8–35. Sur la *figure 8*, la variation relative de traînée de frottement est portée en fonction du paramètre s^+ , défini en régime compressible à partir des valeurs pariétales de la masse volumique et de la viscosité cinématique, $s^+ = s \cdot U_\tau / \nu_p = s \cdot [(\tau_p / \rho_p)^{1/2}] / \nu_p$.

Enfin, la caractérisation du comportement des parois rainurées en régime supersonique a été menée à bien sur une maquette de type cône/cylindre, dans la soufflerie S2 de l'ONERA/Modane-Avrieux [22]. Les essais ont été effectués pour des nombres de Mach variables depuis 1,6 jusqu'à 2,5 ; les variations de la pression génératrice ont conduit à explorer le domaine de nombre de Reynolds

unitaire suivant : 5 à 22 millions/mètre. Les parois rainurées fournies par la Société 3M-France dans un revêtement vinyl autocollant, recouvraient presque en totalité la partie cylindrique de la maquette, soit 87 % de la surface mouillée. La section transversale des stries était triangulaire de type « V » ; différentes dimensions de rainures ont été considérées : $s = h = 33, 51$ et $76 \mu\text{m}$. Les gains résultant sur la traînée de frottement, évaluée par pesée de la maquette complète, sont tout à fait comparables à ceux obtenus en régime subsonique ou transsonique, à condition d'utiliser le paramètre sans dimension s^+ (*figure 9*).



Figure 10. Essais sur une maquette d'A320 à la soufflerie S1 de l'ONERA/Modane.

L'étape expérimentale suivante a consisté à se placer dans un contexte plus proche des applications. Des essais ont été réalisés en 1988 dans la soufflerie S1 de l'ONERA/Modane sur une maquette d'Airbus A320 à l'échelle 1/11 (*figure 10*), fournie par Aerospatiale Matra Division Airbus [9, 16]. Les parois rainurées de section triangulaire et de quelques dizaines de microns de profondeur, fournies par la société 3M France, ont été posées sur 66 % de la surface mouillée de l'avion y compris la voilure. Pour un nombre de Mach de 0,7 et un coefficient de portance correspondant au régime de croisière, des pesées de la maquette ont indiqué un gain sur la traînée totale de 1,6 %, correspondant à une diminution moyenne de la traînée de frottement de l'ordre de 5 %. Sachant que la dimension des rainures n'était pas optimisée sur toutes les parties de l'avion, ce résultat confirme les valeurs obtenues en soufflerie sur des formes génériques.

Ces résultats positifs, enregistrés en soufflerie pour un nombre de Reynolds 5 fois plus faible que dans les conditions de croisière, ont conduit Airbus Industrie et ses partenaires à procéder à des essais en vol sur l'avion prototype A320, en octobre 1989 [23]. L'avion était recouvert de parois rainurées, faites dans un revêtement vinyl autocollant fabriqué par la Société 3M France, sur environ 75 % de sa surface totale. A l'aide de mesures de consommation de carburant (dispositif équipant l'avion prototype) avec et sans riblets, un gain moyen de 1,5 % sur la consommation de l'avion pour plusieurs paliers de vol a pu être mis en évidence [23]. Ce chiffre est cohérent, d'une part, avec le pourcentage de surface de

l'avion habillé de riblets et d'autre part, avec le fait que le frottement représente environ 45 % de la traînée totale.

4. EFFETS DES PAROIS RAINURÉES SUR L'ÉCOULEMENT TURBULENT

Les résultats expérimentaux s'accordent maintenant pour que l'on puisse conclure que les parois rainurées sont efficaces pour réduire le frottement turbulent et la traînée de frottement résultante. Il est clair également que les rainures modifient la structure de la turbulence au voisinage immédiat de la paroi mais, pour l'instant, les mécanismes exacts par lesquels agissent les riblets ne sont pas parfaitement élucidés. Les nombreuses expériences réalisées ont apporté quelques renseignements intéressants ; cependant, du fait des faibles dimensions des rainures, les efforts entrepris ont pu se trouver naturellement entravés. Dans certains cas, l'exploration détaillée de l'écoulement turbulent au voisinage des rainures a pu être réalisée en travaillant sur une géométrie agrandie par rapport à l'échelle avion (tunnel à eau voire à huile).

