

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Département de Génie Mécanique

MEC6616
Aérodynamique Numérique

TPF3
Hiver 2020



Stéfane Sved • 1569161

Virgile Garnier • 2051886

Contents

1	Maillage & Modèles numériques	3
1.1	Modèle de turbulence	4
2	Contours de vitesses à différents Reynolds	5
2.1	Re = 100	5
2.2	Re = 400	5
2.3	Re = 3000 (Modèle $k - \epsilon$ EWT vs. SST Transition)	6
2.4	Re = 7000 (Modèle $k - \epsilon$ EWT vs. $k - \omega$ SST)	7
3	Etude des distances de recollement en fonction du Reynolds	8
3.1	Re = 100 (Laminaire)	8
3.2	Re = 400 (Laminaire)	9
3.3	Re = 3000 (Transition)	10
3.4	Re = 7000 (Turbulent)	11
4	Analyse sur y^+	13
5	Conclusion	13

List of Figures

1	Aperçu du maillage	3
2	Maillage du gap entre l'aile et le volet	3
3	Conditions limites	4
4	Contours de vitesse - Re=100	5
5	Contours de vitesse - Re=400	5
6	Contours de vitesse - Re=3000 (EWT)	6
7	Contours de vitesse - Re=3000 (SST-Transition)	6
8	Contours de vitesse - Re=7000 (EWT)	7
9	Contours de vitesse - Re=7000 ($k - \omega$ SST)	7
10	Vecteurs et τ_w pour $Re = 100$	8
11	Réattachement pour $Re = 400$	9
12	$k - \epsilon$ EWT	10
13	$k - \omega$ SST Transition	10
14	Réattachement pour $Re = 3000$	10
15	EWT	11
16	SST	11
17	Réattachement pour $Re = 7000$	11
18	τ_w - Re = 3000	12
19	τ_w - Re = 7000	12
20	Réattachement à différents Reynolds	12
21	Y^+ pour $Re = 3000$	13
22	Y^+ pour $Re = 7000$	13

