
Introduction à la simulation numérique des écoulements.
Application au transfert thermique sur plaque plane avec
STARCCM+.*

H. Nouri¹ and F. Ravelet^{†1}

¹DynFluid - Arts et Metiers ParisTech, 151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

6 septembre 2013

*Ce document a été écrit en L^AT_EX, en utilisant les distributions GNU/Linux Ubuntu (<http://www.ubuntu-fr.org/>) et Fedora (<http://www.fedora-fr.org/>).

[†]florent.ravelet@ensam.eu

Table des matières

Objectifs	1
I Introduction	2
1 Qu'est-ce que la CFD	2
2 Intérêts de la CFD	2
II Quelques généralités sur la CFD	3
1 Equations de la mécanique des fluides	3
2 Direct Numerical Simulation (DNS)	3
3 Modèles de turbulence de type RANS	4
4 Méthodes numériques	6
5 Récapitulatif	7
III Etapes de la CFD	8
1 CAO	8
2 Maillage	8
3 Simulation	12
4 Post-traitement	19
IV Introduction à StarCCM+	20
1 Présentation de l'interface	20
2 Quelques notions : "Part", "Region", "Boundary" et "Interface"	21
3 Maillage	21
4 Modélisation	23
5 Conditions aux limites	24
6 Initialisation du calcul	24
7 Critère de convergence	24
8 Visualisation graphique	24
V Transfert thermique sur plaque plane en écoulement laminaire	26
1 Introduction	26
2 Description du problème	26
3 Importation de la géométrie	26
4 Maillage	28
5 Post-traitement	31
6 Obtention d'une meilleure solution, (convergence en maillage)	32

Table des figures

1	Méthode des volumes finis	6
2	Types de maillage	9
3	Skewness	10
4	Maillage de couche limite	11
5	Lissage	11
6	Test de convergence en maillage.	12
7	Couche limite turbulente	15
8	Suivi d'une quantité pour tester la convergence	19
9	Interface de STARCCM+, version 7.06.012.	20
10	Définition des domaines et des frontières	21
11	Définition des interfaces	22
12	Illustration du maillage d'un domaine	23
13	Exemples de modèles	24
14	Géométrie du problème	27
15	Options d'import de la géométrie.	27
16	Création des frontières.	28
17	Types des conditions aux limites	30
18	Evolution de la couche limite dynamique sur une plaque plane.	32
19	Epaisseur de la couche limite thermique.	32

Liste des tableaux

1	Qualité associée au facteur de distorsion.	10
2	Modèles statistiques de turbulence de type RANS.	14
3	Principales options de traitement des parois pour FLUENT et STARCCM+.	16

Objectifs

F. R.

- L'objectif de cette première séance est d'une part de vous familiariser avec quelques outils numériques de résolution d'un problème de mécanique des fluides dans un contexte industriel (utilisation de codes commerciaux, recherche de grandeurs globales en régime stationnaire, modèles dégradés de turbulence), et d'autre part de vous fournir quelques clés afin de réaliser des simulations les plus propres possibles.

- La résolution par simulation numérique d'un problème de mécanique des fluides ("Computational Fluid Dynamics", CFD) passe par trois étapes :

- La définition d'un maillage et de conditions aux frontières, au moyen d'un *Pré-processeur*. La qualité du maillage est très importante.
- La résolution des équations, par un *Solveur*. On a le choix entre différentes méthodes de discrétisation, d'ordre plus ou moins élevé, et entre divers modèles, notamment pour la modélisation des écoulements turbulents.
- Le post-traitement.

- Le but est d'obtenir une solution *convergée, indépendante du maillage et respectant la physique du problème*, afin de pouvoir en tirer un maximum d'informations *quantitatives*¹.

- Les trois premières parties (pages 2 à 19) ont été abordées en cours et contiennent des informations d'ordre général. La quatrième partie est une introduction succincte au logiciel Star-CCM+. Le sujet de TP de cette première séance tutorielle est l'objet de la cinquième partie.

1. Attention, en se précipitant sur les boutons "Solve" et "Display" d'un outil « commercial », on obtiendra certainement quelque solution et des cartes de "beautiful colors". Toutefois, si par exemple la conservation de la masse n'est pas vérifiée dans le champ de vitesse obtenu, la simulation est fautive et à rejeter.

Première partie

Introduction

H. N.

1 Qu'est-ce que la CFD

La CFD, *i.e.* “Computational Fluid Dynamics” (« Dynamique des Fluides Numérique »), est un ensemble de méthodes numériques permettant d’obtenir une solution approximative d’un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert thermique. Les équations qui interviennent sont celles de la mécanique des fluides, résolues par des méthodes numériques. La solution est approximative et non pas exacte pour plusieurs raisons. D’abord, parce qu’on résout les équations de Navier-Stokes numériquement en les discrétisant. Deuxièmement, et comme on le verra un peu plus loin, pour des raisons de limitation de la puissance de calcul et de la mémoire, certains termes des équations à résoudre sont remplacés par des modèles empiriques qui ne sont pas exacts ; c’est en particulier le cas lorsque les écoulements à modéliser sont en régimes turbulents. Cependant, grâce au développement des méthodes numériques et à des calculateurs de plus en plus puissants avec une grande capacité de mémoire, la CFD permet d’avoir des solutions très satisfaisantes. Ceci est encore plus vrai dans la plupart des domaines de l’industrie où très souvent une prédiction de l’ordre de grandeurs de valeurs moyennes est amplement suffisante.

2 Intérêts de la CFD

Pour traiter un problème de mécanique des fluides (c’est vrai aussi pour d’autres branches de la physique), on peut le résoudre soit par une approche :

- analytique : le grand avantage de cette approche est qu’elle permet d’avoir des solutions exactes. Cependant, elle est limitée pour des cas très simples en formulant un certain nombre d’hypothèses ;
- expérimentale : c’est sûrement l’approche qui représente le mieux la réalité. En contrepartie, elle est souvent difficile à mettre en œuvre et nécessite un certain temps pour résoudre tous les problèmes qu’on peut rencontrer. Sans oublier qu’elle peut devenir très vite très coûteuse ;
- numérique : elle permet de faire moins d’hypothèses qu’une approche analytique et permet de traiter des problèmes relativement complexes. De plus, elle peut être moins coûteuse qu’une approche expérimentale. Par contre, elle est limitée par l’ordre des méthodes numériques utilisées, la précision du modèle et les moyens de calcul mis en œuvre.

Les efforts et les progrès réalisés dans les méthodes numériques et plus particulièrement en CFD depuis les années 1960 montrent tout l’intérêt qu’on lui porte. A-t-on pour autant mis de côté l’approche expérimentale ? Non, bien évidemment. Par contre les deux approches sont souvent associées et complémentaires : avant toute réalisation expérimentale, une étude CFD préalable est souvent réalisée pour mieux cerner et jauger le problème. Puis, l’expérimentation vient en phase finale confirmer ces résultats (ceci dit on est jamais à l’abri d’une surprise!!!).

Deuxième partie

Quelques généralités sur la CFD

H. N.

1 Equations de la mécanique des fluides

Dans le cas où le bilan d'énergie n'intervient pas (fluide en écoulement incompressible, par exemple), l'écoulement est régi par l'équation de continuité (bilan de masse) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

et par l'équation de bilan de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j}. \quad (2)$$

u_i étant la vitesse dans la direction i , p la pression et ν la viscosité cinématique du fluide, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

Une résolution analytique de ces équations différentielles partielles non linéaires, qui dépend de la géométrie et des conditions aux limites est impossible à moins qu'on pose un certain nombre d'hypothèses, comme pour un écoulement laminaire dans un tuyau, où l'écoulement peut être considéré comme unidimensionnel.

C'est là qu'interviennent les méthodes de résolution numérique. Pour résoudre un problème complexe, le domaine d'étude est divisé en un certain nombre de petits volumes de contrôle (le maillage). En 1-D, on obtient donc des segments séparés par des noeuds, en 2-D des faces triangulaires ou des quadrilatères et en 3-D des tétraèdres, prismes, pyramides, hexaèdres. . . Ensuite, les équations aux dérivées partielles sont discrétisées et transformées en équations algébriques pour pouvoir être résolues numériquement.

Il existe un certain nombre de méthodes de discrétisation pour les équations différentielles, comme la méthode des éléments finis ou des différences finies ou encore celle des volumes finis (utilisée notamment par FLUENT et STARCCM+).

