

Simulation par approche RANS d'une paroi transpirante

Emmanuel Laroche

Onera The French Aerospace Lab

F-31055 Toulouse - FRANCE

(auteur correspondant : emmanuel.laroche@onera.fr)

Résumé – Le refroidissement par transpiration est une technique qui a fait l'objet de nombreuses études, car elle possède plusieurs avantages par rapport aux solutions habituelles. Au titre de ces avantages, l'homogénéité de la protection, mais également la valeur élevée de l'efficacité de refroidissement constatée peuvent être citées. Le contexte particulier des chambres de combustion fonctionnant à des températures de plus en plus élevées au niveau du foyer, requiert des techniques de refroidissement et/ou de protection thermique optimales pour conserver l'intégrité des matériaux utilisés en paroi, tout en minimisant le débit d'air consommé. En raison de la réglementation sans cesse plus contraignante relative aux nuisances sonores et chimiques de la part de l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile (OIAAC), des efforts importants sont actuellement consentis par les motoristes pour optimiser ces techniques de protection, et le refroidissement au travers de parois transpirantes pourrait être une alternative intéressante aux parois multiperforées actuellement utilisées.

Dans ce contexte, le code CEDRE a été validé sur la base de données de la thèse de J. Bellettre [1], en utilisant une modélisation de la turbulence de type RANS. Cette validation a d'abord été effectuée sur un cas sans gradient de température, afin de valider l'effet du soufflage sur le frottement pariétal pour un écoulement isotherme. Dans un deuxième temps, un gradient de température est imposé entre l'air de refroidissement et l'écoulement principal. Seul l'écoulement du côté du soufflage est considéré. La première étape a consisté en une évaluation du comportement des différents modèles de turbulence disponibles dans le solveur sur un cas donné. Il est montré que seuls les modèles de type $k-\epsilon$, ou $k-\omega$ avec correction de soufflage [2] fournissent une estimation correcte des niveaux de frottement et du flux de chaleur. La réponse des autres modèles peut générer des écarts de l'ordre de 90% et ils ne peuvent donc être utilisés pour prévoir le comportement d'une paroi transpirante. Dans un deuxième temps, il est montré que les modèles adaptés retenus ci-dessus permettent également de reproduire de manière satisfaisante l'influence du soufflage sur les frottements et les flux de chaleur sur une gamme de taux de soufflage allant jusqu'à 1,2%.

[1] Bellettre Jérôme, Transferts de masse et de chaleur dans la couche limite pariétale et à l'intérieur d'une paroi poreuse plane soumise à de l'effusion ou de la transpiration, Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1998

[2] Wilcox DC, Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models, AIAA J, Vol 26, No 11, pp 1299-1310, Nov 1998

Nomenclature

| | | | |
|-----------------------|--|-----------------------------|---|
| k | énergie cinétique de turbulence, $m^2.s^{-2}$ | ν | viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$ |
| M | Taux de soufflage, $M = \frac{\rho_f V_f}{\rho_c V_c}$ | w | Fréquence spécifique turbulente, s^{-1} |
| T | température, K | <i>Indices et exposants</i> | |
| <i>Symboles grecs</i> | | c | côté écoulement chaud |
| κ | constante de Karman | f | côté écoulement froid |
| ε | taux de dissipation spécifique, $m^2.s^{-3}$ | p | paroi |

1. Introduction

Le refroidissement par transpiration est une technique qui a fait l'objet de nombreuses études, car elle possède plusieurs avantages par rapport aux solutions habituelles. Au titre de ces avantages, l'homogénéité de la protection, mais également la valeur élevée de l'efficacité de refroidissement constatée peuvent être citées. Le contexte particulier des chambres de combustion fonctionnant à des températures de plus en plus élevées au niveau du foyer, requiert des techniques de refroidissement et/ou de protection thermique optimales pour conserver l'intégrité des matériaux utilisés en paroi, tout en minimisant le débit d'air consommé. En raison de la réglementation sans cesse plus contraignante relative aux nuisances sonores et chimiques de la part de l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile (OACI), des efforts importants sont actuellement consentis par les motoristes pour optimiser ces techniques de protection, et le refroidissement au travers de parois transpirantes pourrait être une alternative intéressante aux parois multiperforées actuellement utilisées.