1 Maillage & Modèles numériques

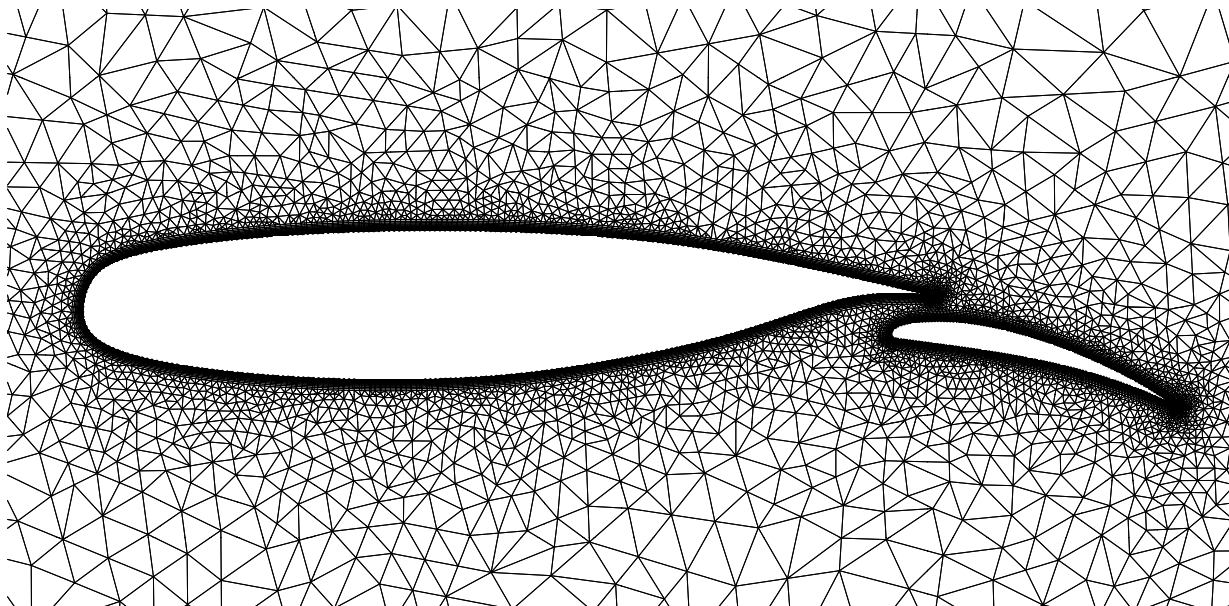


Figure 1: Aperçu du maillage

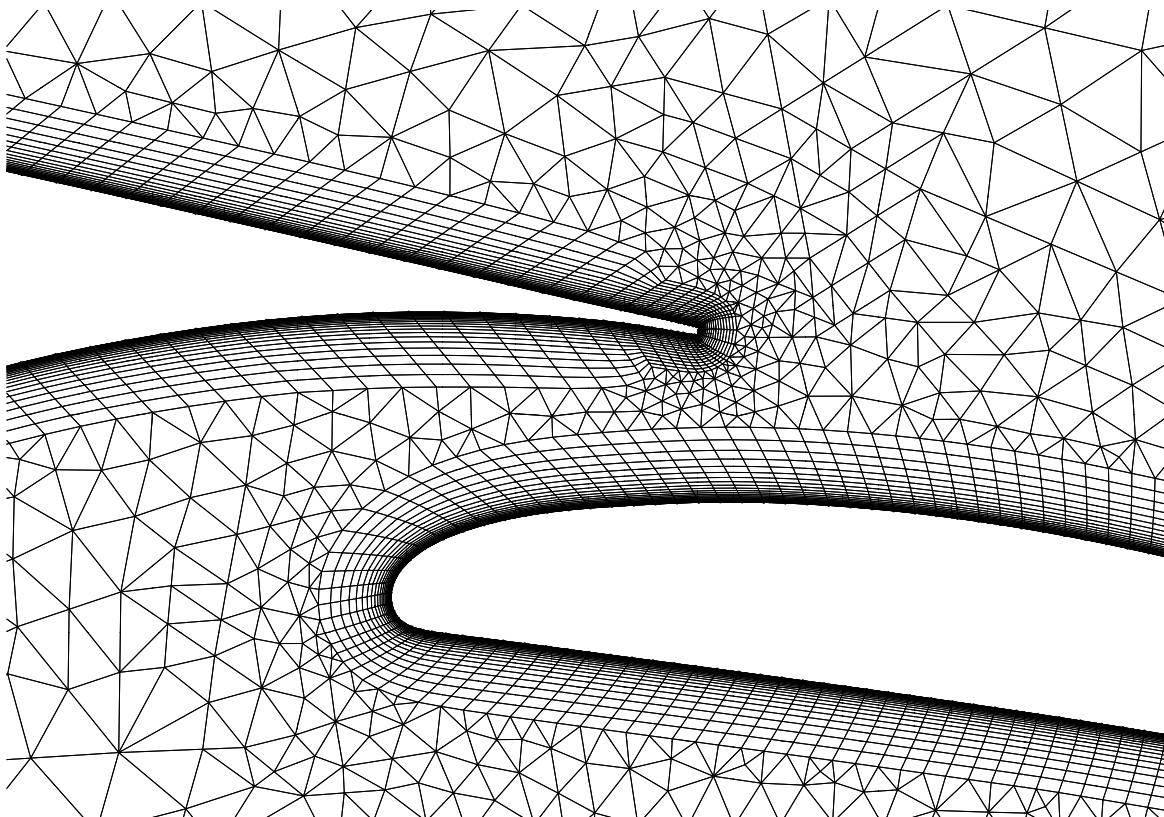


Figure 2: Maillage du gap entre l'aile et le volet

Nombre de cellules	Type	Inflation		
		First layer thickness	Number of layers	Ratio
22 652	Unstructured with inflation	2.5e-5	25	1.2

1.1 Modèle de turbulence

Pour cette étude nous considérons deux différents modèles de turbulence que l'on va comparer. Nous ferons l'analyse entre le modèle *Spalart-Allmaras*, qui est un modèle à une seule équation et qui a été conçu spécifiquement pour des applications en aérospatiale. D'un autre côté, nous étudierons aussi les résultats réalisés avec le modèle $k-\omega$ *SST* qui lui est un modèle RANS à deux équations et qui permet d'avoir une bonne résolution proche de la parois. Tous les deux modèles présentent un bon comportement au gradient de pression adverse et c'est l'une des raisons principales pour lesquelles ils ont été choisis pour cette étude.

Afin d'aller de l'avant avec cette étude nous utiliserons les paramètres suivants pour nos modélisations numériques :

- Solveur: SIMPLE
- Discrétisation spatiale:
 - Gradient : Least Squares Colocated
 - Momentum : Upwind (deuxième ordre)
 - Pression : Deuxième ordre

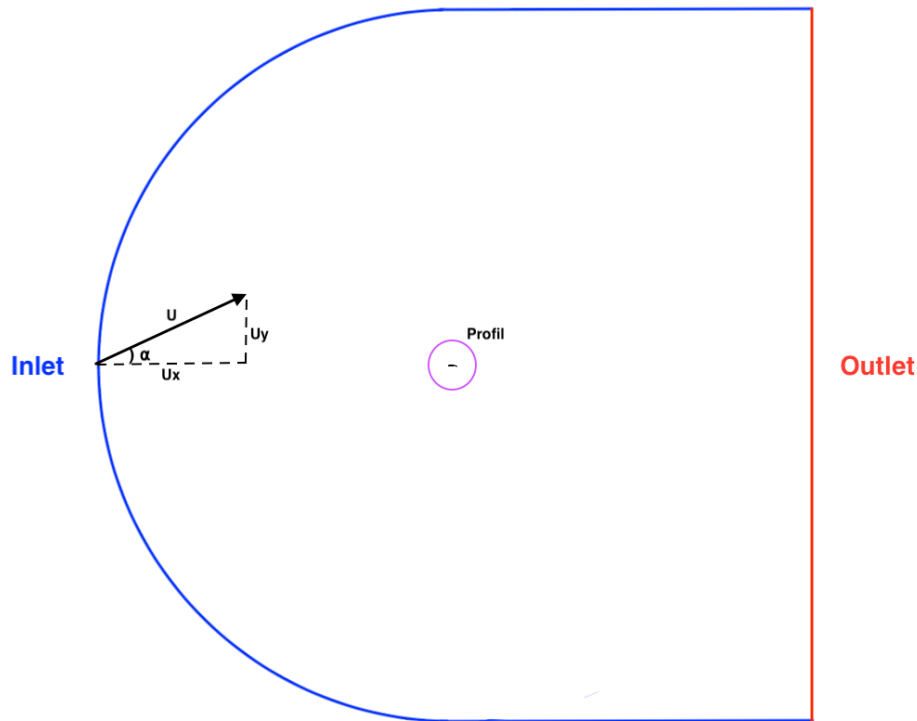


Figure 3: Conditions limites

2 Contours de vitesses à différents Reynolds

Dans cette étude nous traiterons 4 différents écoulements à Reynolds variés. Notamment nous ferons l'analyse sur les nombres de Reynolds suivants : 100, 400, 3000 et 7000.

L'un des intérêts est d'observer les différences d'un point de vue numérique pour plusieurs écoulements de différente nature: laminaire ($Re=100,400$), transitoire ($Re=3000$) et pleinement turbulent ($Re=7000$). Une analyse particulière sera ainsi faite pour le régime transitoire ainsi que pour le régime turbulent. En effet, nous comparerons deux différents modèles de turbulence afin de se prononcer sur le capacité à modéliser l'écoulement. Les contours de vitesses suivants montre le comportement général pour chacun des écoulements mentionnés.