2 Direct Numerical Simulation (DNS)

Les équations de la continuité et du bilan de quantité de mouvement forment un système d'équation fermé de quatre équations à quatre inconnues (u_i, u_j, u_k trois composantes de vitesse et p la pression). Théoriquement, la résolution de ce système est possible et ne nécessite aucun modèle. Malheureusement, en pratique cela n'est pas toujours possible. En effet, pour un écoulement laminaire avec une géométrie assez simple la DNS est possible. Mais, pour un écoulement turbulent², qui est la règle du point de vue des situations industrielles à nombre de Reynolds élevé, on a des structures turbulentes à toutes les échelles spatiales et temporelles. Pour pouvoir capter ces micro-structures de très faible dimension il faut diviser le domaine en volumes de contrôle de taille très petite (au moins aussi petite que la taille de la plus petite structure qu'on souhaite capter) : il faut donc un maillage très fin, donc des processeurs très puissants et beaucoup de mémoire.

2. On pourra compléter efficacement ses notions de turbulence en consultant Cadot [2009]

On peut estimer un ordre de grandeur du nombre de mailles pour une DNS d'un écoulement turbulent. Pour cela, il faut définir l'échelle de turbulence de Kolmogorov qui donne la taille de la plus petite structure turbulente en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement :

$$\eta = L Re_L^{-3/4}, \quad (3)$$

L est l'échelle intégrale représentative de la taille des plus grandes structures tourbillonnaires³.

Pour un cas 1D de longueur Nh , N étant le nombre de noeuds et h la longueur d'une maille, on doit respecter les conditions suivantes :

- $Nh > L$ (c-à-d que le domaine est plus grand que L) ;
- $h \leq \eta$ (c-à-d que la taille d'une maille soit plus petite que les plus petites structures).

Soit,

$$\eta N \geq Nh > L. \quad (4)$$

Soit encore,

$$N \geq L/\eta = Re_L^{3/4}. \quad (5)$$

Passons à présent en 3D, on obtient :

$$N_{3D} = N_{1D}^3 = Re_L^{9/4}. \quad (6)$$

Prenons l'exemple où $Re_L = 10^6$, il faudra donc $N_{3D} = 3 \cdot 10^{13}$ mailles!!!

Ceci montre qu'une simulation DNS est très coûteuse et est donc réservée aux cas simples, avec un faible nombre de Reynolds. De plus, déterminer une solution numérique aussi précise a peu d'intérêt dans le cadre d'une application industrielle où on ne s'intéresse généralement qu'aux valeurs moyennes et globales.

Il est donc nécessaire de trouver une autre méthode numérique beaucoup moins coûteuse et plus facile à mettre en place qu'une simulation de type DNS. C'est là qu'interviennent les modèles de turbulence qu'on va présenter (très succinctement) dans ce qui suit. On ne va considérer que les modèles basés sur la moyenne de Reynolds appliquée aux équations de Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes ou encore RANS).

3 Modèles de turbulence de type RANS

3.1 La moyenne de Reynolds

Cette moyenne décrit de manière statistique les champs de vitesse. On décompose tout d'abord l'écoulement turbulent en deux termes :

$$u_i = U_i + u'_i, \quad (7)$$

où U_i est la valeur moyenne de la vitesse⁴ et u'_i est la fluctuation de la vitesse par rapport à la valeur moyenne U_i (avec $U_i = \overline{u_i}$ et $\overline{u'_i} = 0$).

La moyenne de cette décomposition permet donc de supprimer les variables fluctuantes. On va donc appliquer cette moyenne aux équations fondamentales de la dynamique des fluides (Eqs. (1) et (2)) en décomposant les variables u et p . Sans rentrer dans le détail des calculs, en faisant l'hypothèse d'un écoulement incompressible et en l'absence de forces volumiques, ces équations deviennent :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

3. Re_L est basé sur cette échelle et sur une échelle de vitesse adéquate

4. Moyenne d'ensemble sur un grand nombre de réalisations d'un même processus, qu'en pratique on peut calculer pour un processus stationnaire comme une moyenne temporelle sur une période très grande devant les périodes caractéristiques de fluctuation (ergodicité).

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\overline{\partial u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (9)$$

On fait donc apparaître un terme supplémentaire, à savoir $-\frac{\overline{\partial u'_i u'_j}}{\partial x_j}$. On peut l'exprimer comme la divergence d'un tenseur, et on introduit ainsi le « tenseur des contraintes de Reynolds » $\tau_{ij} = \rho \overline{u'_i u'_j}$. Ce tenseur symétrique possède 6 composantes indépendantes. Si on fait le bilan des inconnues de notre système toujours composé de quatre équations, on a cette fois-ci : U_i, U_j, U_k, P mais aussi $\overline{u'_i u'_i}, \overline{u'_j u'_j}, \overline{u'_k u'_k}, \overline{u'_i u'_j}, \overline{u'_i u'_k}$ et $\overline{u'_j u'_k}$. Soit au total 10 inconnues pour seulement quatre équations. Il est nécessaire d'introduire d'autres équations pour fermer le système.

3.2 Modélisation de la turbulence, cas du modèle $k - \epsilon$

Le but de cette présentation est de vous montrer comment ce problème de fermeture est traité dans les logiciels de simulation. Nous allons prendre comme exemple un des modèles les plus connus : le modèle $k - \epsilon$.

Rappelons qu'il y a deux familles de modèles :

- dans la première famille, on cherche à calculer chaque composante du tenseur de Reynolds à partir de l'équation de transport (Eq. (2)) appliquée non pas à u mais à $\overline{u'_i u'_j}$: on arrive alors à un autre problème de fermeture portant sur des corrélations triples des fluctuations de vitesse ;
- dans la seconde famille, dont fait partie le modèle $k - \epsilon$, on utilise le concept de « viscosité turbulente ».

Les modèles de cette dernière famille reposent sur l'hypothèse de Boussinesq⁵ qui exprime les contraintes de Reynolds, τ_{ij} , comme le taux moyen de déformation du champ des vitesses moyennes :

$$\overline{u'_i u'_j} = -\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (10)$$

avec ν_t la viscosité turbulente qui est donc une propriété de l'écoulement, contrairement à la viscosité cinématique ν qui est une propriété du fluide. Dans cette équation, $k = \frac{1}{2} \sum_i \overline{u'_i{}^2}$ est l'énergie cinétique turbulente massique (donc homogène à des $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$). En injectant l'Eq. (10) dans l'Eq. (9) on obtient :

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j}. \quad (11)$$

Toute la difficulté est de savoir comment exprimer la viscosité turbulente. Il existe des modèles :

- à zero équation de transport (avec une expression pour ν_t) ;
- à une équation de transport (celle de k) ;
- à deux équations de transport (k et une autre variable, $\epsilon, \omega \dots$).

Le modèle $k - \epsilon$ est un modèle à deux équations de transport. La viscosité turbulente est fonction de k et de la dissipation turbulente ϵ :

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (12)$$

Ce terme de dissipation turbulente correspond à la puissance massique convertie sous forme de chaleur par les plus petits tourbillons (ϵ est homogène à des $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$). L'ensemble du système à résoudre devient alors :

5. qui n'est qu'une hypothèse.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (14)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t \left(\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \epsilon \quad (15)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\epsilon 1} \nu_t \frac{\epsilon}{k} \left(\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (16)$$

avec : $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$. Ces constantes sont obtenues empiriquement⁶.

Sous des hypothèses très fortes, et par calage de constantes sur des expériences de référence, on a aboutit à la fermeture du système.

4 Méthodes numériques

Une solution à ces équations aux dérivées partielles peut être calculée numériquement sur un domaine discrétisé⁷ par application de différentes méthodes :

- méthode aux différences finies ;
- méthode aux éléments finis ;
- méthode aux volumes finis.

Contrairement à la méthode des différences finies qui met en jeu des approximations des dérivées intervenant dans les équations à l'aide de développement en série de Taylor, les méthodes des volumes finis et des éléments finis exploitent des approximations d'intégrales. Toutefois, la méthode des volumes finis se base directement sur la forme dite forte de l'équation à résoudre, alors que la méthode des éléments finis se fonde sur une formulation variationnelle de l'équation (on parle aussi de formulation faible) : on décompose la solution sur une base de fonctions tests. Dans le cas de la méthode aux volumes finis, les termes de flux sont évalués aux interfaces entre les volumes⁸. Cette méthode est conservative, donc parfaitement adaptée à la résolution de lois de conservation. Plus de 90% des codes de calculs en CFD utilisent cette méthode.⁹

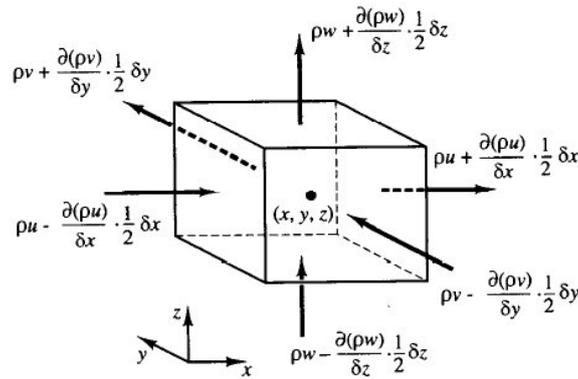


FIGURE 1 – Méthode des volumes finis : bilans sur des volumes élémentaires.