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. . .). Si la première explication proposée

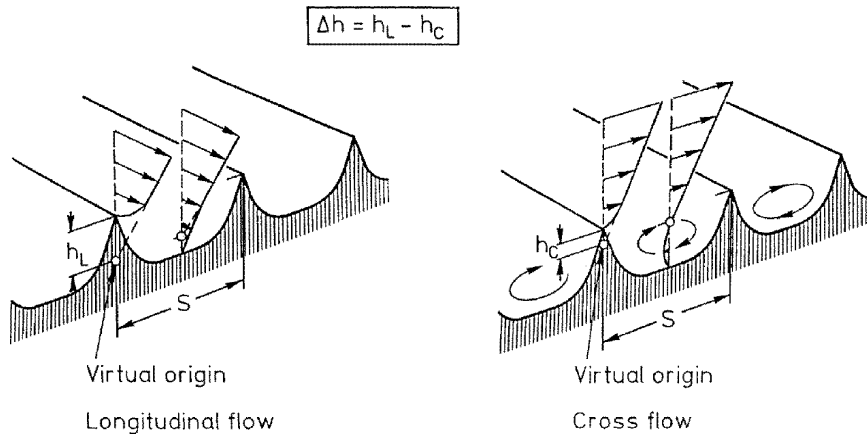


Figure 11. Hauteurs de « protusion » [15].

n'est pas totalement vérifiée, elle pourrait cependant expliquer pourquoi les variations de traînée sont faibles en regard d'augmentations, parfois gigantesques, de surface mouillée.

Les effets des parois rainurées sur l'écoulement turbulent ont été mis en évidence à partir de techniques de mesure différentes mais complémentaires : anémométrie fil chaud, visualisations, suivi de particules, analyse conditionnelle ou analyse spectrale. Les difficultés de mesures, associées à des variations minimales de caractéristiques turbulentes induites par les parois rainurées, peuvent être attribuées au fait que les rainures ne jouent pas uniquement sur une seule structure mais modifient les interactions ou liens entre les différentes structures. De nombreux chercheurs s'accordent à dire que la correspondance entre les petites structures turbulentes de la région de paroi et la taille des rainures traduite en unités de parois, pour lesquelles les rainures sont performantes en termes de réduction de traînée, ne peut être pure coïncidence.

Etant donné que le paramètre optimum s^+ ne correspond pas à l'espacement moyen des lanières de fluide à faible vitesse, on peut penser que les riblets ne fixent pas ces lanières à une position transversale donnée mais affaiblissent plutôt les structures cohérentes de proche paroi. Quelques traits typiques faisant suite à une telle manipulation de paroi sont évoqués ci-dessous.

Lorsqu'on effectue des sondages de couche limite sur les parois rainurées, la première difficulté est de définir l'emplacement de l'origine de la paroi. Cet aspect est d'autant plus important qu'on souhaite obtenir une valeur moyenne du frottement suivant la direction transversale.

A partir d'une analyse bidimensionnelle purement visuelle dans le voisinage des rainures, Bechert et al. ont proposé d'utiliser la hauteur de « protusion » apparente h_L [24]. Cette hauteur est définie comme étant l'origine de la plaque plane virtuelle qui fournirait les mêmes caractéristiques de vitesse d'écoulement que la paroi rainurée (figure 11). Pour plusieurs types de géométrie (« V », « U », « L »), une limite asymptotique est obtenue aux fortes valeurs du rapport $h_L/s \rightarrow \ln 2/\pi \sim 0,22$.

Cette limite semble logique dans la mesure où les trois-quarts de l'effet de la rainure peuvent être attribués à une réponse de l'écoulement aux conditions de paroi. Plusieurs chercheurs pensent qu'il est également nécessaire de prendre en compte l'écoulement transversal secondaire et sa hauteur de « protusion » [15]. De fait, la différence Δh de hauteurs de « protusion » attribuées aux profils de vitesse longitudinale et transversale (figure 11) serait le paramètre clé ; des études numériques ont confirmé cette supposition. Cette différence de hauteurs est fonction de la forme de la section transversale de la rainure ; pour des rainures très minces, la valeur asymptotique de $\Delta h/s$ atteindrait 0,132.

Baron et al. ont effectué des sondages de couche limite par anémométrie fil chaud sur une paroi rainurée, de section triangulaire telle que : $s/h = 1$, $h = 0,7$ mm et $h^+ = 12$ [25]. La représentation du profil de vitesse longitudinale dans un diagramme semi-logarithmique, en prenant pour origine du profil le pic de la rainure diminué de 0,15 s, indique un décalage vers le haut de la loi logarithmique, la valeur de la pente restant inchangée par rapport à une paroi lisse (voir figure 12).