2.1 $Re = 100$

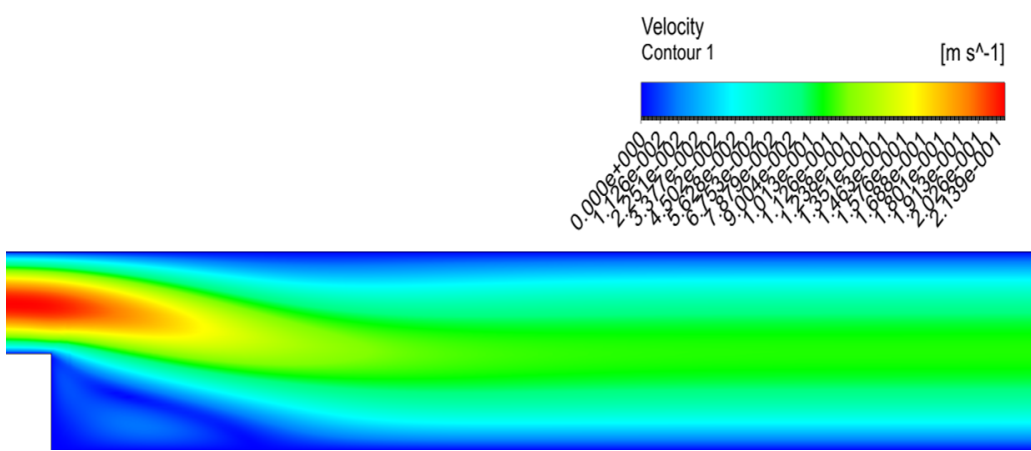


Figure 4: Contours de vitesse - $Re=100$

2.2 $Re = 400$

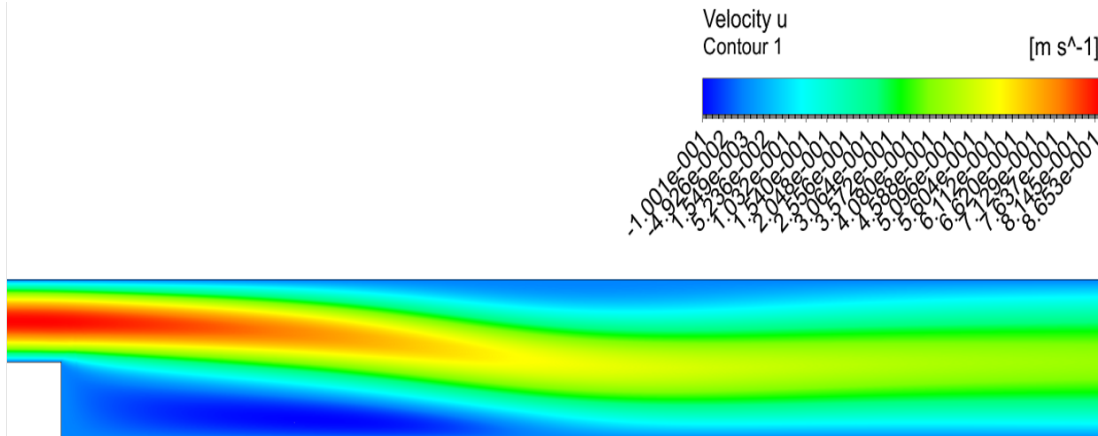


Figure 5: Contours de vitesse - $Re=400$

2.3 $Re = 3000$ (Modèle $k - \epsilon$ EWT vs. SST Transition)

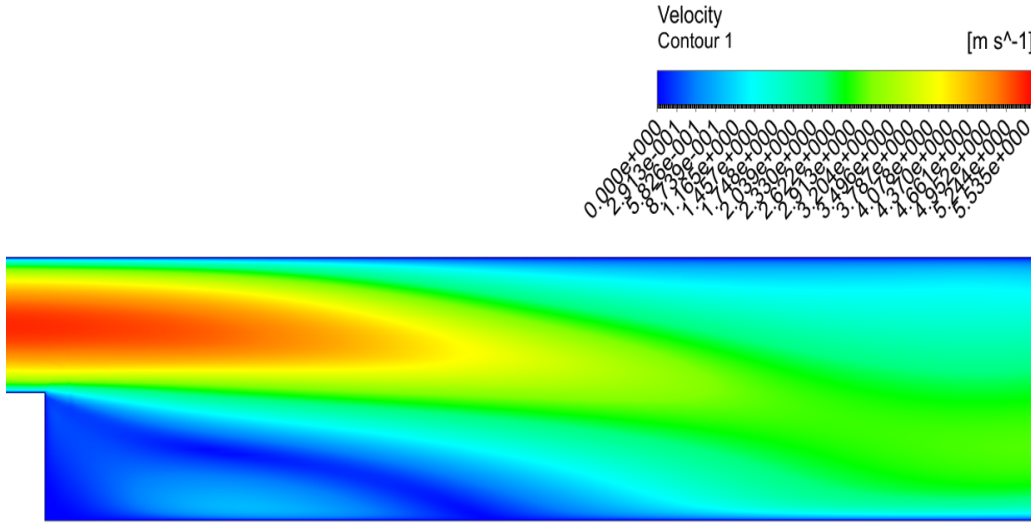


Figure 6: Contours de vitesse - $Re=3000$ (EWT)

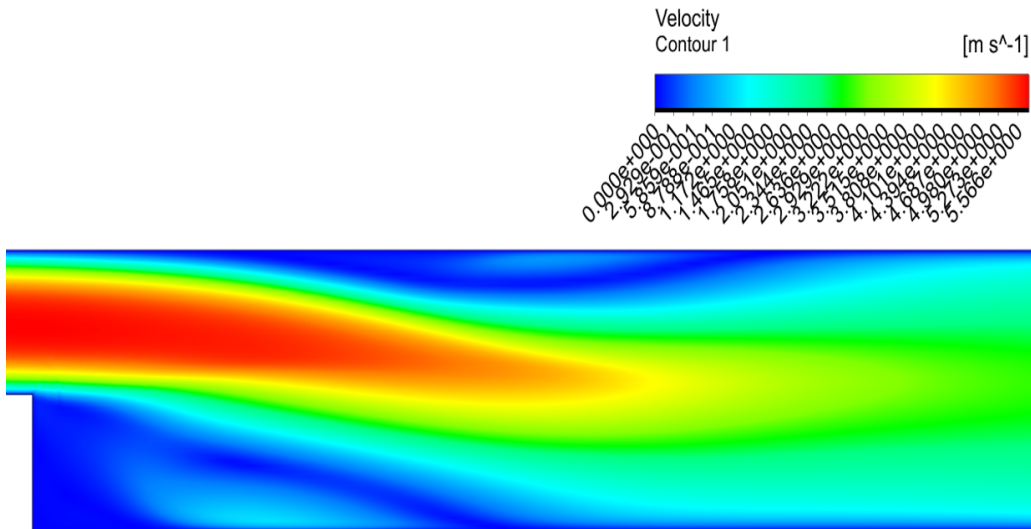


Figure 7: Contours de vitesse - $Re=3000$ (SST-Transition)

En comparant les figures 6 et 7, nous pouvons constater une grande différence de comportement de l'écoulement face à la marche pour un même type d'écoulement. En effet, les deux modèles numériques utilisés semblent être en désaccord surtout lorsqu'on analyse la zone de recirculation qui se forme sur la paroi supérieure du domaine.

Une analyse plus détaillée sera effectuée dans la section suivante en comparant de manière précise les différents points de stagnation présents (soit de recollement ou bien de décollement). De plus, nous discuterons les différences entre chacun des modèles utilisés en tenant compte de la métrique des fonctions de parois y^+ et nous analyserons les raisons de cette différence.