6. Et à moins d'être un expert, on n'a pas intérêt à les changer. C'est d'ailleurs un des rares paramètres par défaut d'un code de CFD qu'il n'est pas absolument nécessaire de toucher.

7. d'où l'importance du maillage, voir § III.2, page 8.

8. La méthode des volumes finis est plus simplement un bilan local dans un petit volume de contrôle.

9. Pour de plus amples précisions, se référer à Versteeg and Malalasekera [2007].

A cause du caractère non-linéaire des équations de Navier-Stokes, la résolution des équations se fait souvent de manière *itérative* à partir de conditions initiales. Dans le cas d'un calcul instationnaire, par exemple, ce calcul itératif est effectué à chaque pas de temps. Le solveur cherche alors une solution des champs de pression, vitesse, température, (...) qui équilibre le système de lois de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie). Le critère d'arrêt de ce calcul itératif, imposé par l'utilisateur, est souvent basé sur le résidu des variables. Lorsque celui-ci devient faible (il a baissé de 3 à 4 ordres de grandeur), cela est un signe que le calcul itératif a convergé vers une valeur donnée et peut-être arrêté.

Toutefois, il est **impératif** d'imposer d'autres critères de convergence, comme la conservation du débit, la constance aux cours des itérations d'une quantité d'intérêt (par exemple la pression statique en entrée d'une pompe) qui a un sens plus physique ou plus parlant par rapport au problème étudié.

5 Récapitulatif

Nous venons de voir de manière très succincte comment un calcul CFD est réalisé. Ce qu'il faut retenir :

- le point de départ sont les équations de la dynamique des fluides ;
- étant impossible de les résoudre analytiquement, on a recours aux méthodes numériques de discrétisation (spatiale et temporelle) ;
- une simulation DNS est très coûteuse et difficile à mettre en place mais ne nécessite pas de modèle de turbulence ;
- le cas échéant, l'utilisation d'un modèle de turbulence permet de simplifier la mise en place d'un calcul CFD ;
- au prix d'inconnues supplémentaires qu'il faut modéliser pour parvenir à un système fermé ;
- une modélisation de type RANS fournit des valeurs moyennes et la qualité des résultats comparés à la réalité peut dépendre du choix d'un modèle ;
- d'autres critères interviennent comme l'ordre des schémas de discrétisation, la qualité du maillage, le nombre de mailles...

Cette section achève la partie « théorique » de cette introduction à la CFD. La suite abordera de manière plus pratique le déroulement d'une simulation CFD.

Troisième partie

Etapes de la CFD

F. R.

1 CAO

Toute simulation CFD commence par la réalisation de la géométrie en $2D$ ou $3D$, soit avec un logiciel intégré au code de calcul CFD soit à l'aide d'un logiciel de CAO. Dans le deuxième cas, la géométrie doit être exportée en un format lisible par le logiciel de maillage. Les formats STEP¹⁰ ou IGES¹¹ sont les plus couramment utilisés.

2 Maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu son influence sur la solution calculée. Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. La qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul. Une bonne qualité de maillage repose sur la minimisation des éléments présentant des « *distorsions* » (skewness en anglais), et sur une bonne « *résolution* » dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc, . . .). Un bon maillage doit également être suffisamment « *lisse* ».

2.1 Composants du maillage

Le domaine de calcul est défini par un maillage qui représente le fluide et les faces solides qui interviennent.

- “Cell” : volume de contrôle divisant la géométrie ;
- “Face” : frontière d'une “cell”, où sont définies les conditions aux limites ;
- “Edge” : frontière d'une “face” ;
- “Node” : point de maillage ;
- “Zone” : groupe de “nodes”, “faces” et/ou “cells”.

2.2 Choix du type de maillage

On définit les maillages structurés, et non structurés (voir Fig. 2).

Maillage structuré (quadra/hexa)

Un maillage structuré est un maillage qui peut être généré en reproduisant plusieurs fois une maille élémentaire. Dans ce type de maillage, tout nœud peut être repéré par un doublet ou un triplet (i, j, k) . Le maillage structuré tire profit de la numérotation et la topologie est implicite (stockage quasi-nul). En $2D$, les éléments sont des quadrilatères, en $3D$ ce sont des hexaèdres. Il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent.

10. STandardized Exchange of Product

11. Initial Graphics Exchange Specification

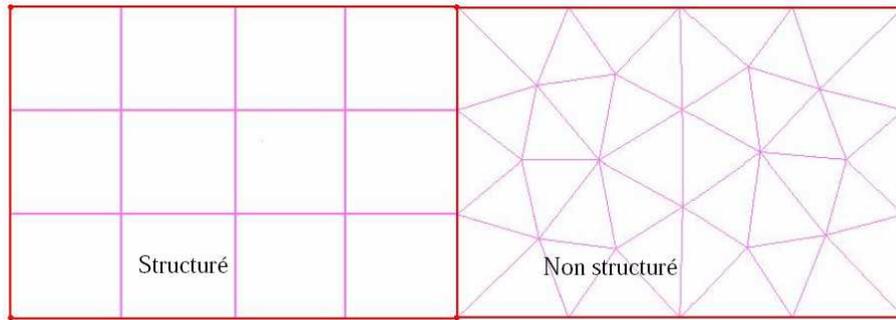


FIGURE 2 – Maillages structurés et non structurés.

- Lorsque l'écoulement moyen est aligné avec le maillage, un maillage structuré réduit les risques d'erreurs numériques.

Ses inconvénients :

- Difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

Il est beaucoup plus facile à générer en utilisant une géométrie à blocs multiples.

Maillage non structuré (tri/tétra)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant-à leur disposition. Ses avantages :

- Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments,
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés.

Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- Impose une structure de données gourmande en capacités de stockage.
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importantes si on le compare avec le maillage structuré.

Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en $2D$, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en $3D$. Il combine les avantages des maillages structurés et non structurés.

2.3 Techniques générales de génération du maillage

En pratique, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne Qualité des éléments,
- Assurer une bonne Résolution dans les régions à fort gradient,
- Assurer un bon Lissage dans les zones de transition entre les parties maillage à fin et les parties à maillage grossier,
- Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable).

On peut se souvenir de ces règles en utilisant la formulation mnémotechnique QRLT.

Distorsion

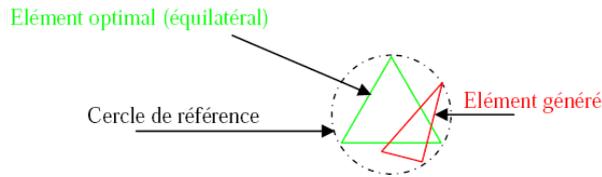


FIGURE 3 – Définition de la skewness sur un volume triangulaire.

Le facteur de distorsion F_d (skewness) peut être défini de deux façons différentes. Pour des éléments triangulaires ou tétraédriques, le calcul est basé sur le volume équilatéral (voir Fig. 3) :

$$F_d = \frac{\text{Taille}_{\text{élément optimal}} - \text{Taille}_{\text{élément généré}}}{\text{Taille}_{\text{élément optimal}}}$$

L'autre formulation, applicable pour tout élément, est basée sur la déviation angulaire, avec θ les angles de l'élément :

$$F_d = \max\left\{\frac{\theta_{\max} - 90}{90}, \frac{90 - \theta_{\min}}{90}\right\}$$

Le facteur de distorsion est nul pour des éléments « parfaits » (carrés, triangles équilatéraux). Notons que les grandes valeurs du facteur de distorsion induisent des erreurs de calcul et ralentissent considérablement le processus de convergence. Quelques distorsions peuvent être tolérées si elles sont situées dans des régions à faible gradient. Le tableau 1 illustre la variation de la qualité des éléments de maillage en fonction de la valeur du coefficient de distorsion F_d :

F_d	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.99	0.99-1.00
Qualité	Excellente	Bonne	Acceptable	Pauvre	Très pauvre	Mauvaise

TABLE 1 – Qualité associée au facteur de distorsion.