L'efficacité de refroidissement obtenue par transpiration dépend de nombreux paramètres. Ces paramètres peuvent être purement liés à l'écoulement (coefficients d'échange côté aspiration ou soufflage), aux caractéristiques du matériau (conductivité thermique, masse volumique, chaleur massique), ou encore à des propriétés liées à la transpiration proprement dite (coefficient d'échange volumique traduisant les échanges de chaleur entre le fluide et le solide dans les pores). Il a ici été privilégiée une logique de travail visant à établir la réduction de flux de chaleur du côté chaud pouvant être apportée une solution de type transpiration. La question posée par cette étude est la capacité d'un code disposant d'une modélisation de la turbulence de type RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) à reproduire la phénoménologie rencontrée.

Il a donc été décidé d'évaluer la capacité du code CEDRE de l'ONERA à reproduire la modification du transfert de chaleur induite par le soufflage sur une configuration de référence pour laquelle les travaux de Belletre ont été retenus [1][2][3]. Ces travaux présentent l'originalité de quantifier les modifications induites par le soufflage sur les frottements et flux de chaleur à la paroi en présence d'un gradient de température conséquent. La validation du code CEDRE a d'abord été effectuée sur un cas sans gradient de température entre les écoulements chaud et froid, afin d'estimer la capacité du code à restituer l'effet du soufflage sur le frottement pariétal pour un écoulement isotherme. Dans un deuxième temps, un gradient de température est imposé entre l'air de refroidissement et l'écoulement principal, et enfin l'influence du taux de soufflage est étudiée.

2. Evaluation des transferts pariétaux en présence d'une effusion de gaz

2.1. Description de la configuration d'essai

La veine d'essai étudiée est parallélépipédique de 2 m de longueur, 0,5 m de largeur, 0,2 m de hauteur [1]. Compte tenu de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de couche limite en fin de plancher (2 cm), l'écoulement peut être considéré comme bidimensionnel. Une plaque poreuse de longueur 0,6 m peut être intégrée de manière modulable dans le plancher de la veine. L'injection d'air dans la veine poreuse se fait selon un caisson d'injection. L'ensemble du système utilisé peut être visualisé sur la figure 1.

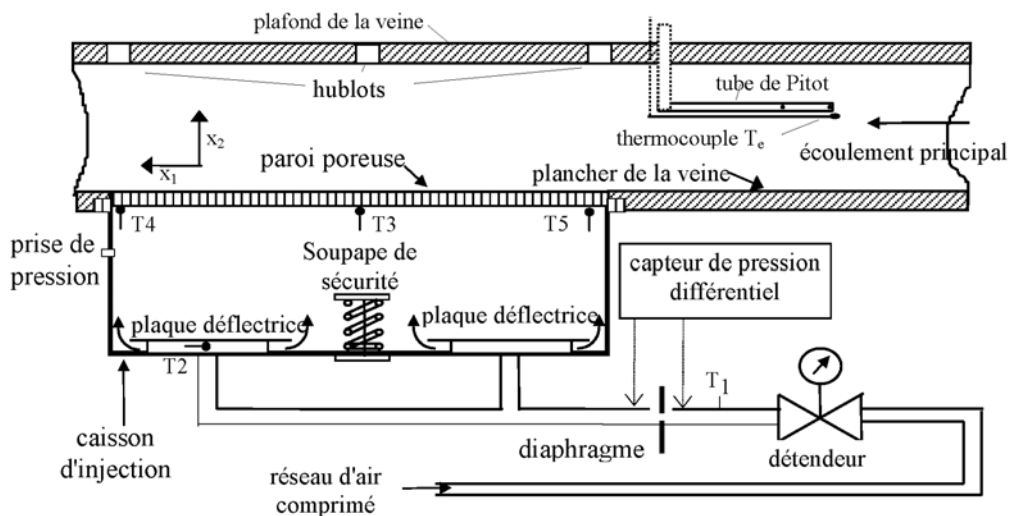


Figure 1 : Description du montage expérimental

Pour le calcul effectué, nous considérons le développement de la couche-limite sur le plancher de la veine sur une longueur de 1,25 m, cette partie imperméable étant suivie par une paroi poreuse de 0,3 m de longueur. L'écoulement principal correspond à une vitesse de 10 m/s, et le taux de turbulence est de 1%. Le nombre de Reynolds en sortie de la plaque est suffisant pour que la transition se soit opérée, et que la couche limite soit turbulente. L'injection d'air froid (dans le cas avec gradient de température) se fait au travers de la paroi poreuse et est caractérisée par le taux de soufflage M .