2.4 Re = 7000 (Modèle $k - \epsilon$ EWT vs. $k - \omega$ SST)

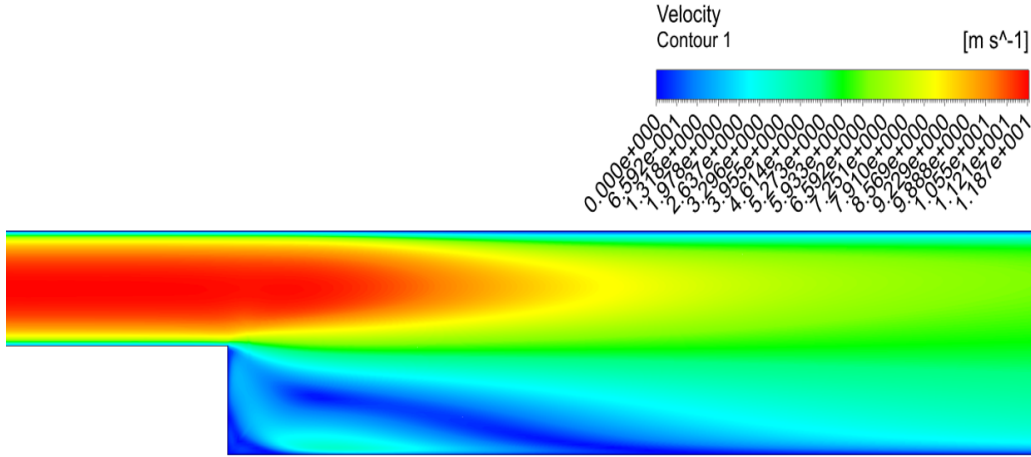


Figure 8: Contours de vitesse - Re=7000 (EWT)

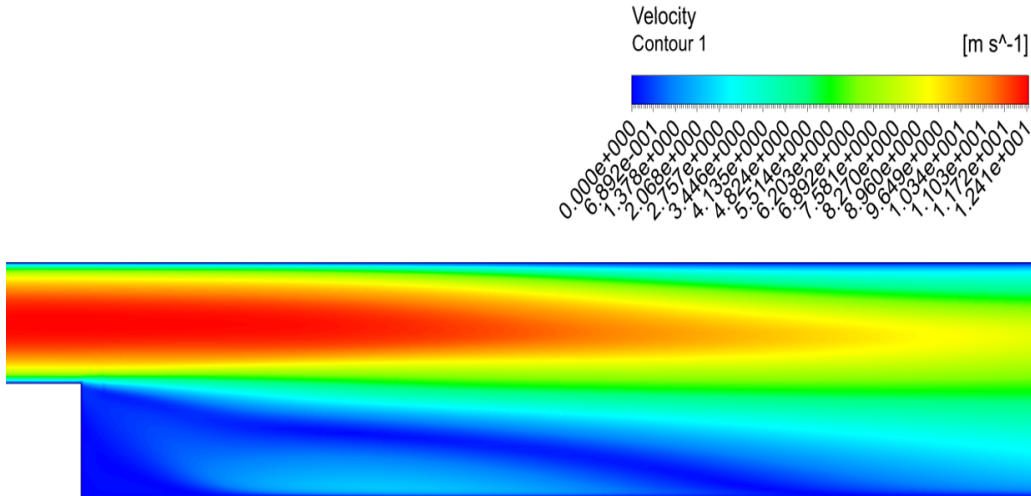


Figure 9: Contours de vitesse - Re=7000 ($k - \omega$ SST)

Bien que les échelles ne soient pas identiques d'une figure à l'autre, nous observons l'influence du nombre de Reynolds sur la distance de réattachement que nous allons observer plus en détail par la suite.

Encore une fois, nous observons ici qu'il existe une différence considérable entre les deux modèles de turbulence choisis. Cette fois-ci, la principale différence peut être aperçue sur la paroi inférieure et sur la distance par rapport à la marche du point de recollement. Les deux modèles choisis pour cet écoule de Re=7000 sont respectivement le modèle $k - \epsilon$ (Enhanced Wall Treatment) et le modèle $k - \omega$ SST. La section suivante qui fait une analyse précise sur le cisaillement à la paroi permettra de se prononcer sur la validité des modèles en le comparant aux résultats expérimentaux.

3 Etude des distances de recollement en fonction du Reynolds

Pour connaître la naissances et la fin des zones de recirculations induites par la marche, nous analyserons le cisaillement aux parois τ_w . Lorsque cette valeur change de signe, l'écoulement a subi une transition de direction de courant témoignant la présence d'un point de stagnation. Celui-ci peut être soit un point de décollement ou bien un point de recollement.

3.1 $Re = 100$ (Laminaire)