Résolution

La notion de résolution concerne plus particulièrement les zones qui présentent un fort gradient, ainsi une bonne résolution —un maillage localement plus fin— permet de mieux décrire les phénomènes physiques qui existent dans ces zones telles que les ondes de choc, ou les phénomènes liés à la couche limite [à ce sujet, voir Schlichting, 2000]. La plupart des maillages proposent des méthodes de maillage particulières pour réaliser en proche paroi des maillages structurés dont on maîtrise la taille (voir Fig. 4, et les détails donnés en p. 13 pour le choix de cette taille). Enfin, on considère qu'entre deux parois, il faut au minimum une dizaine de mailles.

Lissage

Le changement dans la taille des éléments du maillage d'une zone maillée à une autre doit être graduel, la variation de la taille des éléments de deux zones adjacentes ne doit *idéalement* pas dépasser 20% à 30% (voir Fig. 5).

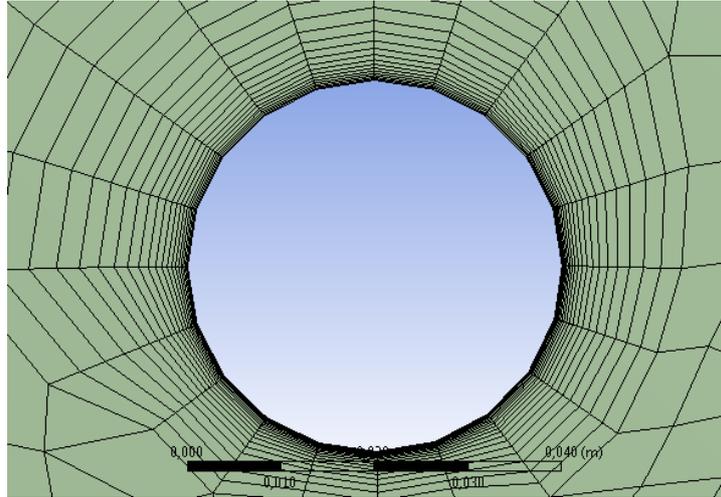


FIGURE 4 – Exemple de maillage en proche paroi de type « maillage de couche limite », réalisé avec le mailleur intégré dans ANSYS 13.

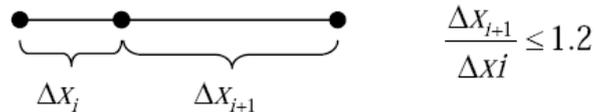


FIGURE 5 – Evolution de la taille des éléments.

Nombre total d'éléments

Un nombre important d'éléments de maillage permet sans doute d'améliorer la précision des calculs, mais pénalise les ressources informatiques en terme de mémoire et alourdit le système. En conséquence, un compromis entre précision et temps de calcul s'impose. Des techniques existent pour économiser un certain nombre d'éléments :

- Utilisation des maillages non uniformes, en concentrant la bonne qualité du maillage uniquement dans les zones où c'est nécessaire,
- Utilisation de la fonction adaptation de maillage pour raffiner uniquement sur des zones bien précises (si le code possède cette option),
- Utilisation des éléments de maillage hexaédriques dans les zones adéquates.

2.4 Convergence en maillage

Dans une modélisation CFD, la solution doit être indépendante de la densité du maillage pour être sûr du réalisme de la solution que donne le solveur après convergence.

De manière systématique, pour tout calcul par CFD on se doit de réaliser et de présenter un test de *convergence en maillage*, en reportant l'évolution d'une grandeur, tant qu'à faire que l'on souhaite mesurer par la simulation en cours —le coefficient de frottement à une paroi, la différence de charge hydraulique aux bornes d'une pompe, un coefficient de transfert thermique, ...— en fonction de la taille du maillage que l'on raffine successivement (voir Fig. 6).

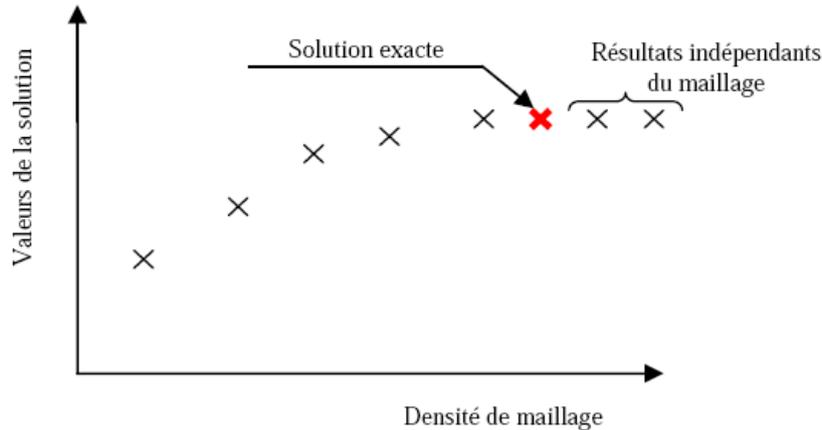


FIGURE 6 – Test de convergence en maillage.

3 Simulation

Cette section se veut la plus générale possible, elle explicite les étapes nécessaires pour réussir une simulation d'un problème en mécanique des fluides. Selon les codes (FLUENT *vs.* STARCCM+ par exemple), de subtiles différences sont possibles (par exemple l'appellation des lois de paroi). On pourra consulter Versteeg and Malalasekera [2007] afin d'obtenir des précisions notamment sur la méthode des volumes finis, les problèmes de schémas numériques et les algorithmes de couplages pression-vitesse pour les écoulements incompressibles.

Les principales étapes d'une simulation que l'on décrit en détails ci-après sont, dans l'ordre :

1. Le paramétrage du solveur ;
2. La modélisation (éventuelle) de la turbulence ;
3. La définition des caractéristiques du fluide ;
4. Le réglage des "Operating conditions" ;
5. Le paramétrage des conditions aux limites ;
6. Le choix des critères de convergence ;
 - ⇒ Conservation de la masse.
 - ⇒ Evolution d'une variable pendant les calculs.
7. L'initialisation des calculs ;
8. Le paramétrage des sauvegardes automatiques en cours de simulation ;
9. Le lancement de la simulation.

3.1 Choix des équations résolues par le solveur

Selon le problème, on peut être amené à considérer :

- La dimension du problème, $2D$, $3D$, ou axisymétrique ;
- Le caractère stationnaire ou instationnaire ;
- Le caractère incompressible ou compressible de l'*écoulement*¹² ;

12. Et non du fluide : tous les fluides sont compressibles, et si $\frac{\partial \rho}{\partial p} \ll 1$, *i.e.* lorsque les variations de densité causées par les variations de pression dues à l'écoulement sont faibles, on est en écoulement incompressible. C'est le cas quand $u \ll c$, *i.e.* quand le nombre de Mach $M \ll 1$ (Rappel : eau $\Rightarrow c = 1480\text{m.s}^{-1}$, air $\Rightarrow c = 340\text{m.s}^{-1}$).

- Le besoin ou non de prendre en compte le bilan d'énergie, et dans ce cas, on pourra alors avoir accès à des équations d'état, à des modèles de type Boussinesq pour la convection naturelle, ... ;
- La prise en compte de forces extérieures (gravité, force d'inertie liées à la rotation, ...) ;
- La modélisation éventuelle de la turbulence ;
- La présence de plusieurs phases ...

3.2 Choix du modèle de turbulence

On pourra commencer par consulter Cadot [2009] pour revoir des notions de turbulence, et CFD-Online [2012a] pour plus de détails sur la modélisation de la turbulence appliquée à la CFD.

Si on se trouve en présence d'un écoulement susceptible d'être turbulent et que l'on ne peut (ou souhaite) résoudre le problème par DNS (voir p. 3), on est confronté au choix d'un modèle de turbulence. La modélisation de la turbulence consiste —grossièrement— à représenter soit l'influence de la turbulence sur l'écoulement moyen (approches statistiques de type RANS, voir p. 4), soit l'influence des échelles non-résolues sur les échelles résolues (approches filtrées de type « Simulation des Grandes Echelles », en anglais “Large Eddy Simulation” : LES).

Modèles RANS : Nous nous limitons ici à des modèles RANS *stationnaires*, permettant d'obtenir une bonne approximation des valeurs moyennes dans des écoulements industriels. Les principaux modèles de type RANS disponibles sont listés au Tab. 2. Un exemple traitant de l'influence du choix du modèle de turbulence sur les résultats peut être consulté dans Zeghib and Talbi [2008].

