

## Cinquième partie

# Transfert thermique sur plaque plane en écoulement laminaire

F. R.

## 1 Introduction

L'objectif de ce TP est de vous familiariser avec le logiciel STARCCM+ en réalisant une simulation numérique en 2D d'un écoulement laminaire sur une plaque plane avec transfert thermique. Le problème permettra d'étudier et d'illustrer les aspects aérodynamiques (Nombre de Reynolds, champs de vitesses, couche limite...) et thermiques (Nombre de Nusselt, champs de température, transfert de chaleur, couche limite thermique...) ainsi que leurs interactions (comment varie le nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds?).

En fin de séance, vous devez être capables de :

- réaliser un maillage adapté (un maillage insuffisant peut causer des problèmes de convergence, et un maillage trop fin prendra plus de temps pour converger) ;
- configurer STARCCM+ et entrer les bons paramètres ;
- lancer le calcul et itérer jusqu'à la convergence (penser à faire certaines vérifications comme la conservation du débit) ;
- faire le post-traitement du calcul (visualisation des champs de température, pression, vitesse, créer des isosurfaces...).

## 2 Description du problème

On considère une plaque plane de longueur  $L = 1m$  (voir Fig. 14). L'écoulement est horizontal et est caractérisé par un nombre de Reynolds de  $Re = 10^5$  et une vitesse  $v$  (à calculer un peu plus loin). La température de la plaque est maintenue à  $T = 400K$ . Le fluide considéré a les caractéristiques suivantes :

- $\rho = 1 \text{ kg.m}^{-3}$  ;
- $C_p = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;
- $\lambda = 0.04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;
- $\mu = 2 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ .

## 3 Importation de la géométrie

La géométrie 3D a été réalisée avec Catia et a été exportée au format STEP.

1. lancer le logiciel STARCCM+ et créer une nouvelle simulation ;
2. sauvegarder la session (penser à sauvegarder régulièrement votre travail en cours) ;
3. commencer par importer le fichier "PlaquePlane.stp" : « *File* »  $\Rightarrow$  « *Import Surface Mesh* ».

STARCCM+ vous propose plusieurs options pour importer la pièce. Plusieurs possibilités peuvent fonctionner dans notre cas. Choisir une frontière pour toutes les surfaces et un domaine pour tous les corps (voir Fig. 15). Cocher la case correspondant à l'ouverture d'un nouveau moniteur après l'importation du fichier (la création d'un nouveau moniteur peut également se faire ultérieurement : clic-droit sur « *Scenes* »  $\Rightarrow$  « *New Scene* »  $\Rightarrow$  « *Geometry* »).

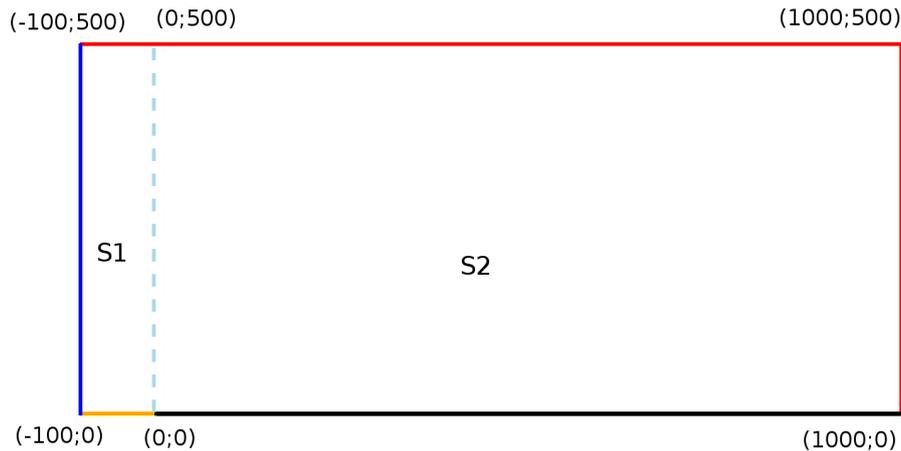


FIGURE 14 – Géométrie du problème.  $S1$  et  $S2$  sont deux domaines fluides reliés par une interface (en pointillés bleus). La plaque (en noir) se trouve entre les points  $(0;0)$  et  $(1000;0)$  mm. La partie (jaune) entre les points  $(-100;0)$  et  $(0;0)$  mm est une condition de symétrie. L'entrée se fait à gauche à travers la frontière (bleue) comprise entre les points  $(-100;0)$  et  $(-100;500)$  mm. Le reste (en rouge) est une condition de sortie de type "Pressure Outlet".