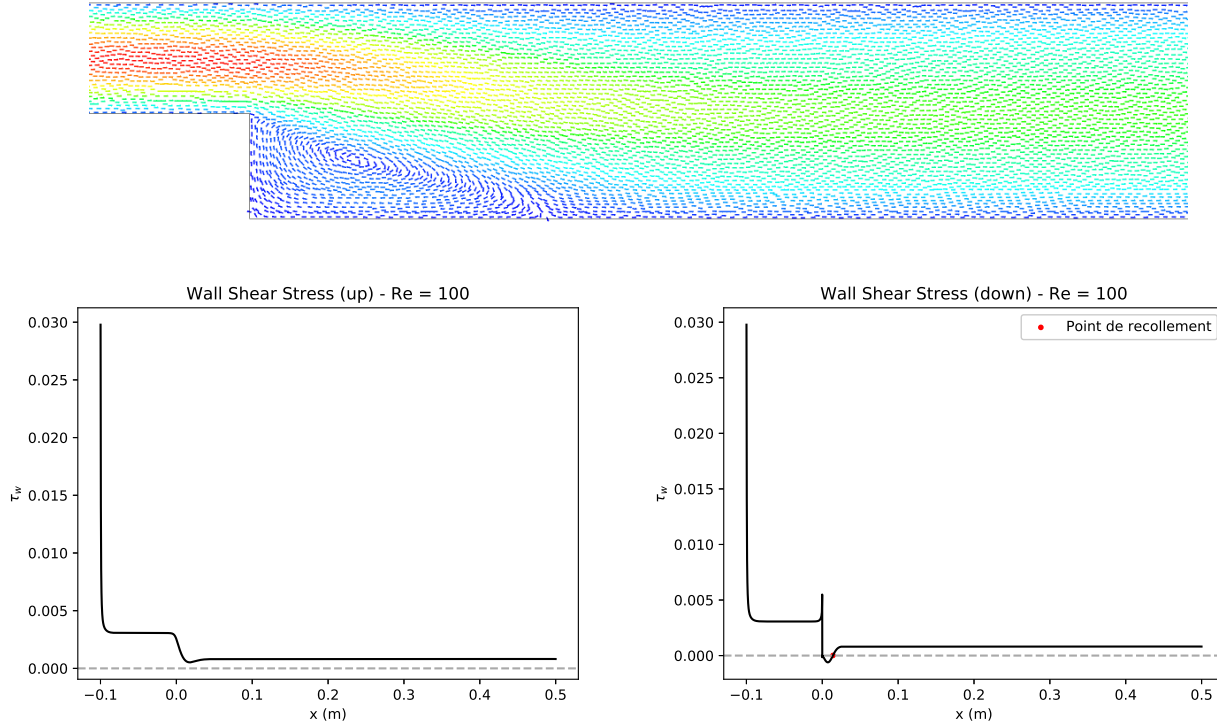


Figure 10: Vecteurs et τ_w pour $Re = 100$

La figure 10 montre le courant de l'écoulement grâce aux champs de vecteurs vitesses. En observant les lignes de courant on peut apprécier le point de recollement du fluide pour un écoulement de $Re=100$. Afin de pouvoir repérer le point de recollement de manière plus précise, nous avons calculé le cisaillement à la paroi τ_w appelé aussi "wall shear stress". Ainsi, le cisaillement à la paroi est tracé pour la paroi du haut et du bas afin de pouvoir identifier les points de recollement et/ou décollement.

Pour la paroi du haut, le cisaillement ne présente aucun changement de signe. Ainsi, l'écoulement ne subit aucune zone de recirculation sur la paroi supérieure et donc aucun point de stagnation est présent.

Si on analyse maintenant le cisaillement sur la paroi du bas. Nous constatons cette fois-ci que le τ_w présente un changement de signe. Lorsque ce dernier passe d'un signe négatif à un signe positif il marque la présence d'un point de recollement. Celui-ci se trouve à une distance de $x/S = 2.88$ ce qui est très proche des résultats expérimentaux obtenus par Armaly et al comme il est montré sur la figure 20.

3.2 $Re = 400$ (Laminaire)