Traitement des parois : Pour les modèles $k-\epsilon$ et RSM, on a alors le choix du traitement des parois (les modèles $k-\omega$ et Spalart-Allmaras s'appliquent dans les couches limites si la résolution est suffisante). Ceci mériterait un chapitre à part [consulter par exemple Schlichting, 2000]. Rappelons néanmoins les notions principales sur les couches limites, en particulier *turbulentes* :

Pour un fluide parfait, la condition limite à appliquer sur une surface rigide est une condition de glissement, et il n'y a pas de frottement. Mais aucun fluide¹³ n'est parfait : ils possèdent une viscosité. La condition limite sur une paroi est donc l'adhérence, ce qui est à l'origine de frottements.

La partie du fluide qui est infiniment proche d'une paroi a donc pour vitesse la vitesse de la paroi. Loin de la paroi, la vitesse de l'écoulement « externe » peut être différente. Il doit donc y avoir un raccord entre la paroi et l'écoulement externe. Cette zone de raccord est appelée couche limite. Il s'agit (grossièrement) de la zone dans laquelle la vitesse de l'écoulement est comprise entre 0% et 99% de la vitesse externe (à l'infini sur la normale à la paroi, voir aussi Fig. 18 p. 32). La couche limite conditionne directement la résistance de frottement du corps en mouvement dans le fluide.

C'est une zone où les effets visqueux dominent. De manière générale, plus le nombre de Reynolds est élevé, moins le fluide est visqueux *relativement* aux effets d'inertie (« d'élan » en quelque sorte), et plus la couche limite est fine *relativement* aux échelles du problème. Il s'agit donc d'une zone de forts gradients, à mailler finement.

On peut faire face à deux situations :

- La couche limite est laminaire (par exemple près du bord d'attaque d'un profil avec un écoulement amont « calme »). Dans ce cas il est nécessaire d'avoir un modèle sans loi de paroi type $k-\omega$ ou Spalart-Allmaras. Il faut que la couche limite soit suffisamment résolue,

13. L'hélium 4 et l'hélium 3 deviennent « super-fluides » à, resp., $T \leq 2\text{K}$ et $T \leq 2 \times 10^{-3}\text{K}$.

<i>Modèles</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Spalart-Allmaras	Economique (1 equ). Bon pour les écoulements libres, et les écoulements sur profil sans décollements ni grands gradients de pression.	Nécessite une plus grande résolution du maillage aux frontières (pas de lois aux murs).
Standard $k - \epsilon$	Robuste, économique et relativement précis. Adapté aux écoulements à grand nombre de Reynolds.	Résultats médiocre pour des écoulements complexes (fort gradient de pression, rotation et swirl).
RNG $k - \epsilon$	Dérivé par une méthode statistique rigoureuse (Renormalization Group theory). Bon pour des écoulements moyennement complexes (impact de jet, séparation d'écoulements, recirculations).	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
Realizable $k - \epsilon$	Respecte une contrainte physique que peut violer le modèle $k - \epsilon$. Offre les mêmes avantages que le RNG. Recommandé dans le cas des turbomachines.	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
SST et Standard $k - \omega$	Modèle recommandé pour les problèmes liés aux turbomachines (à comparer au Realizable $k - \epsilon$). La version SST $k - \omega$ consiste en une transition entre le modèle $k - \omega$ standard (développé pour les nombres de Reynolds modérés et les couches limites) et une version haut Re du $k - \epsilon$ lorsqu'on est loin des parois.	Nécessite une plus grande résolution du maillage aux frontières (pas de lois aux murs).
Reynolds-Stress Model (RSM)	Le modèle le plus complet physiquement (transport et anisotropie de la turbulence sont pris en compte).	Requiert plus de temps CPU. Les équations de quantité de mouvement et de transport de la turbulence sont étroitement liées.

TABLE 2 – Modèles statistiques de turbulence de type RANS.

c'est-à-dire qu'on ait au moins 10 cellules dans la couche limite, dont on peut estimer *a priori* l'épaisseur par $\delta/L \simeq Re^{-1/2}$ avec L une échelle caractéristique et Re un nombre de Reynolds bâti sur cette échelle caractéristique.

- La couche limite est turbulente. Dans ce cas on a le choix entre principalement deux approches. Dans la première, on ne résoud pas toute la couche limite et on remplace son effet par des lois empiriques ou « lois de paroi » (“wall functions”). Dans la seconde, on résoud la couche limite jusqu'à la très proche paroi, et le maillage doit être impérativement adapté.

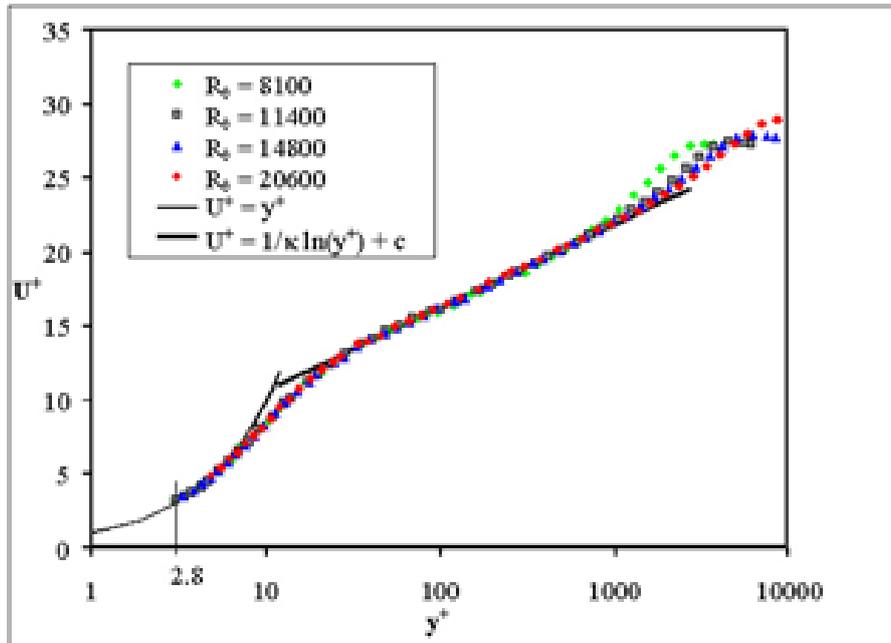


FIGURE 7 – Profil de vitesse dans une couche limite turbulente sur plaque plane, en unités de paroi.

Rappelons brièvement la structure d'une couche limite turbulente, illustrée en Fig. 7. A la limite d'un nombre de Reynolds infini, on peut montrer que la contrainte totale dans le fluide est constante dans la zone proche de la paroi ou “Constant Stress Layer”. Cela est plutôt bien vérifié dans la réalité.

De manière succincte, afin d'avoir un critère « universel », on introduit des variables adimensionnées en « unités de paroi » : u^+ pour la vitesse normale et y^+ pour la distance à la paroi. Tout d'abord on construit une échelle de vitesse avec τ_w la contrainte de cisaillement pariétal et ρ la masse volumique :

$$u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$$

La distance adimensionnée est, avec $\nu = \mu/\rho$ la viscosité cinématique du fluide :

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$$

La “Constant Stress Layer” est divisée en trois régions :

- La zone la plus proche de la paroi est dominée par la viscosité ; on démontre alors que $u^+ = y^+$. Il s'agit d'un résultat exact sans coefficients à ajuster. Cette loi est vérifiée pour $y^+ \leq 3$ (ou 7 selon les auteurs), voir Fig. 7.
- On a ensuite une « zone tampon » (“buffer layer”) où la contrainte est partagée entre contrainte visqueuse et tenseur de Reynolds ; le profil de vitesse dans cette zone n'a pas de forme fonctionnelle analytique.

- La zone « inertielle », qui s'étend de $30 \leq y^+ \leq 300$, où la contrainte est dominée à 99% par la contrainte turbulente (tenseur de Reynolds). Dans ce cas, on peut montrer que le profil de vitesse a pour forme fonctionnelle $u^+ = a \ln(y^+) + b$, avec a et b deux constantes ajustées sur des mesures expérimentales (voir Fig. 7). Ces constantes ne sont pas universelles, et leur dépendance d'une part en nombre de Reynolds et d'autre part avec le gradient de vitesse longitudinal externe à la couche fait l'objet de débats [voir par exemple CFD-Online, 2012b].