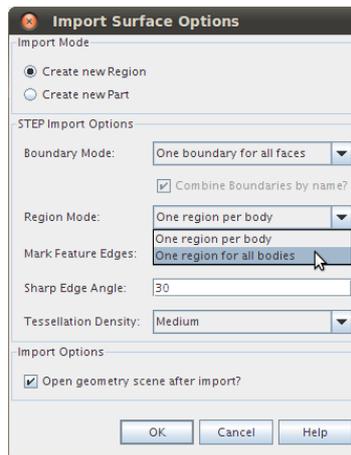


FIGURE 15 – Options d'import de la géométrie.

La plaque plane en 3D apparaît. Le bouton gauche de la souris permet de faire une rotation libre de la pièce, la molette du milieu permet de zoomer et le bouton de droite permet de déplacer la pièce. D'autres options de visualisation sont possibles à partir de la barre d'outil.

D'après les options d'importation, on a un domaine qui s'appelle « *Region 1* » et une seule frontière, « *Boundary 1* ». On peut renommer le domaine (clic-droit sur « *Region 1* » puis « *Rename* »), par exemple *PlaquePlane*. Ensuite, il va falloir séparer la frontière « *Boundary 1* » en plusieurs pour pouvoir appliquer différentes conditions aux limites tout autour du domaine. Pour cela, aller dans « *Regions* » ⇒ « *Plaque Plane* » ⇒ « *Boundaries* » ⇒ « *Boundary 1* ». Faire un clic-droit sur « *Boundary 1* » et sélectionner « *Split by Patch* » (voir Fig. 16). Sélectionner les frontières une par une par clic-gauche dans la fenêtre graphique et les renommer. Attention, il y a deux surfaces à l'interface.