2.2. Modèle numérique

Concernant le maillage, le choix effectué ici est de privilégier une approche bas Reynolds. La raison principale en est que le soufflage induit une modification des lois de paroi qui seraient à utiliser à maillage plus grossier. En effet, Stevenson a montré que le soufflage agissait sur le profil de vitesse dans la zone interne de la couche limite au travers d'un paramètre

adimensionnel supplémentaire $v_p^+ = \frac{v_p}{u_\tau}$ (avec $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho_p}}$) [4]. Pour des Re_0 compris entre

1000 et 6000, il aboutit à la relation suivante :

$$\frac{2}{v_p^+} \left[\sqrt{(1 + v_p^+ U^+)} - 1 \right] = \frac{1}{\chi} \ln(y^+) + 5,5$$

Simpson [5] a proposé une modification de cette loi pour reproduire ces résultats expérimentaux, et obtient la relation suivante :

$$\frac{2}{v_p^+} \left[\sqrt{(1 + v_p^+ U^+)} - \sqrt{(1 + 11v_p^+)} \right] = \frac{1}{\chi} \ln\left(\frac{y^+}{11}\right)$$

Or, les différentes lois de paroi disponibles dans CEDRE, ne tiennent pas compte de l'effet d'injection, et sont calées sur la loi logarithmique classique. Elles ne sont donc pas adaptées à la description de l'écoulement ici considéré, sauf à considérer une région où le soufflage a peu d'effet. Les calculs réalisés ont été faits en utilisant les différents modèles de turbulence du code CEDRE : modèle k-ε Dutoya-Bertier, modèle k-ω BSL de Menter, modèle k-ω SST de Menter, modèle k-l Bertier-Dutoya et enfin modèle de Billard Laurence [7]. Pour l'ensemble des ces modèles à l'exception de ceux à base ω, des conditions aux limites classiques ont été adoptées pour les variables turbulentes [7]. Pour le modèle k-ω SST de Menter, une condition aux limites plus adaptée à l'injection pariétale a en outre été testée. Elle est détaillée dans [6], et consiste à changer la condition à la paroi classique pour ω par :

$$\omega = \frac{u_\tau^2}{\nu} S_B, \quad S_B = \frac{20}{v_p^+ (1 + 5v_p^+)}, \quad \text{et } v_p^+ = \frac{\nu}{u_\tau}$$

Du point de vue des conditions aux limites, l'entrée est de type 'débit-Ti'. Le débit surfacique est fixé à 11,1 kg/m²/s. La Ti est fixée à 293 K. La condition de sortie est de type 'sortie subsonique', la pression de sortie étant fixée à 101325 Pa. La paroi haute, comme le plancher imperméable, est considérée comme une condition de type paroi adiabatique. Ce plancher s'étend jusqu'à x=1,27 m. Concernant la plaque poreuse, elle est modélisée par un soufflage homogène, tout en considérant que l'on a une paroi, et non une condition de type 'entrée'. En d'autres termes, la condition introduit un flux de masse, mais se comporte pour les flux Navier-Stokes comme une paroi.

2.3. Validation sur un cas isotherme

2.3.1. Dynamique de l'écoulement. Influence du modèle de turbulence

Les écoulements chaud et froid sont à température ambiante. Le taux de soufflage M considéré est de 1%. L'injection au travers de la paroi poreuse conduit à un écoulement non symétrique. Elle se traduit également par une couche limite basse plus épaisse que sur la paroi haute, avec une modification de ses caractéristiques turbulentes, sur laquelle nous reviendrons ci-après. La comparaison porte sur les profils de vitesse en sortie de plancher (x=1,2 m) et en sortie de partie poreuse (x=1,54 m). Les résultats de calcul CEDRE sont comparés aux données obtenues par anémométrie laser-Doppler. La Figure 2 présente la comparaison des profils de vitesse obtenus pour les différents modèles en sortie de plancher imperméable et de paroi poreuse. Il est à noter que les écarts visualisés sur cette dernière figure sont directement liés aux écarts obtenus sur le frottement (et le flux de chaleur pour un cas avec gradient de température). On remarque que des écarts sur les profils de vitesse existent déjà en sortie de plancher imperméable, mais sont considérablement amplifiés dans la zone poreuse. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'on considère le gradient de vitesse à la paroi. Dans tous les cas, le modèle k-L présente un profil s'écartant sensiblement des mesures expérimentales. Cet écart est jugé encore plus important en présence d'une injection pariétale.