Dans le cas de la CFD, il est donc important de choisir puis de contrôler la taille de la première maille de couche limite, c'est-à-dire la valeur de y^+ . Pour l'évaluer on doit connaître la contrainte de frottement pariétal τ_w . A cette fin on peut utiliser des expressions empiriques (loi de Colebrook par exemple) ou des tables (Moody chart) pour le coefficient de frottement pariétal :

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2}$$

<i>Lois de paroi</i>	<i>Domaine de validité</i>	<i>Utilisation</i>
Standard wall function (FLUENT) / High y^+ Wall Function (STARCCM+)	$30 < y^+ < 300$	A utiliser avec un standard $k - \epsilon$, lorsqu'il n'y a pas de gros gradient de pression adverse.
Non equilibrium wall function (FLUENT)	$30 < y^+ < 300$	Conçu pour des situations plus complexes impliquant détachement, impacts, recirculations (à utiliser donc plutôt en combinaison avec un RNG ou Realizable $k - \epsilon$).
All- y^+ wall treatment (STARCCM+)	$1 < y^+ < 300$	Traitement hybride tentant de faire un raccord entre les deux approches pour traiter également la zone tampon.
<i>Résolution de la sous-couche linéaire</i>	<i>Domaine de validité</i>	<i>Utilisation</i>
Enhanced wall treatment (FLUENT) / Low y^+ Wall Function (STARCCM+)	$y^+ \simeq 1$ et 10 cellules dans la zone où $Re_y < 200$.	Dans le cas de nombres de Reynolds intermédiaires, dispose d'options permettant de mieux prendre en compte les transferts thermiques.

TABLE 3 – Principales options de traitement des parois pour FLUENT et STARCCM+.

Le tableau 3 rassemble les différents traitements de paroi disponibles pour les codes CFD courants. Citons enfin une partie de la documentation de FLUENT :

The wall function approach becomes less reliable when the flow conditions depart too much from the ideal conditions underlying the wall functions. Examples are as follows:

% Pervasive low-Reynolds-number or near-wall effects
(e.g., flow through a small gap or highly viscous,
low-velocity fluid flow).

% Massive transpiration through the wall (blowing/suction).

% Severe pressure gradients leading to boundary layer separations.

% Strong body forces (e.g., flow near rotating disks, buoyancy-driven flows).

% High three-dimensionality in the near-wall region
(e.g., Ekman spiral flow, strongly skewed 3D boundary layers).

En résumé : il est nécessaire de vérifier et de présenter après un calcul la valeur des y^+ .

3.3 Définition des caractéristiques du fluide

Les codes disposent de bibliothèques des fluides les plus courants.

3.4 Operating conditions

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence. En effet, bien souvent les calculs sont effectués avec une pression relative appelée "gauge pressure" et ce afin d'éviter les erreurs d'ordre numérique lors du calcul pour des écoulements à faible nombre de Mach. La relation liant la pression absolue à la "gauge pressure" est donnée par $P_{abs} = P_{op} + P_{gauge}$, avec P_{op} la "operating pressure". Par défaut il s'agit de la pression atmosphérique.

On peut également inclure la gravité. Attention, selon les codes, on a alors prise en compte ou non de la pression hydrostatique dans la pression utilisée.

Exercice personnel : pourquoi la gravité n'a aucune importance pour un écoulement à densité constante sans surface libre ?

3.5 Conditions aux limites

On dispose d'un certain nombre de conditions, parmi lesquelles on distinguera des conditions d'entrée, de sortie, aux frontières solides, de périodicité ou de symétrie. Il faut garder à l'esprit que *par défaut*, les conditions imposées de type entrée / sortie correspondent à des profils uniformes sur la frontière, ce qui ne représente pas toujours la réalité physique.

Par exemple, pour FLUENT, on a le choix pour les entrées entre :

- *Velocity Inlet* : Utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles ; la vitesse d'entrée est imposée.
- *Pressure Inlet* : Utilisée pour les écoulements compressibles et incompressibles. On fixe alors la pression *totale* en entrée.

Définition de la pression totale en écoulement incompressible :

$$P_t = p + \frac{1}{2}\rho V^2$$

En écoulement compressible de c_p constant, avec γ l'exposant isentropique et M le nombre de Mach :

$$P_t = p\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

- *Mass Flow Inlet* : On impose un débit massique connu à l'entrée. Pas nécessaire en écoulement incompressible.
- *Inlet Vent* : Exotique, correspond à une grille d'aération dont on fixe la loi de perte de charge.
- *Intake Fan* : Exotique, correspond à un ventilateur d'aspiration dont on fixe la caractéristique.

Et pour les sorties :

- *Pressure Outlet* : Spécifie la pression *statique* de sortie. L'utilisation de Pressure Outlet sert à définir la pression statique à la sortie. L'utilisation de la condition "Pressure Outlet" au lieu de "Outflow" a souvent comme conséquence une meilleure convergence. Nota : Problèmes de retour de débit ("BackFlow"). Le phénomène apparaît lorsque la pression statique dans une maille voisine à la maille qui est sur la frontière est inférieure à la pression imposée en conditions aux limites. Il faut essayer d'éliminer le "Backflow" en éloignant la sortie (en allongeant le domaine de calcul).
- *Outflow* : Cette condition est utilisée pour modéliser les sorties de fluide dont on ne connaît pas *a priori* les détails de la vitesse et de la pression à la sortie. On suppose qu'on a atteint un régime établi où les gradients de vitesse et de température normaux à la sortie sont nuls. Cette condition n'est pas appropriée pour les calculs suivants :
 - Si le problème possède une condition de type "Pressure Inlet" ;
 - Si vous modélisez un écoulement compressible ;
 - Si vous modélisez un écoulement instationnaire avec variation de la densité.
- *Pressure Far-field* : uniquement en compressible, on modélise un écoulement libre de nombre de Mach connu.
- *Outlet Vent* : Exotique, correspond à une grille d'aération dont on fixe la loi de perte de charge.
- *Outake Fan* : Exotique, correspond à un ventilateur d'extraction dont on fixe la caractéristique.

Les conditions disponibles dans STARCCM+ sont comparables.

3.6 Choix des critères de convergence

Un solveur itératif cherche à équilibrer les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Partant d'une solution initiale, le solveur la fait évoluer vers une solution finale qui respecte au mieux ces diverses équations. On définit les résidus comme une mesure de l'écart à une solution parfaite.

Remarque importante : les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables pression, vitesse, température du problème entre la présente itération et l'itération précédente. Le critère de convergence par défaut dans FLUENT (residus tous sous 10^{-3}) est sous-évalué. Il vaut mieux pousser les calculs à 10^{-4} voire 10^{-6} . Il n'y a pas de règle universelle. Dans le cas des écoulements diphasiques, il faut impérativement pousser la convergence à 10^{-5} . Dans le cas de STARCCM+, il n'y a par défaut pas de critère d'arrêt lié aux résidus. Leur affichage permet de surveiller l'évolution de la solution.

Faites bien attention à la convergence des calculs. Il y a au moins deux choses à vérifier :

1. Conservation de la masse. Un critère révélateur de la convergence est de vérifier la conservation de masse. Il faut que la différence entre les débits entrants et sortants soit nulle (infiniment petite).
2. Evolution d'une intégrale. L'affichage de l'évolution de l'intégrale (surfique ou volumique) d'une variable pendant les calculs est un autre moyen de vérifier que la solution est bien stable. Sur l'exemple ci-dessous, issu d'une simulation d'un problème de convection forcée sur un réseau de cylindres chauffants (Fig. 8), on peut voir que la température moyenne en sortie converge beaucoup plus rapidement que le nombre de Nusselt sur les éléments chauffants¹⁴.

14. La température en sortie est une quantité globale, directement liée au bilan d'énergie sur ce système. Le nombre de Nusselt est une quantité locale, d'où une convergence plus lente.

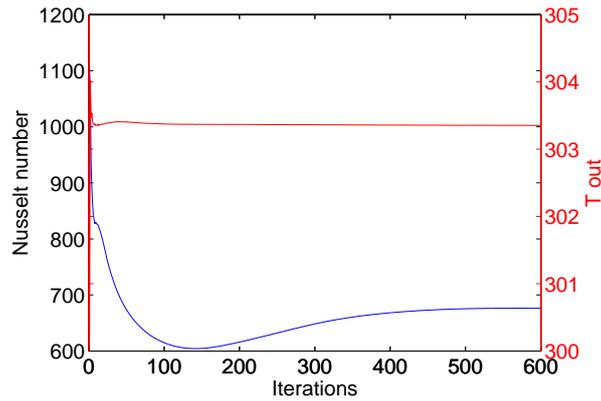


FIGURE 8 – Evolution du nombre de Nusselt moyenné sur le cœur (courbe du bas, échelle de gauche) et de la température moyenne en sortie (courbe du haut, échelle de droite).