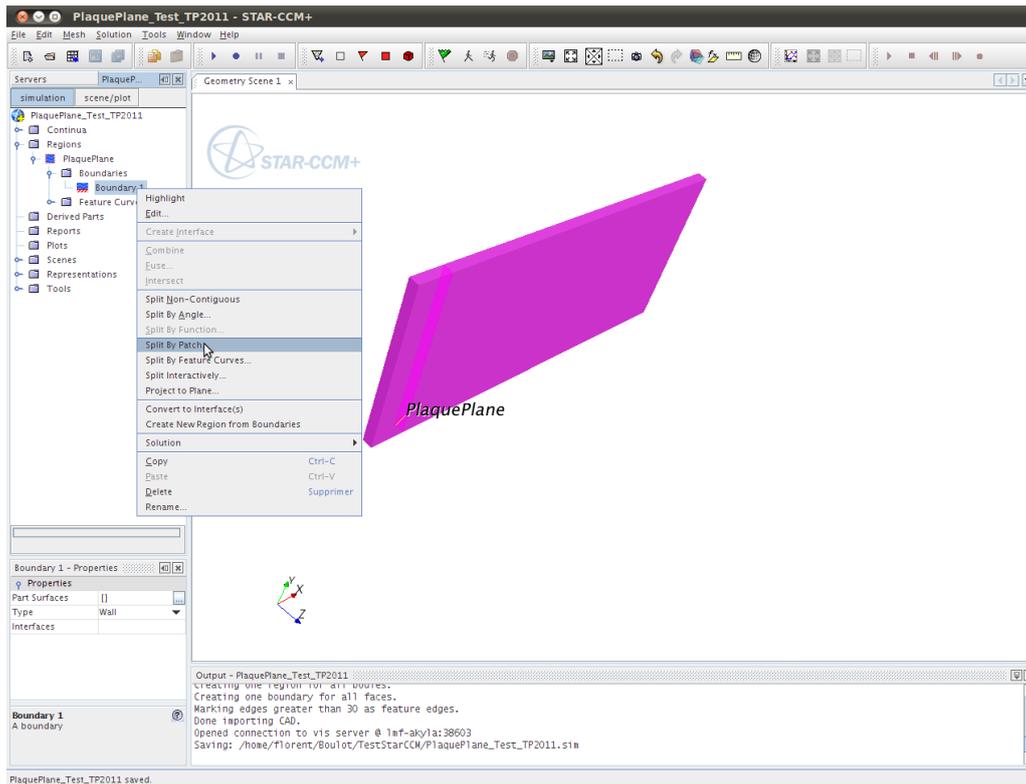


FIGURE 16 – Création des frontières.

## 4 Maillage

La réalisation du maillage peut donc commencer. Star CCM+ permet de configurer un maillage global mais également le maillage de chaque surface limite séparément. Pour chaque type de condition aux limites, les paramètres du maillage à spécifier peuvent être différents<sup>16</sup>. Il est donc utile de déclarer le type des conditions aux limites de chaque surface avant même de lancer le maillage.

C'est ce que nous allons faire ici : paramétrer le maillage global, déclarer les types de conditions aux limites, paramétrer la façon dont on veut que certaines surfaces limites soient maillées, enfin lancer l'opération de maillage.

### 4.1 Choix du modèle de maillage

1. Double-cliquer sur « *continua* » ⇒ « *Mesh 1* » ⇒ « *Models* ».
2. Cocher « *Surface Remesher* », « *Trimmer* » et « *Prism Layer Mesher* ».

### 4.2 Paramètres du maillage global

1. Sous « *Mesh 1* », dérouler le menu « *Models* ».
2. Sélectionner un mode d'extrusion de la couche limite de type « *Wall Thickness* » (il faut fouiller un peu dans la fenêtre des propriétés du modèle concerné (voir présentation générale de l'interface en Fig. 9).
3. Sous « *Mesh 1* », dérouler le menu « *Reference Values* ».

<sup>16</sup>. Par exemple, STARCCM+ mettra par défaut des couches limites uniquement sur des frontières de type "Wall" si l'option « *Prism Layer Mesher* » a été choisie.

4. Dans « *Base Size* », entrer 0.5 m. Toutes les valeurs relatives qu'on va rentrer par la suite seront en pourcentage par rapport à cette valeur. On aurait pu choisir toute autre valeur. Ici, on a choisi la hauteur du domaine.
5. Dans « *Thickness of Near-Wall Prism Layer* », entrer 0.005 m.
6. Dans « *Maximum cell size* » ⇒ « *Percentage of Base* », entrer la valeur de 5%. La valeur absolue s'affiche également. Cela signifie qu'on a choisi des mailles qui ne dépasseront pas la taille de 25mm dans le maillage 3D.
7. Il est possible de spécifier la taille minimale et la taille cible qu'on souhaite avoir sur les surfaces. Dans « *Surface size* » entrer 1 et 5% respectivement pour la taille minimale et la taille cible.
8. Dans « *Number of Prism Layers* » entrer la valeur 3.
9. Dans « *Prism Layer Thickness* » choisir une taille relative de 2%.

### 4.3 Déclaration des conditions aux limites

1. Sous « *Regions* » ⇒ « *PlaquePlane* » ⇒ « *Boundaries* » sont répertoriées toutes les conditions aux limites.
2. Cliquer sur chacune des limites et entrer son type (voir Fig. 17).
3. Les parois latérales sont de types « *Wall* ».
4. Sélectionner les deux interfaces de chaque corps (sélectionner le premier et maintenir la touche ctrl enfoncée et sélectionner le deuxième) puis faire un clic-droit pour créer une interface de type « *In-place* ». Un nouveau dossier « *Interfaces* » se crée dans l'arborescence.