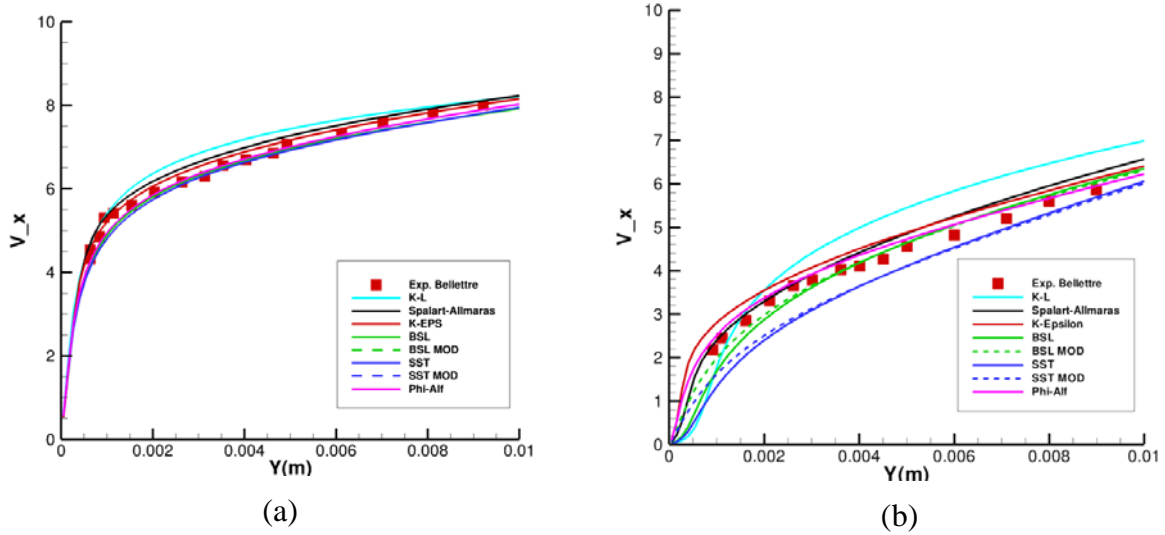


Figure 2 : Profils de vitesse proche paroi en $x=1,2$ m (a) et $x=1,54$ m (b) (Référence expérience [1])

La comparaison avec les mesures de Bellettre [1] semble indiquer que les modèles à base ϵ conduisent à des profils en meilleur accord avec l'expérience.

2.3.2. Évaluation du coefficient de frottement. Influence du modèle de turbulence

Une question fondamentale est d'évaluer l'effet du soufflage sur le frottement. Nous avons donc cherché à évaluer la façon dont les différents modèles de turbulence répondaient, pour un taux de soufflage fixé à 1%. Cette comparaison est effectuée à une position donnée, en $x=1,54$ m, soit en sortie de plaque poreuse. Il est à noter, que dans [1], ce coefficient est évalué sur la base des profils de vitesse et de la relation intégrale suivante :

$$\frac{C_f}{2} = 0,012 \text{Re}_\theta^{-0,25} \left[\frac{\ln(1 + B_F)}{B_F} \right]^{0,7}$$

où θ représente l'épaisseur de quantité de mouvement de la couche-limite, soit

$$\theta = \int_0^\infty \frac{\rho U}{\rho_E U_E} \left(1 - \frac{U}{U_E}\right) dy$$

et les quantités indicées E représentant l'écoulement à l'extérieur de la couche limite. En outre, B_F est défini par :

$$B_F = \frac{2M}{C_f}$$

où M représente le taux de soufflage. La connaissance des profils de vitesse permet ainsi de déterminer l'épaisseur de quantité de mouvement du profil, et en conséquence du frottement

associé. Nous comparons cette valeur à la valeur du frottement issue du calcul CEDRE (c'est à dire sans passer par une équation intégrale). Cette comparaison est donc fortement non-conservative, puisque l'on peut penser que l'évaluation via la corrélation 'lisse' les éventuels écarts. Toutefois, vis à vis des calculs futurs, nous avons jugé que seule l'évaluation sans corrélation était acceptable. Il est en outre précisé dans [1] que les résultats obtenus via la corrélation sont cohérents avec le résultat fourni à la paroi. L'analyse du tableau 1 confirme les conclusions obtenues par l'examen des profils de vitesse. Seuls les modèles à base ε , ou ceux à base ω avec condition d'injection modifiée, conduisent à une estimation acceptable du frottement. L'erreur commise est de l'ordre de 10 à 15% pour les modèles à base ε , et de l'ordre de 30 à 40% pour les modèles modifiés à base ω . Pour les autres modèles l'erreur peut atteindre 90%. Ces conclusions sont conformes à l'analyse des profils de vitesse proche paroi (Figure 2).