Ce déplacement, vérifié entre autres par Choi [26], est plus ou moins prononcé suivant le niveau de réduction

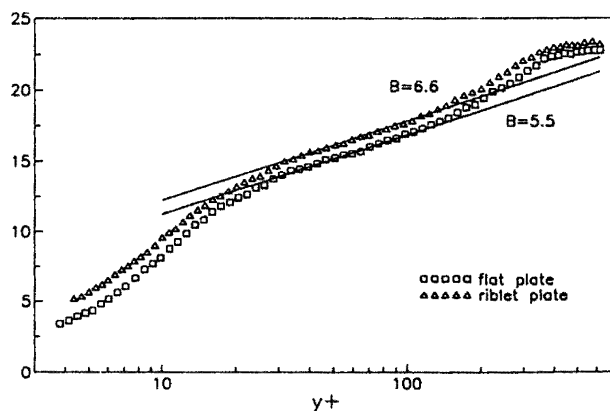


Figure 12. Profils de couche limite sur une paroi rainurée [25].

de traînée et la forme de la section transversale des rainures. Ce décalage vers le haut indiquerait une augmentation de l'épaisseur de la sous-couche visqueuse, donc de la région interne, et pourrait être considéré comme un ajustement de l'équilibre entre la production d'énergie turbulente et la dissipation visqueuse. De façon générale, une augmentation de frottement se traduit par un décalage vers le bas de la loi logarithmique, comme c'est le cas avec des rugosités réparties (par exemple, papier verre); ceci justifie le fait que certains auteurs qualifient les parois rainurées de « rugosité négative ».

Utilisant l'anémométrie laser 2D, Benhalilou et al. [27, 28] ont tracé les profils de vitesse longitudinale moyenne au droit d'un creux, d'un pic et les ont comparés à celui obtenu dans les mêmes conditions sur paroi lisse. L'espacement inter crêtes vaut $s = 2h = 7$ mm; les sondages sont effectués pour des conditions d'écoulement telles que $h^+ = 17$.

Les résultats, dans la région de paroi, sont tracés en variables réduites sur la figure 13 : en ordonnée, la vitesse longitudinale est rendue sans dimension par la vitesse de frottement u^* alors qu'en abscisse y_1^+ 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.

Les résultats sont comparés à ceux de Vukoslavcevic et al. [29] pour des conditions à peu près similaires d'écoulement ($s = 2h$, $h^+ = 17,5$). Le moyen de mesure est, en revanche, différent (anémométrie fil chaud) et le nombre de Reynolds Re plus grand que dans les expériences de Benhalilou et al. [27, 28], 1 000 contre 300. Sur paroi lisse comme au niveau du pic, les profils me-

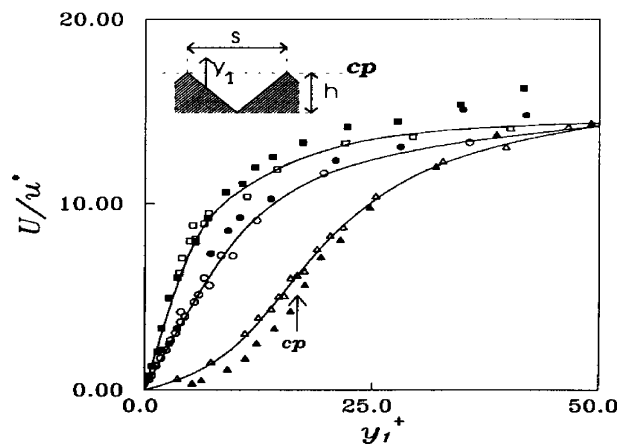


Figure 13. Profils de vitesse longitudinale moyenne sur la paroi rainurée (\square : pic, \triangle : creux, \circ : paroi lisse [28], \blacksquare : pic, \blacktriangle : creux, \bullet : lisse [29]).

surés sont en très bon accord; des écarts existent dans le fond des rainures inhérents aux incertitudes de mesure.

Ces deux séries de mesures confirment que le champ dynamique moyen de l'écoulement est caractérisé par une région de cisaillement intense près de la crête, et de très faible cisaillement dans le creux. La première région est beaucoup plus réduite que la seconde justifiant qu'une réduction moyenne puisse être obtenue sur l'envergure globale de la rainure, pour certaines sections de rainures.