### 4.4 Spécification du maillage des surfaces limitant le domaine

Il est inutile d'appliquer une couche limite sur les parois latérales. On ira donc désactiver le maillage de couche limite sur les parois latérales en allant dans « *Regions* » ⇒ « *Boundaries* » ⇒ « *PlaquePlane* » ⇒ « *Devant*<sup>17</sup> » ⇒ « *Mesh Conditions* » ⇒ « *Customize Prism Mesh* » On peut lancer l'opération de maillage : « *Mesh* » ⇒ « *Generating Volume Mesh* » ou cliquer sur le bouton qui y correspond dans la barre d'outil. Pour afficher le maillage, créer une nouvelle scène de maillage.

La partie maillage est terminée<sup>18</sup>. A présent, nous devons créer le modèle physique pour cette simulation et compléter les conditions aux limites.

***Penser à sauvegarder régulièrement.***

### 4.5 Choix du modèle pour la simulation

#### Définition du modèle physique

1. Double-cliquer sur « *Models* » dans « *Continua* » ⇒ « *Physic 1* ».
2. Sélectionner les paramètres nécessaires pour réaliser une simulation stationnaire, pour un gaz à masse volumique constante et dont l'écoulement sera supposé laminaire. Cocher également : « *Segregated Flow* » et « *Segregated Fluid Temperature* ».
3. Ce n'est qu'après avoir créé le modèle physique qu'on peut entrer les caractéristiques du fluide et les conditions aux limites. Se reporter aux données du § 2, page 26. Calculer la vitesse d'entrée et entrer-la dans la frontière « *Entrée* » dans « *Regions* » ⇒ « *Plaque Plane* » ⇒ « *Boundaries* » ⇒ « *Boundary 1* ».

17. Ou le nom que vous avez choisi.

18. Regarder le maillage et utiliser l'outil de diagnostique dans le menu "Mesh" peut être une bonne idée.

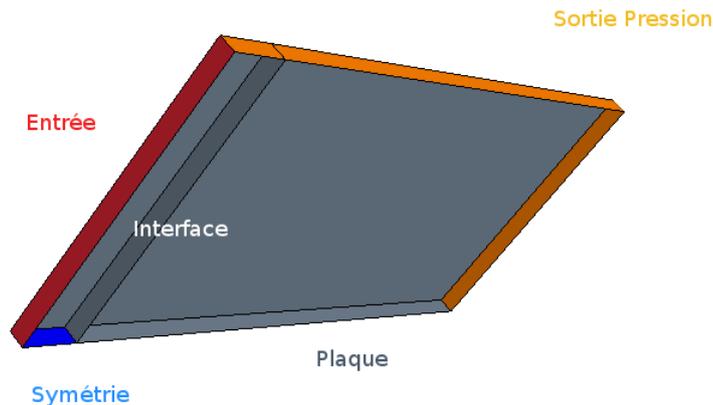


FIGURE 17 – Types des conditions aux limites

4. Imposer une température  $T = 400$  K sur la plaque, et une température d'entrée de 300 K.

Nous avons à présent une géométrie 3D maillée, un modèle pour la simulation et des conditions aux limites. Il ne faut pas oublier qu'on souhaite faire une simulation en 2D. Il faut donc sauvegarder ce maillage 3D pour pouvoir l'utiliser et le modifier ultérieurement. On rappelle que pour modifier le maillage 2D, il faut passer par le maillage 3D.

#### Conversion du maillage 3D en 2D

1. Sauvegarder la simulation sous un autre nom avec, par exemple, explicitement le mot « 2D » dedans.
2. Sélectionner « Mesh »  $\Rightarrow$  « Convert to 2D » et cocher la case qui permet d'effacer les régions en 3D.
3. Dans « Continua » apparaît un nouveau « Physic 1 2D ». Supprimer l'ancien « Physic 1 ».

## 4.6 Lancement de la simulation

Nous avons terminé avec le maillage, la choix du modèle, les conditions aux limites et la conversion en 2D du maillage. Nous pouvons donc lancer la simulation. Le logiciel va procéder par itération pour converger vers une solution. Pour savoir si la solution est bien convergée, on peut observer les résidus en fonction des itérations. Les résidus donnent une idée globale de la convergence d'une simulation mais ce n'est pas toujours suffisant.