3.7 Initialisation des calculs

Il est conseillé dans de nombreux cas d’initialiser les calculs aux conditions de l’entrée, ou dans le doute de tout initialiser à zéro. Toutefois s’il y a un calcul qui a déjà convergé et que vous désirez changer juste un paramètre (par exemple la vitesse d’entrée), il est préférable d’initialiser au calcul précédent déjà convergé.

3.8 Sauvegardes

Il est conseillé une fois le paramétrage effectué de sauvegarder la simulation, avant de la lancer, ainsi que de mettre en place une sauvegarde automatique tous les n itérations ou pas de temps.

4 Post-traitement

Les logiciels de CFD fournissent souvent des outils intégrés de post-traitement. Toutefois, rien n’interdit d’exporter les données dans divers formats afin de les traiter sous d’autres logiciels¹⁵ type PARAVIEW pour la visualisation, ou OCTAVE, NUMPY, SCIPY pour une analyse plus poussée.

Pensez à, par exemple :

- Calculer et rapporter des quantités intégrales sur des surfaces et des frontières. Ces outils vous permettent de trouver le débit massique, les forces et les moments sur des frontières, l’intégrale, le débit, la moyenne sur une surface ou un volume. En outre, vous pouvez imprimer des histogrammes des données, vous pouvez définir des valeurs de référence pour le calcul des coefficients adimensionnels. Vous pouvez également imprimer ou sauver un compte-rendu succinct des modèles et des conditions aux limites.
- Afficher des cartes de pression, vitesse et autres quantités sur des sections.
- Tracer des profils sur des lignes particulières.

15. libres.

Quatrième partie

Introduction à StarCCM+

H. N.

1 Présentation de l'interface

Les différentes étapes décrites ci-dessus donnent une méthode générale à suivre pour une simulation CFD. Ensuite, chaque code de calcul, bien qu'en général les codes suivent des démarches similaires, propose différentes possibilités et options. Dans le cadre de ces TP, on va utiliser le code de calcul STARCCM+ qui intègre son propre mailleur en plus du solveur.

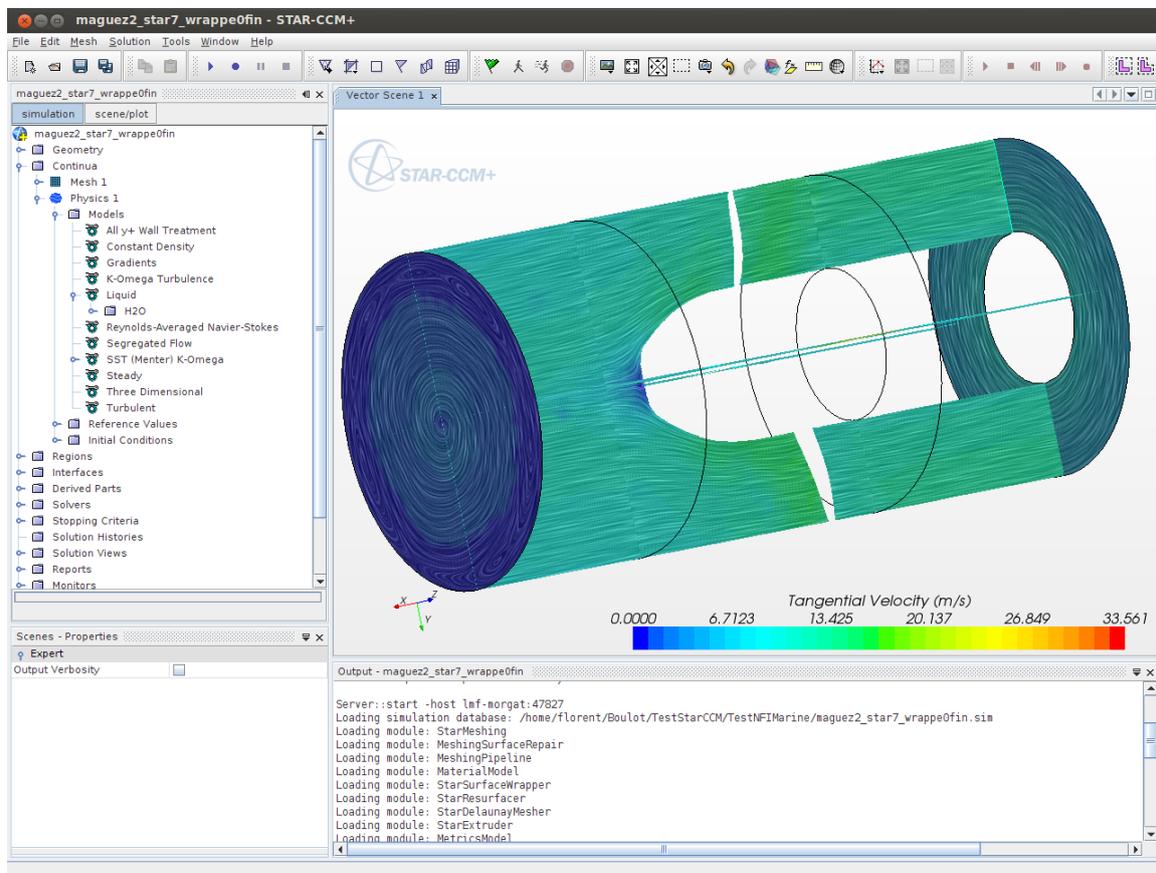


FIGURE 9 – Interface de STARCCM+, version 7.06.012.

STARCCM+ possède une interface écrite en Java, illustrée en Fig. 9. Elle se compose :

- D'une barre de menu (en haut) ;
- D'une barre d'outils peuplée d'icônes (en dessous de la barre de menu) ;
- D'un panneau d'exploration avec des menus déroulants (à gauche). Ici, on a activé la liste des modèles physiques ;
- D'une fenêtre des propriétés liées à l'item activé dans le panneau d'exploration (juste en dessous du panneau d'exploration) ;
- D'une fenêtre graphique. Ici, on visualise la "Vector Scene 1" ;
- D'une console de sortie (en bas) ;

- D’un bouton en forme de point d’interrogation, qui lancera l’aide en ligne au chapitre concernant l’item activé dans le panneau d’exploration. Ne pas hésiter à s’en servir.

Cette interface est très intuitive et la logique des opérations à effectuer est *grosso-modo* de haut en bas ou de gauche à droite. N’hésitez pas à dérouler les menus du panneau d’exploration, à essayer des doubles clics, et des clics droit,...

2 Quelques notions : “Part”, “Region”, “Boundary” et “Interface”

Remarque : *StarCCM+* ne permet pas de réaliser des maillages en 2D. Pour mailler des pièces en 2D, il faut d’abord la créer et mailler en 3D puis faire une coupe 2D avant de lancer la simulation en 2D.

La version 7 de STARCCM+ inclut des fonctionnalités basiques de CAO permettant de créer des pièces. Toutefois, dans ce document, on suppose que la géométrie a été créée sous un autre environnement et est importée à partir de fichiers IGES ou STEP.

Lors de l’import d’une géométrie, STARCCM+ vous propose de créer :

- une entité géométrique (“New Part”), que l’on peut ensuite combiner avec d’autres par opération booléenne, avant de convertir tout ceci en un domaine fluide.
- ou un domaine fluide (“New Region”) qu’il est possible de mailler directement ;

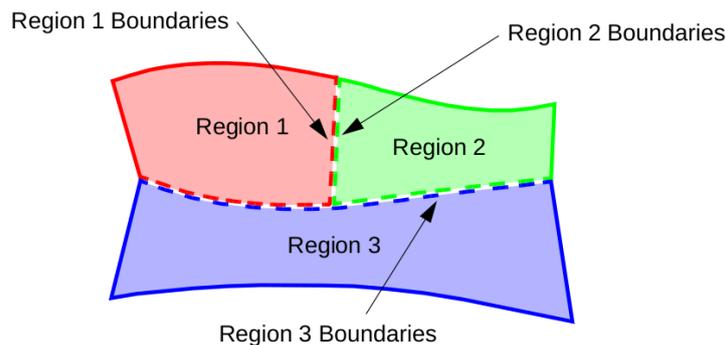


FIGURE 10 – Définition des domaines et des frontières

Un domaine fluide volumique en 3D (surfacique en 2D) dans STARCCM+ est appelé *Region* (domaine). Chaque domaine doit avoir des frontières ou des limites (*Boundaries*) pour être valide. Donc une frontière, est une surface en 3D (ligne, en 2D) délimitant un domaine (Fig. 10). Une frontière n’est jamais partagée entre deux domaines. Par exemple, si deux domaines sont adjacents et partagent une même frontière commune, chaque domaine doit être d’abord défini avec sa propre limite et les conditions qu’on lui impose (les conditions aux limites ou *Boundary conditions*). Une fois que chacune des frontières de ces deux domaines adjacents sont définis, on crée ce qu’on appelle des *Interfaces* entre ces deux frontières pour relier physiquement les deux domaines (Fig. 11).