Des mesures de profils de fluctuations turbulentes ont été obtenus par Park et al. à l'intérieur d'une rainure par utilisation d'une sonde miniature à 4 fils chauds [30]. Les symboles correspondants aux sondages menés au droit d'une crête ou d'un pic sont fournis sur la partie supérieure de la figure 14. Les tensions normales de Reynolds sont réduites par la vitesse de frottement déduite des sondages réalisés sur la paroi lisse. Les tensions turbulentes sont plus importantes sur les pics que dans les creux des parois rainurées; quelques sondages effectués avec une sonde mono-fil centrée sur le creux (symbole \times) confirment les observations précédentes. Benhalilou et al. [27, 28] retrouvent ces résultats et précisent la position des profils de fluctuations de vitesse par rapport à ceux mesurés sur paroi lisse : la fluctuation longitudinale u' est sensiblement plus élevée sur une crête que sur paroi lisse et bien plus faible dans le creux. Les fluctuations normales et transverses ont des comportements proches de la fluctuation longitudinale; les diminutions importantes de v' et w' dans les rainures semblent indiquer que l'agitation transversale est entravée par la présence des rainures. Ceci a souvent été présenté comme étant un effet stabilisateur probable des parois rainurées sur l'écoulement turbulent.

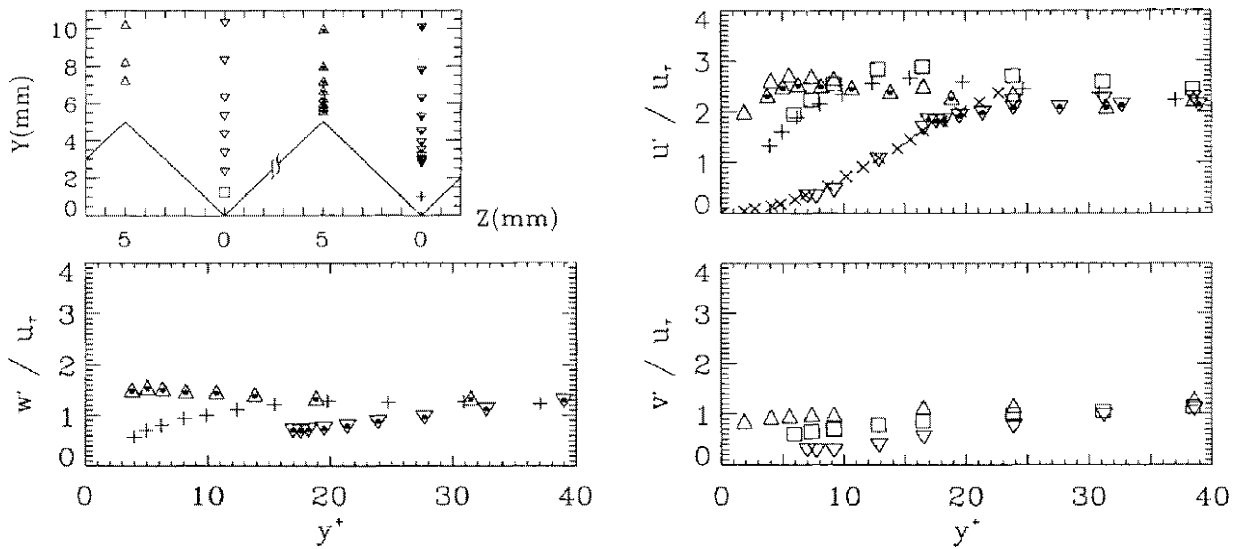


Figure 14. Profils de fluctuations de vitesse au droit d'une paroi rainurée [30].

L'évaluation de l'énergie cinétique de turbulence, déduite des mesures de tensions normales, montre une augmentation importante au droit d'une crête et une réduction significative dans le creux, par rapport à une paroi lisse [27, 28]. Un effet similaire est observé sur le profil de frottement turbulent, mais les variations relatives par rapport au cas de la paroi lisse ne sont pas tout à fait comparables. A une hauteur y^+ voisine de 9 unités de paroi au dessus du plan des crêtes (soit une douzaine d'unités de parois, utilisant le concept de hauteur de « protusion ») la production de turbulence est sensiblement plus faible (-5%) que dans le cas d'une paroi lisse.