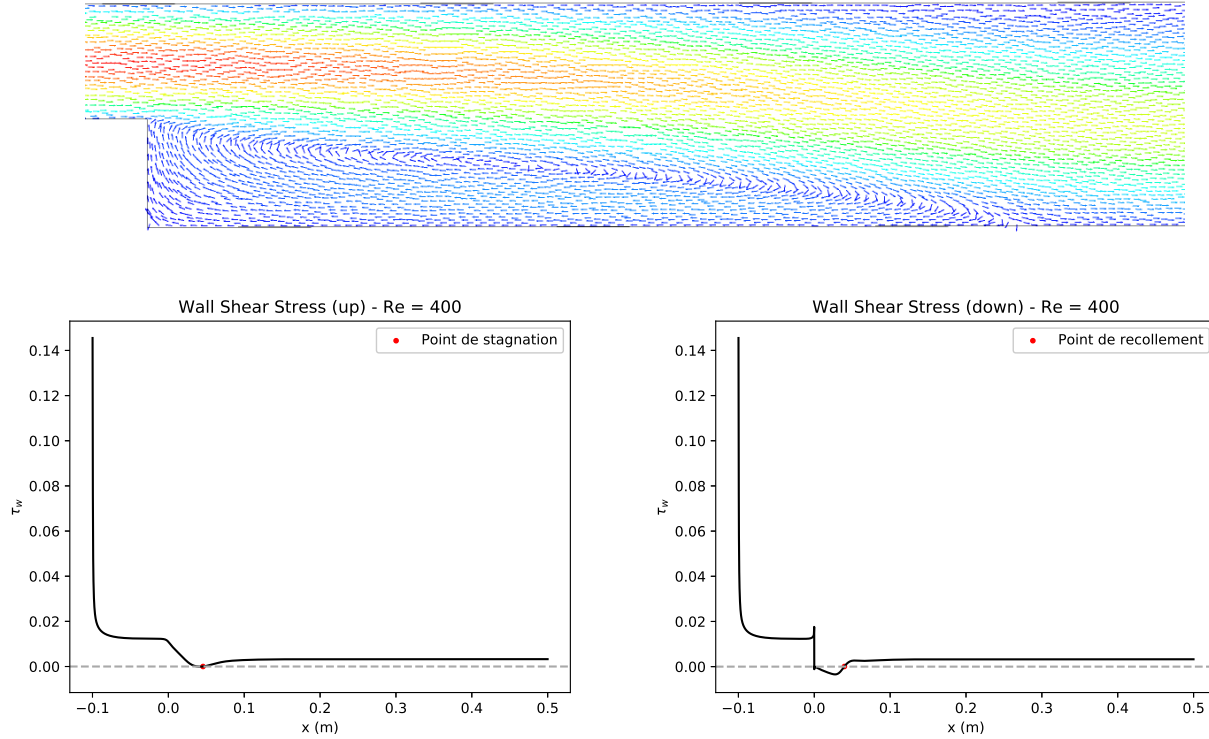


Figure 11: Réattachement pour $Re = 400$

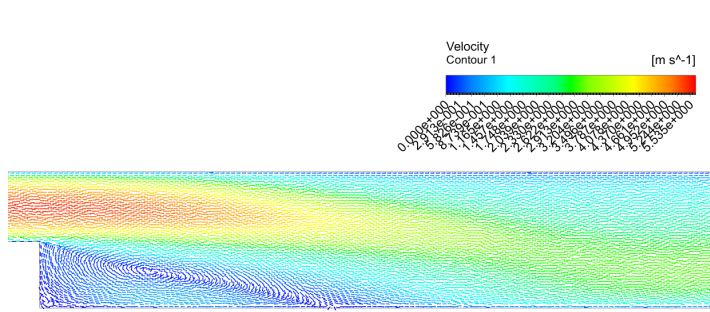
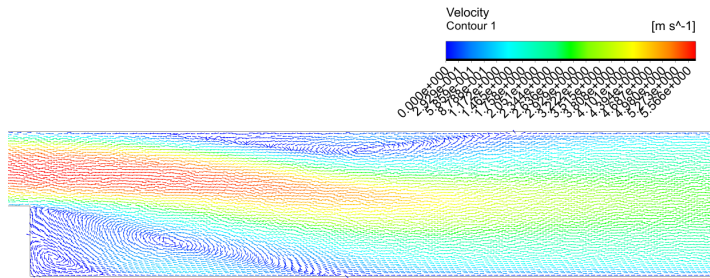
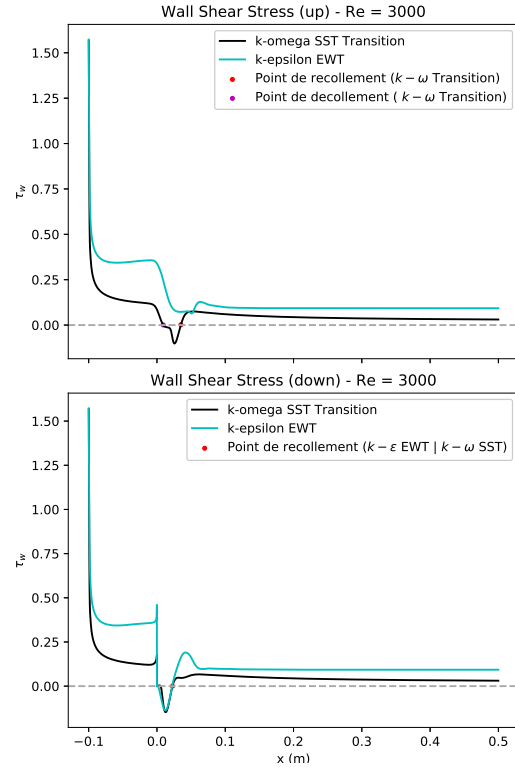
Pour un nombre de Reynolds de 400, nous pouvons apprécier, grâce aux champs de vecteurs des vitesses, que le point de recollement est plus éloigné que pour le cas de $Re=100$. Ceci est logique étant donné que nous sommes toujours sur un régime laminaire mais avec une quantité de mouvement plus élevée issue de la vitesse de l'écoulement. Nous pouvons aussi noter que l'écoulement présente une certaine tendance à vouloir se séparer de la paroi supérieure. Analysons ce phénomène avec plus de détails en se servant des graphiques de cisaillement à la paroi que nous avons calculés.

Tout d'abord, nous nous concentrons sur le cisaillement à la paroi supérieure. Le graphique nous permet d'observer que le cisaillement pour cette paroi tombe à zéro témoignant d'un point de stagnation. Étant donné que le signe de τ_w ne change pas (l'écoulement ne change pas de direction), il n'y a donc pas de zone de recirculation à la paroi supérieure. De plus, nous trouverons le point de pression stagnante le plus élevé au point de stagnation.

Pour ce qui est de la paroi inférieure, le cisaillement nous permet de bien identifier la zone de recirculation ainsi que le point de recollement du fluide. Ce dernier se trouve à $x/S = 8.10$ ce qui est, encore une fois, très proche des résultats trouvés par Armaly et al (voir fig. 20).

En observant la figure 20 on peut facilement s'apercevoir que pour les régimes laminaires, les résultats numériques et expérimentaux sont presque identiques et en phase. Dans les prochaines sections nous allons étudier le comportement des régimes de transition et turbulent vis-à-vis les résultats expérimentaux.

3.3 $Re = 3000$ (Transition)

Figure 12: $k - \epsilon$ EWTFigure 13: $k - \omega$ SST TransitionFigure 14: Réattachement pour $Re = 3000$

Le régime de transition est un régime qui demande un traitement particulier étant donné que ce dernier n'est pas complètement turbulent, ainsi les modèles de type RANS (tel que $k - \epsilon$ Standard) ne peuvent pas représenter de manière adéquate ces écoulements. Ainsi, nous faisons l'analyse pour le modèle de turbulence $k - \omega$ SST Transition. Ce modèle permet de mieux représenter les écoulements de transition mais exige un coût de calcul supérieur au modèle RANS de base. Une autre particularité pour ce modèle est le fait de garder une distance adimensionnelle à la paroi (y^+) proche de l'unité (voir figure 21). Nous ferons une analyse sur cette métrique dans la section suivante.

Tel qu'il a été mentionné plus haut, les deux modèles utilisés (soit $k - \epsilon$ EWT et $k - \omega$ SST Transition) donnent des résultats différents. La différence la plus importante à première vue, est la formation d'une zone de recirculation proche de la paroi supérieure représentée par le modèle $k - \omega$ SST Transition. Cependant, en analysant le cisaillement sur la paroi du bas, nous constatons que le point de recollement du fluide est le même pour les deux modèles. Cependant, la simulation effectuée avec SST Transition montre deux zones de recirculations proche de la paroi. En effet, nous pouvons constater cette deuxième recirculation dans la figure 18 où nous constatons qu'il existe deux changements de signe pour le cisaillement à la paroi du bas.

Finalement, le graphique du cisaillement sur la paroi du haut nous montre comment le modèle SST de Transition réussit à capter la recirculation qui se forme proche de la paroi supérieure alors que le modèle $k - \epsilon$ EWT ne réussit pas à le modéliser. Nous pouvons ainsi, nous prononcer sur l'importance du choix de modèle de turbulence surtout pour des écoulements en régime de transition qui présentent d'énormes fluctuations.

3.4 $Re = 7000$ (Turbulent)