| | $C_f/2$ | Erreur |
|---------------|----------|--------|
| BELLETTRE | 4,00E-04 | 0,00% |
| SA | 1,47E-04 | 63,20% |
| KL | 3,67E-05 | 90,83% |
| KEPS Dutoya | 3,45E-04 | 13,84% |
| BSL | 6,25E-05 | 84,38% |
| BSL_mod | 2,85E-04 | 28,72% |
| SST | 5,21E-05 | 86,99% |
| SST mod | 2,50E-04 | 37,38% |
| $\phi-\alpha$ | 3,43E-04 | 14,28% |

Tableau 1 : Comparaison des $C_f/2$ pour les différents modèles

2.4. Validation sur un cas anisotherme

2.4.1. Dynamique de l'écoulement

L'écoulement maintenant étudié correspond à un cas où l'air de la veine est porté à 100° C, alors que celui traversant la paroi poreuse est en équilibre thermique avec la paroi poreuse à 43°C. Le débit traversant la paroi poreuse est en outre identique au précédent.

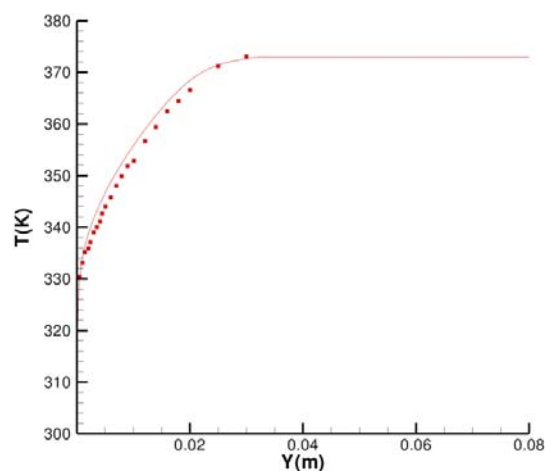


Figure 3 : Profil de vitesse à $x=1,54$ m - comparaison expérience-calcul (Référence expérience [1])

Le calcul est fait en utilisant le modèle k-ε qui avait donné les meilleurs résultats pour la configuration purement dynamique. La comparaison calcul/expérience est présentée sur la Figure 3. L'accord entre les deux profils est jugé bon, ce qui valide l'approche pour un cas anisotherme.

3. Influence du taux de soufflage sur le frottement et le flux de chaleur

Les paragraphes précédents ont montré que les modèles à base ε, et dans une moindre mesure, les modèles à base ω avec modification de Wilcox, étaient à même de décrire de manière satisfaisante une interaction écoulement principal/écoulement secondaire transpirant, et ce pour un taux de soufflage de l'ordre de 1%. La question alors posée est de savoir si ces modèles sont capables de restituer correctement cette interaction sur toute une plage de taux de soufflage. La cible visée est une plage de 0 à 1,2%. Nous avons donc étudié l'évolution du frottement et du flux de chaleur en sortie de plaque poreuse, lorsque l'on fait varier ce taux de soufflage. Les paramètres suivis étaient respectivement le coefficient de frottement (noté Cf) et le nombre Stanton (noté St). L'obtention du Cf est directe, via le frottement. En revanche, la détermination de St passe par la méthodologie suivante. Nous rappelons que :

$$St = \frac{h}{\rho_E C_{pE} U_E} = \frac{\varphi}{\rho_E C_{pE} U_E (T_p - T_{ad})}$$

De manière à être consistant avec les travaux de Bellettre, nous avons supposé pour les calculs CEDRE que nous pouvions confondre la température adiabatique T_{ad} avec T_{ext} , soit 100° C. Pour Bellettre, le nombre de Stanton est évalué à partir de la corrélation suivante :

$$St = 0,0128 Re_{\Delta}^{-0,25} Pr^{-0,5} \left[\frac{\ln(1+B)}{B} \right]^{1,25} (1+B)^{0,25},$$

$$\Delta = \int_0^{\infty} \frac{\rho U}{\rho_E U_E} \frac{T - T_E}{T_p - T_E} dy$$

Cette corrélation est issue des travaux de Whitten, et permet à Bellettre d'obtenir une estimation de ce nombre de Stanton en intégrant les profils de vitesse et température obtenus expérimentalement et par simulation numérique. Il convient de noter que cette approche est adaptée au traitement des couches limites, mais paraît difficilement envisageable dans une chambre de combustion de géométrie complexe, avec un profil de vitesse extérieure fortement hétérogène. Il faut alors exploiter l'information de flux directement extraite de la simulation numérique. Ces réserves faites, nous comparons les résultats obtenus avec CEDRE à ceux des corrélations mentionnées ci-dessus (Figure 4).