Ces résultats ont mis en lumière des effets importants induits sur les profils de vitesse moyenne et fluctuante, du fait de la présence d'une paroi rainurée dans un écoulement turbulent. Cependant, aucun consensus ne se dégage vraiment sur la façon dont les riblets agissent sur les très petites structures présentes dans la région de paroi ; des conclusions contradictoires sur la fréquence de « bursting » ou bien sur l'espacement des lanières de fluide à faible vitesse, peuvent même être avancées par application de l'analyse conditionnelle, par exemple suivant le seuil de détection choisi ou le type de sonde utilisée. Il est raisonnable de penser que des changements modestes interviennent sur la structure de la turbulence, et qu'ils seraient davantage attribués à des conséquences secondaires plutôt qu'à des effets primaires.

Il est à noter que des tentatives de mesures de variations de fluctuations de pression et de modification de transfert de chaleur ont été réalisées en aval de parois rai-

nurées, mais ont donné des résultats contradictoires. Les mesures de transfert de chaleur sont très délicates du fait des contributions radiatives et convectives présentes ; il serait souhaitable d'essayer d'apporter des conclusions sur ce dernier point compte tenu du potentiel énorme d'applications industrielles d'une telle modification de la paroi pour réduire le frottement turbulent et éventuellement augmenter les transferts de chaleur (pipe-line, par exemple).

5. APPROCHE NUMÉRIQUE

De nombreuses tentatives de calcul ont été faites pour des écoulements internes et externes se développant sur des parois rainurées, par application de codes résolvant les équations de Navier–Stokes ou leur forme parabolisée. Les résultats obtenus sont très souvent contradictoires du fait, d'une part, de la difficulté de générer un maillage épousant le mieux possible la géométrie de proche paroi autour des stries et, d'autre part, d'appliquer une modélisation correcte de la turbulence dans cette région. Des modèles faisant appel à la résolution d'équations de transport de type $k-\varepsilon$ n'ont pas permis de vérifier les observations expérimentales [31].

La simulation numérique directe, qui résout par contre les équations de Navier–Stokes sans faire appel à la modélisation de la turbulence, a été également utilisée : elle s'avère très utile, car aux approximations numériques