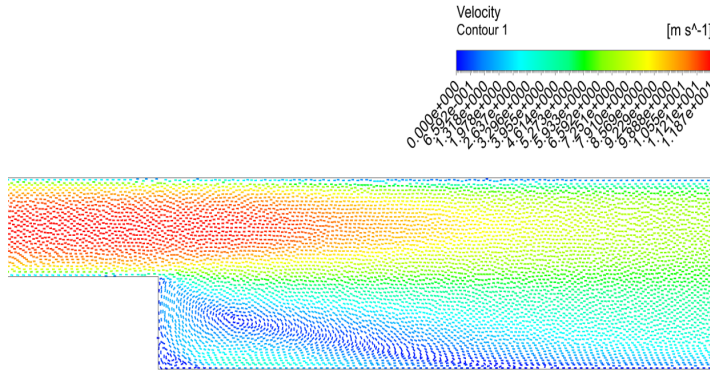


Figure 15: EWT

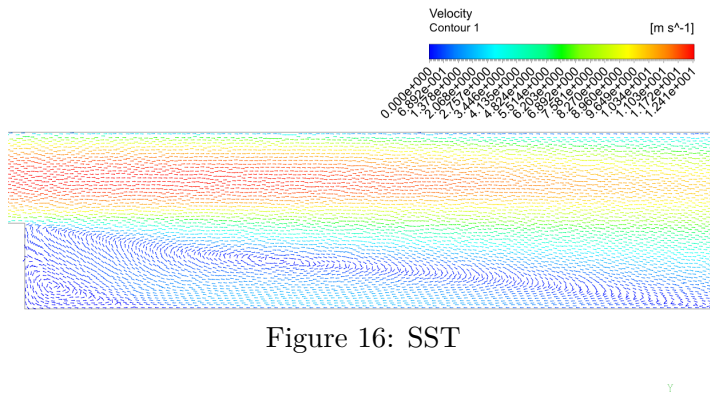
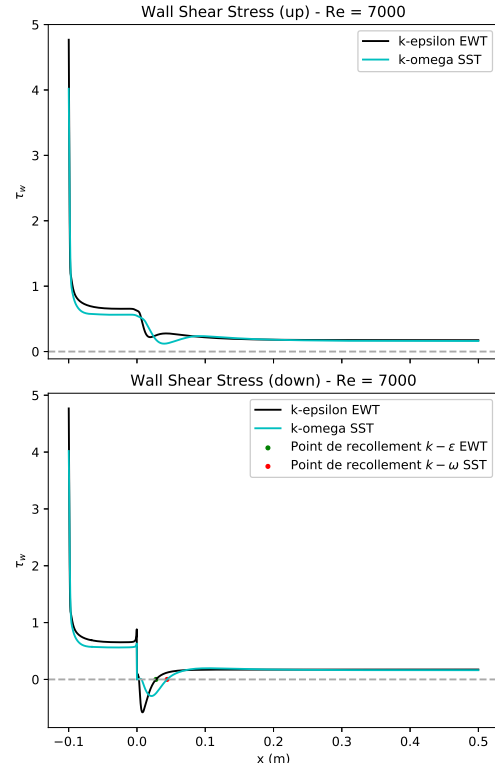


Figure 16: SST

Figure 17: Réattachement pour $Re = 7000$

De même que pour le cas précédent, nous comparons les résultats obtenus avec deux modèles de turbulence. Cette fois-ci, avec un Reynolds de 7000, il s'agit d'un régime purement turbulent. Cependant, il existe tout de même des différences entre les modèles de turbulence et qui permettent en sorte de mieux représenter la physique de l'écoulement. C'est le cas ici pour le modèle de turbulence $k-\omega$ SST qui est le modèle de turbulence recommandé par la littérature pour ce type d'études.

Aucun des deux modèles ne présente une zone de recirculation proche de la paroi supérieure. Cependant, le jet en aval de la marche n'est pas tout à fait de même vitesse ou longueur. En effet, le jet issu du modèle $k-\omega$ SST semble être plus élongé que celui modéliser par le modèle $k-\epsilon$.

La différence la plus flagrante reste encore une fois sur la paroi inférieure. Nous observons la présence de deux zones de recirculation pour les deux modèles cependant le modèle SST donne une zone de recirculation beaucoup plus allongée. De même, les points de recollement ne sont pas équivalents entre les deux modèles. Ce dernier se trouve à $x/S = 9.0$ (voir figure 20).

Afin de mieux caractériser les points de stagnation, nous traçons les courbes de cisaillement à la paroi pour la paroi inférieure dans la figure 19 qui montre de manière précise les différentes zones de recirculation.

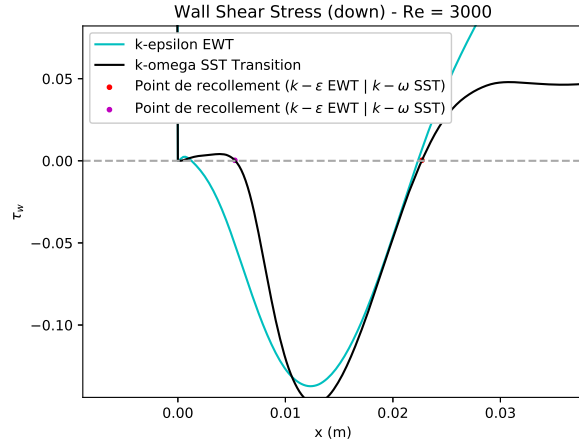
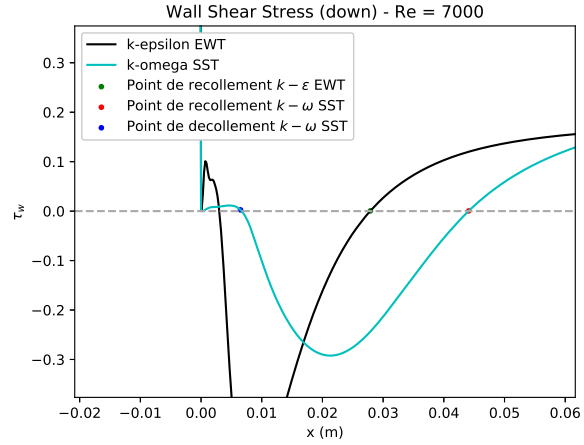
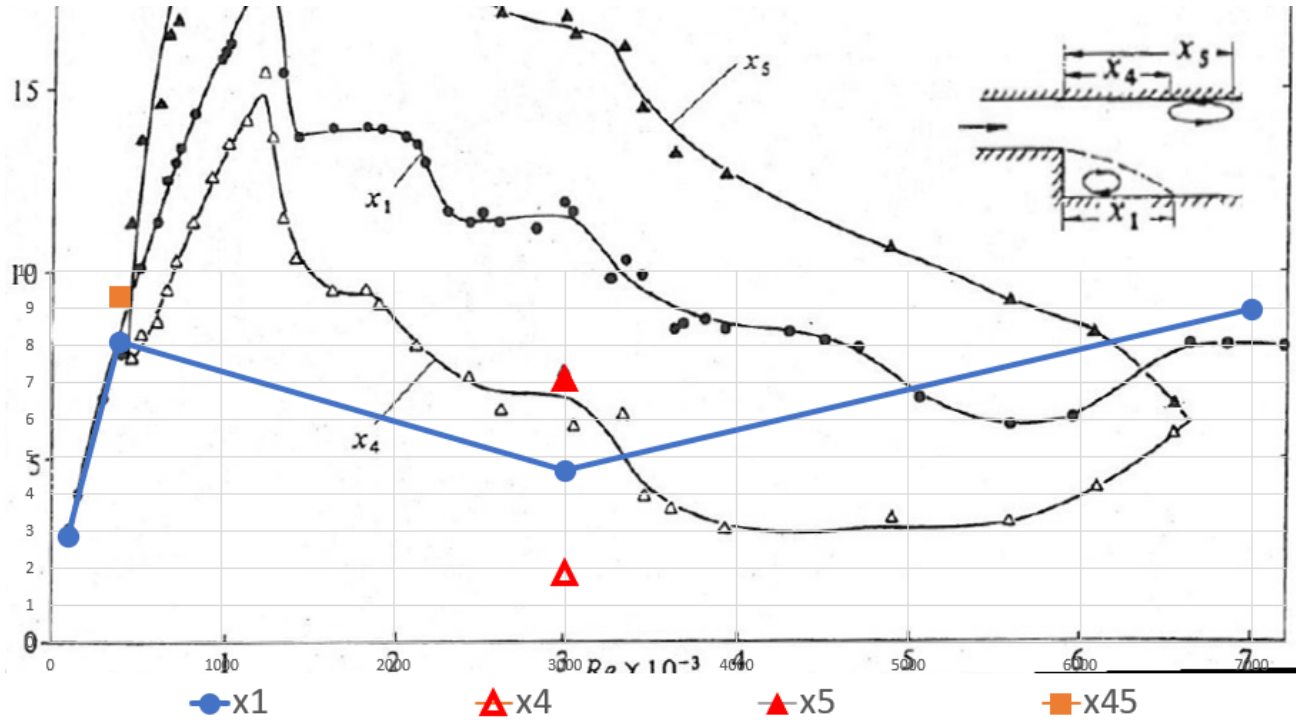
Figure 18: τ_w - Re = 3000Figure 19: τ_w - Re = 7000