Cliquer sur le bonhomme qui court dans la barre d'outil pour lancer la simulation. Les résidus apparaissent et la convergence a lieu très rapidement, en moins de 200 itérations. En effet, c'est un cas simple en 2D, en écoulement laminaire avec un maillage très grossier. Des simulations plus complexes peuvent durer quelques jours voire quelques semaines en fonction de la machine sur laquelle a lieu la simulation.

On peut aussi demander au logiciel de tracer, en fonction des itérations, d'autres variables, comme la pression, la conservation du débit...ceux-là ayant plus de sens physique, ils renseignent mieux sur la convergence de la solution. On peut aussi voir les champs des vitesses et de la température en fonction des itérations.

#### Vérification de la conservation du débit :

1. Clic-droit sur « report »  $\Rightarrow$  « New Report »  $\Rightarrow$  « Mass Flow Averaged ».

2. Dans les propriétés (fenêtre du bas), choisir « *Mass flow rate* » comme variable scalaire et choisir les frontières d’entrée et de sortie.
3. Faire un clic-droit sur « *Mass Flow Averaged 1* » puis créer un moniteur et un graphe.

Il est possible d’afficher l’évolution de cette variable en fonction des itérations en double-cliquant sur le graphe correspondant dans « *Plots* ». Il est également possible de connaître cette valeur en faisant un clic-droit dessus puis « *Run Report* ».

Pour le plaisir des yeux, on va également afficher les champs de vitesses et de pression. Créer une nouvelle scène de type scalaire et renommer-la en « *Champs de vitesse* » par exemple. Dans « *Displayers* » ⇒ « *Scalar* » ⇒ « *scalar field* » choisir la vitesse. Recommencer la même opération pour définir une nouvelle scène pour la température.

Réinitialiser à zero la simulation et relancer-la et afficher toutes ces visualisations qu’on vient de créer.

## 5 Post-traitement

La prochaine étape qui vous est proposée est de comparer les résultats de simulations obtenus avec STARCCM+ avec les lois empiriques qui sont bien connues sur ce type d’expérience (plaque plane avec écoulement laminaire). En temps normal, on fait ce type de comparaison pour valider un nouveau code de simulation et voir s’il donne des résultats proches de la réalité en imposant les mêmes conditions (aux limites et initiales) si possible. Dans ce TP, le but de cette comparaison est de vous donner une référence pour analyser les résultats que vous allez obtenir sous STARCCM+.

Coefficient de frottement pariétal :

1. Loi analytique :

$$C_f = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad (17)$$

Ici, le nombre de Reynolds est un nombre de Reynolds local  $Re_x = \frac{Vx}{\nu}$ .

2. Dans STARCCM+, on retrouvera un « *Skin Friction Coefficient* » défini ainsi :

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho v_b^2} \quad (18)$$

avec  $v_b$  une vitesse de référence à modifier dans « *Tools* » ⇒ « *Reference Values* » (il faut prendre la valeur à l’infini amont pour être cohérent avec la formule analytique).

Nombre de Nusselt :

1. Loi analytique :

$$Nu = 0.332\sqrt{Re_x}(Pr)^{1/3} \quad (19)$$

Avec  $Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$ , le nombre de Prandtl. Dans notre cas, il vaut 0.5.

2. Dans STARCCM+, il faut définir une nouvelle « *Tools* » ⇒ « *Field Function* », à appeler, par exemple “MonNusseltLocal” :

$$\text{\$HeatTransferCoefficient * \$$Centroid[0]/0.04} \quad (20)$$

Ici, on récupère une valeur scalaire<sup>19</sup> calculée par STARCCM+ —le coefficient de transfert de chaleur—, et on le multiplie par le premier élément<sup>20</sup> du vecteur<sup>21</sup> coordonnées.

19. C’est pour cela qu’il y a un \$.

20. D’où le [0], comme dans du  $C$ .

21. C’est pour cela qu’il y a deux \$\$.