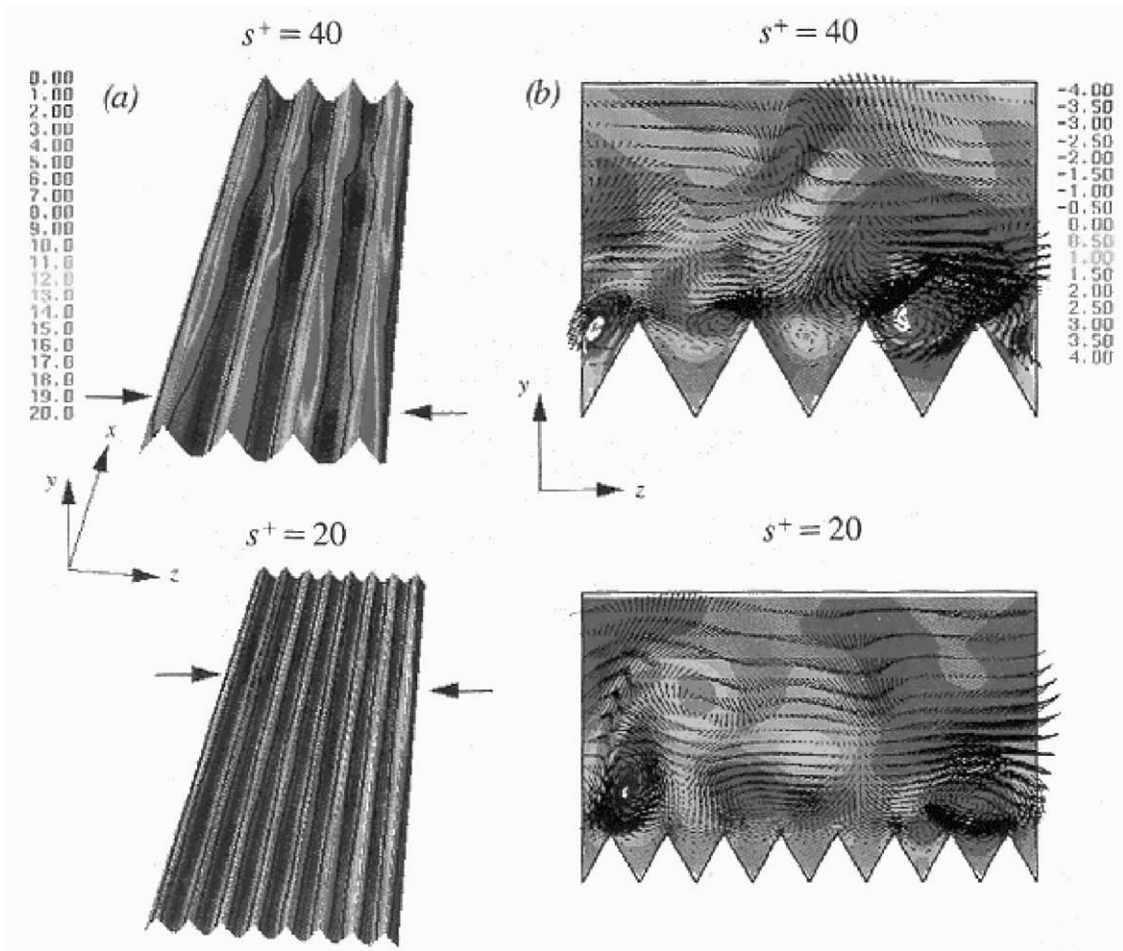


Figure 15. Résultats de DNS sur des parois rainurées [32].

près, elle reflète, en principe, le comportement réel de l'écoulement même dans ses détails les plus fins. Les simulations d'un écoulement de canal dont une paroi était rainurée ont permis d'obtenir une réduction de frottement turbulent et de vérifier certaines observations expérimentales sur la modification de l'écoulement turbulent [32]. Des résultats sont fournis pour deux cas de calcul correspondant soit à une augmentation de traînée ($s^+ = 40$) soit à une réduction ($s^+ = 20$) (figure 15). La variation de traînée est estimée à partir de l'intégration du cisaillement moyen le long de la paroi de la rainure. Ces simulations ont confirmé le décalage vers le haut de la loi logarithmique de paroi pour $s^+ = 20$ et vers le bas pour $s^+ = 40$, ainsi que l'existence d'importantes réductions sur les profils de fluctuations turbulentes suivant les directions normale et transversale à la paroi.

Choi et al. ont même avancé un certain nombre de mécanismes possibles pouvant expliquer l'influence des riblets sur les tourbillons longitudinaux contrarotatifs présents dans la région de proche paroi, au voisinage immédiat des rainures [32]. La dimension moyenne des tourbillons calculés est de l'ordre d'une trentaine d'unités de parois. Pour des configurations conduisant à une réduction du frottement moyen, les tourbillons restent au dessus des rainures; en conséquence seule la crête des rainures est exposée à un cisaillement intense dû au mouvement dirigé vers la paroi du fluide à vitesse élevée. Pour des rainures de plus grande dimension, ces tourbillons pénètrent dans la rainure et, de fait, fournissent un frottement plus grand.

Ce mécanisme d'action des parois rainurées sur la structure de proche paroi a été également confirmé par

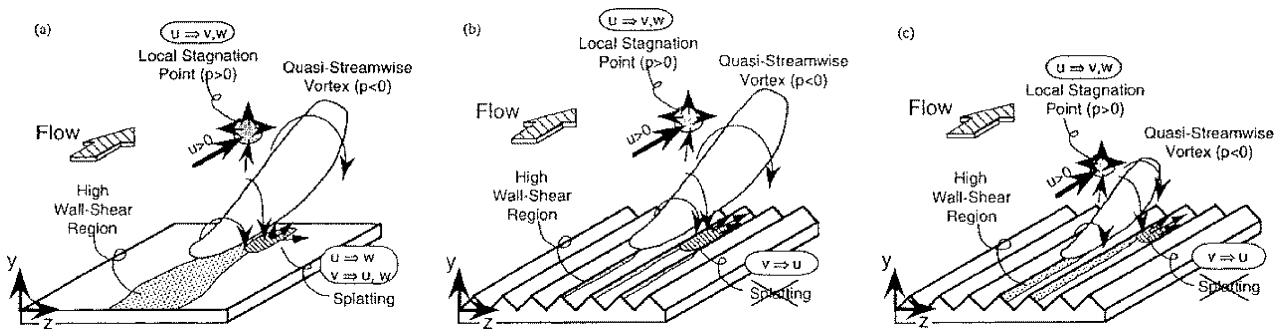


Figure 16. Schématisation de l'écoulement au voisinage : (a) d'une paroi lisse, (b) d'une paroi rainurée conduisant à une réduction du frottement turbulent, (c) d'une paroi rainurée conduisant à une augmentation du frottement turbulent [33].