Les résultats obtenus par simulation numérique sont bien conformes à ceux de Bellettre, tant au niveau du frottement que du flux de chaleur. L'écart apparaît toutefois plus important au niveau du flux de chaleur, où la pente attendue est moins bien respectée. La simulation numérique reproduit toutefois bien le comportement attendu, à savoir une diminution d'un facteur 8 à 10 des frottements et flux de chaleur pour un soufflage de 1%.

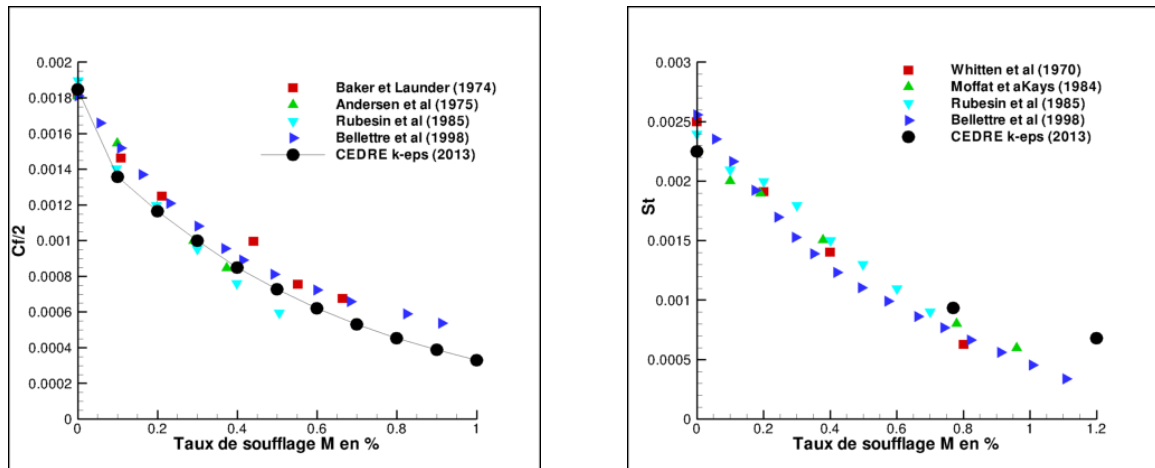


Figure 4: Evolution de $C_f/2$ et St en fonction du taux de soufflage

Le refroidissement par transpiration offre donc une solution très performante d'isolation de la paroi, que l'on peut reproduire de manière satisfaisante par une approche de type turbulence moyennée.

4. Conclusion

Le code CEDRE a été validé sur une la configuration de paroi transpirante étudiée dans la thèse de Bellettre [1]. Des modèles de turbulences adaptés à la configuration ont pu être dégagés, tout au moins pour des écarts de température n'excédant pas 100 K. Le code CEDRE décrit alors de façon satisfaisante la réduction attendue des frottements et du flux de chaleur en fonction du soufflage, sur une plage de taux de soufflage de 0 à 1,2%.

Références

- [1] Bellettre J., Transferts de masse et de chaleur dans la couche limite pariétale et à l'intérieur d'une paroi poreuse plane soumise à de l'effusion ou de la transpiration, Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1998
- [2] Bellettre J., Bataille F., Lallemand A. "A new approach for the study of turbulent boundary layers with blowing", International Journal of Heat Transfer, 42(15), 1999, pp. 2905-2920
- [3] Bellettre J., Bataille F., Lallemand A., "Prediction of thermal protection of walls by blowing with different fluids", International Journal of Thermal Sciences, 38(6), 1999, pp. 492-500
- [4] Stevenson T.N. , Turbulent Boundary Layer with transpiration, AIAA Journal , 1964, Vol 2, n° 8, p 1500-1502
- [5] Simpson R.L., Characteristics of boundary layers at low Reynolds with and without transpiration, J. Fluids, 1970, vol.42, part 4, p 769-802
- [6] Wilcox DC, Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models, AIAA Jal, Vol 26, No 11, pp 1299-1310, Nov 1998
- [7] Wilcox DC, Turbulence Modelling for CFD, 3rd edition, DCW Industries, Inc., La Canada CA, 2006.