Figure 20: Réattachement à différents Reynolds

Dans le domaine laminaire les résultats de Fluent et les résultats expérimentaux d'Armaly correspondent. Pour des Modèles entièrement turbulents les résultats sont encore assez similaires en particulier avec le modèle SST. En revanche, quel que soit le modèle choisi (EWT,SST) pour résoudre un écoulement de transition, les résultats expérimentaux et numériques divergent. Ceci peut s'expliquer par la complexité et les grandes fluctuations présentes dans ce type d'écoulement qui nuisent aux modèles de RANS. Ceci peut aussi nous faire réfléchir sur la méthode expérimentale qui a été utilisée par Armaly et al. Nous pouvons noter que le modèle SST de Transition semble tout de même être plus performant puisque ses résultats sont meilleurs en régime turbulent et c'est le seul qui soit en mesure de donner des informations sur la vorticité sur la surface supérieure pour le régime de transition tout comme pour

le régime pleinement turbulent.

4 Analyse sur y^+

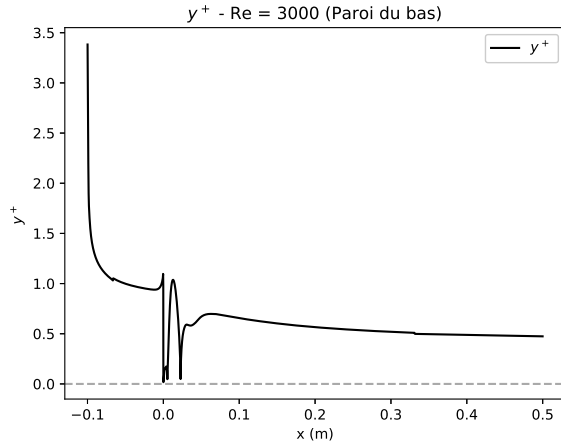


Figure 21: y^+ pour $Re = 3000$

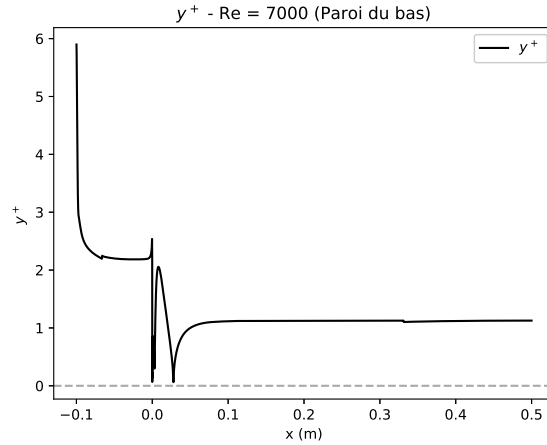


Figure 22: y^+ pour $Re = 7000$

Les deux figures ci-haut montrent la métrique y^+ à la paroi inférieure pour les cas de $Re=3000$ (gauche) et $Re=7000$ (droite) en utilisant respectivement le modèle $k - \omega$ *SST Transition* et $k - \omega$ *SST*. Ces deux modèles exigent, tel que mentionné dans la littérature de Fluent, un $y^+ \approx 1$. Les graphiques ci-haut permettent de s'assurer que le maillage utilisé pour la résolution des problèmes est suffisamment fin proche des parois afin de pouvoir modéliser adéquatement la sous-couche visqueuse pour les lois de parois.

Le y^+ est dépendant de la vitesse du fluide, ce qui explique les discontinuités observées proche de la marche descendante où il y a un changement brusque de la vitesse du fluide. Mais nous pouvons observer que dans son ensemble, le y^+ reste proche de l'unité et ce tout le long du domaine.

5 Conclusion

En conclusion, nous pouvons dire que les points de recollement pour les cas laminaires et turbulent sont en accord avec les résultats expérimentaux obtenus par Armaly et al. Il existe une différence trop grande pour le régime de transition. Malgré tous les efforts qui ont été investis afin d'améliorer le maillage afin d'obtenir des résultats qui se rapprochent davantage de l'expérimental, ce qui constitue le maillon faible de ce travail. Une analyse plus approfondie des écoulements en transition devrait être menée afin de pouvoir reproduire avec plus de précision le problème et se rapprocher des résultats expérimentaux. De plus, le maillage n'est pas très organique, étant donné le fait qu'il s'agit d'un problème 2D le maillage a été uniformément raffiné au lieu de faire un raffinement par section dépendant du domaine comme il a été fait pour le raffinement du maillage proche des parois.

D'un autre côté, la comparaison entre différents modèles de turbulence nous a permis de comprendre l'importance du modèle choisi et qu'il existe des modèles mieux adaptés que d'autres pour résoudre un même type d'écoulement.