Suzuki et al. à travers leur modélisation conceptuelle de l'écoulement turbulent dans la région de proche paroi (figure 16) [33].

6. CONCLUSIONS

Dans le domaine de la réduction de traînée, la diminution du frottement constitue un enjeu considérable 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.

Quel que soit le régime de l'écoulement, subsonique, transsonique ou supersonique, des réductions maximales sur la traînée de frottement de 6 à 8 % ont pu être obtenues et confirmées pour des rainures de section transversale triangulaire. Des essais sur des maquettes d'avions de transport moderne en soufflerie industrielle ont également validé les résultats mis en évidence sur des corps de forme générique par le biais de moyens de laboratoire. Enfin, les essais en vol conduits par Airbus Industrie et ses partenaires sur l'avion prototype A320 ont clairement montré que la réduction de traînée due aux riblets était maintenant bien établie dans les milieux aérodynamique et aéronautique.

L'application industrielle de cette modification de paroi à l'avion se heurte encore à plusieurs obstacles, tels que : le vieillissement, la dégradation dans le temps des caractéristiques géométriques des parois rainurées, la résistance du revêtement aux rayons ultra-violet, mais aussi le temps d'installation (et d'enlèvement) et l'excédent de poids qu'ils induisent, du même ordre de grandeur il est

vrai que celui attribué à une couche de peinture. Tous ces éléments devront être pris en compte par l'industriel de la construction aéronautique en cas d'une application future. A titre indicatif, une application opérationnelle par Airbus Industrie est en cours sur un avion long courrier, en coopération avec la société 3M et Cathay Pacific.

Des applications diverses ont également été réalisées ou envisagées dans le milieu automobile ou naval (bateau de la coupe de l'America, huit avec barreurs de la course Cambridge-Oxford, combinaison de nage...), mais n'ont pas suscité un intérêt aussi marqué que pour le milieu aéronautique.

RÉFÉRENCES

- [1] Cousteix J., Arnal D., Coustols E., La réduction de traînée de frottement aérodynamique, Nouvelle Revue d'Aéronautique et d'Astronautique 1 (1993) 23-31.
- [2] Cousteix J., Schmitt V., Réduction de la traînée aérodynamique, Nouvelle Revue d'Aéronautique et d'Astronautique 1 (1997) 34-41.
- [3] Cousteix J., Turbulence et couche limite, Cepadues Edition, 1989.
- [4] Blackwelder R.F., The eddy structures in bounded shear flows, in : Cousteix J. (Ed.), Special Course on Skin Friction Drag Reduction, AGARD Report No. 786, 1992, Papier No. 6.
- [5] Kline S.J., Robinson S.K., Turbulent boundary layer structure : progress, status and challenge, in : Gyr A. (Ed.), Structure of Turbulence and Drag Reduction, IUTAM Symp., Springer-Verlag, 1990, pp. 3-22.
- [6] Hinze J.O., Turbulence, McGraw-Hill, New York, 1975.
- [7] Smith C.R., Walker J.D.A., Haidari A.H., Taylor B.K., Hairpin vortices in turbulent boundary layers : the implications for reducing surface drag, in : Gyr A. (Ed.), Structure of Turbulence and Drag Reduction, IUTAM Symp., Springer-Verlag, 1990, pp. 51-58.
- [8] Bushnell D.M., Hefner J.N. (Eds.), Viscous Drag Reduction in Boundary Layers, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 123, AIAA Publishers, 1990.

- [9] Coustols E. (Ed.), *Turbulence Control by Passive Means*, Kluwer Academic, 1990.
- [10] Choi K.-S., Prasad K.K., Truong T.V. (Eds.), *Emerging Techniques in Drag Reduction*, Mech. Engrg. Publications, 1996.
- [11] Cousteix J. (Ed.), *Special Course on Skin Friction Drag Reduction*, AGARD Report No. 786, 1992.
- [12] Choi K.-S., *European drag reduction research — recent developments and current status*, in: Proc. Int. Symp. on Seawater Drag Reduction, Newport, RI, USA, 1998.
- [13] Walsh M.J., Anders J.B. Jr., *Riblet/LEBU research at NASA Langley*, Appl. Sci. Res. 46 (3) (1989) 255–262.
- [14] Walsh M.J., *Riblets*, in: Bushnell D.M., Hefner J.N. (Eds.), *Viscous Drag Reduction in Boundary Layers*, Progress in Aeronautics and Astronautics, Vol. 123, AIAA Publishers, 1990, pp. 203–261.
- [15] Bechert D.W., Bruse M., Hage W., Van der Hooven J.G.T., Hoppe G., *Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry*, J. Fluid Mech. 338 (1997) 59–87.
- [16] Coustols E., *Riblets : main known and unknown features*, in: Choi K.-S., Prasad K.K., Truong T.V. (Eds.), *Emerging Techniques in Drag Reduction*, Mech. Engrg. Publications, 1996, pp. 3–43.
- [17] Coustols E., Savill A.M., *Turbulent skin friction drag reduction by active and passive means*, in: Cousteix J. (Ed.), *Special Course on Skin Friction Drag Reduction*, AGARD Report No. 786, 1992, Papier No. 8.
- [18] Coustols E., Cousteix J., *Turbulent boundary layer manipulation in zero pressure gradient flows*, in: Proc. 16th ICAS Congress, Vol. 2, 1988, pp. 999–1013, Papier 88-3.7.3.
- [19] Coustols E., Cousteix J., *Experimental investigations of turbulent boundary layers manipulated with internal devices : riblets*, in: Gyr A. (Ed.), *Structure of Turbulence and Drag Reduction*, IUTAM Symp., Springer-Verlag, 1990, pp. 577–584.
- [20] Viswanath P.R., *Riblets on airfoils and wings : a review*, AIAA Paper 99-3402, 1999.
- [21] Coustols E., *Behaviour of internal manipulators : riblet models in subsonic and transonic flows*, AIAA Paper 89-0963, 1989.
- [22] Coustols E., Cousteix J., *Performances of riblets in the supersonic regime*, AIAA J. 32 (2) (1994) 431–433.
- [23] Robert J.-P., *Drag reduction : an industrial challenge*, in: Cousteix J. (Ed.), *Special Course on Skin Friction Drag Reduction*, AGARD Report No. 786, 1992, Papier No. 2.
- [24] Bechert D.W., Bartenwerfer M., *The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs*, J. Fluid Mech. 206 (1989) 105–130.
- [25] Baron A., Quadrio M., *Some preliminary results on the influence of riblets on the structure of a turbulent boundary layer*, Int. J. Heat Fluid Flow 14 (3) (1993) 223–230.
- [26] Choi K.-S., *Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets*, J. Fluid Mech. 208 (1989) 417–458.
- [27] Benhalilou M., Anselmet F., Fulachier L., *Conditional Reynolds stress on a V-grooved surface*, Phys. Fluids 6 (6) (1994) 2101–2117.
- [28] Benhalilou M., Anselmet F., Fulachier L., *Near-wall characteristics of a turbulent boundary layer over riblets*, Eur. J. Mech. B Fluids 13 (2) (1994) 211–236.
- [29] Vukoslavcevic P., Wallace J.M., Balint J.-L., *Viscous drag reduction using streamwise-aligned riblets*, AIAA J. 30 (4) (1992) 1119–1122.
- [30] Park S.-R., Wallace J.M., *Flow alteration and drag reduction by riblets in a turbulent boundary layer*, AIAA J. 32 (1) (1994) 31–38.
- [31] Djenidi L., Antonia R.A., *Riblet flow calculation with a low Reynolds number $k-\epsilon$ model*, Appl. Sci. Res. 50 (1993) 267–282.
- [32] Choi H., Moin P., Kim J., *Direct numerical simulation of a turbulent flow over riblets*, J. Fluid Mech. 255 (1993) 503–540.
- [33] Suzuki Y., Kasagi N., *On the turbulent drag reduction mechanism above a riblet surface*, AIAA Paper 93-3257, 1993.
- [34] Stanislas M., Hoyez M.-C., *Analysis of the structure of a turbulent boundary layer with and without a LEBU using light sheet smoke visualisations and hot-wire measurements*, in: Gyr A. (Ed.), *Structure of Turbulence and Drag Reduction*, IUTAM Symp., Springer-Verlag, 1990, pp. 507–515.