3 Maillage

Pour mailler un domaine, il faut d’abord créer un continuum de maillage (Mesh continuum). Celui-ci doit contenir le ou les domaine(s) à mailler. On peut créer plusieurs continnum, un pour chaque domaine si c’est nécessaire. Dans les propriétés du continuum du maillage, il est

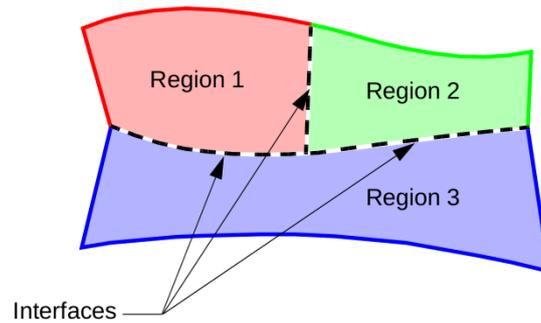


FIGURE 11 – Définition des interfaces

possible de spécifier et/ou modifier les caractéristiques du maillage à réaliser sur les domaines contenus dans ce continuum. De plus, STARCCM+ permet par exemple, si on le souhaite d'appliquer d'autres paramètres de maillage à seulement une frontière ou une partie des domaines d'un continuum. Pour cela, il faut spécifier les paramètres désirés directement dans *Regions* du menu déroulant à gauche.

Lors de l'opération de maillage, STARCCM+ définit un ordre de priorité composé de 5 niveaux (du plus haut au plus bas niveau, le niveau le plus bas étant le niveau le plus prioritaire) :

- Continuum level,
- Region level,
- Boundary level,
- Feature curve level,
- Interface level.

Pour réaliser le maillage, STARCCM+ possède plusieurs modèles regroupés en deux types, les modèles de maillage surfacique et les modèles de maillage volumique :

- Modèles surfaciques
 - **Surface Wrapper** : permet de réparer une géométrie de mauvaise qualité (contour ou surface ouverts, trous, écart entre deux surfaces...) avant de commencer à la mailler.
 - **Surface remesher** : permet de réaliser un premier maillage surfacique et de réparer globalement, en re-triangularisant certaines mailles, les mauvaises surfaces. Il optimise le maillage pour un maillage volumique ultérieur.
- Modèles volumiques
 - **Volume remesher** : permet de mailler le volume du domaine avec trois types de mailles différentes :
 - a) *Cellules tétraédriques* : c'est le plus simple et le plus rapide des trois.
 - b) *Cellules polyédriques (en moyennes 14 faces)* : relativement facile à mettre en place et efficace. Il nécessite cinq fois moins de mailles par rapport au cas précédent.
 - c) *Trimmed cells* : permet de réaliser des maillages de haute qualité pour des géométries simples ou complexes. Les cellules sont de formes hexahédriques.
 - **Generalized cylinder (à utiliser avec le modèle polyédrique)** : permet de mailler efficacement un domaine cylindrique.
 - **Thin mesh** : permet de créer des mailles de formes prismatiques pour des régions de faibles épaisseurs. STARCCM+ peut automatiquement détecter ces régions fines à partir d'un paramètre défini par l'utilisateur. Le reste du domaine est maillé avec un autre modèle spécifié.

- **Prism layer mesher** : permet de réaliser des couches limites.
- **Extruder mesher** : permet d’avoir un volume maillé supplémentaire et extrudé à partir de la frontière à laquelle il s’applique (Fig. 12).

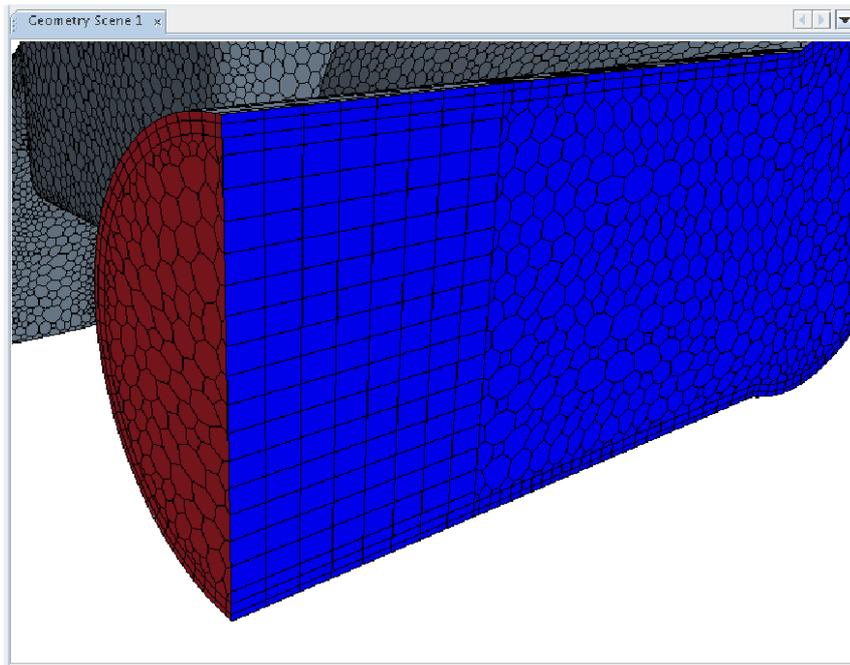


FIGURE 12 – Illustration du maillage d’un domaine. On distingue ici un maillage au cœur de type polyédrique, ainsi qu’une couche limite en paroi *Prism Layer* et une limite surfacique extrudée avec la fonction *Extruder*. Notez aussi le code couleur, lié au type de conditions aux limites : rouge pour une entrée de vitesse, bleu pour une symétrie, et gris pour des parois solides.

Le choix des modèles est à votre discrétion. Pour connaître toutes les possibilités et options du mailleur de STARCCM+, il faut consulter les fichiers d’aide du logiciel. Cependant, certains paramètres seront présentés au cours de ces TPs.

Les opérations de maillage se lancent à partir de la barre d’outil (Fig. 9).

4 Modélisation

Il faut créer un continuum physique. Dans celui-ci seront définis tous les paramètres nécessaires pour lancer la simulation :

- la type de modélisation spatiale (2D, 3D ou axisymétrique) et temporelle (stationnaire ou instationnaire),
- le fluide et ses caractéristiques,
- le type d’écoulement (par exemple non visqueux, laminaire, turbulent...),
- les modèles de turbulence,
- ...

La figure 13 montre un exemple de modèles disponibles. Chaque panneau représente une caractéristique particulière qui peut être dépendante des autres ou pas. A chaque fois qu’on clique sur le paramètre qu’on veut choisir à gauche, il passe à droite dans les modèles physiques retenus. Notez la petite case “Auto-select recommended Physics models”.

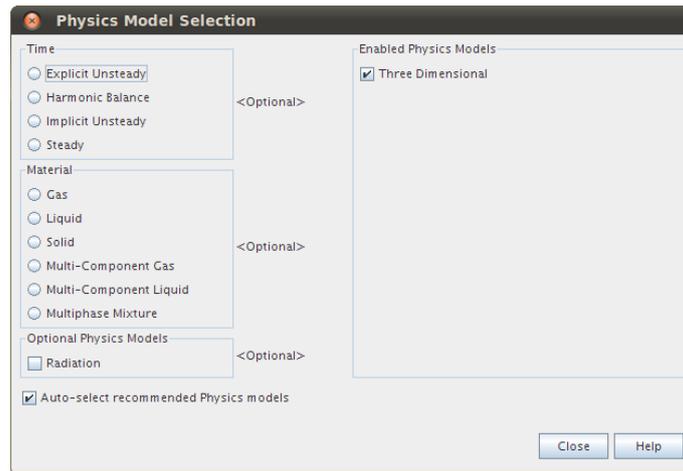


FIGURE 13 – Exemples de modèles

***Remarque :** STARCCM+ différencie un modèle d'un solveur. Le modèle est défini et s'applique à un type de continuum (solide, fluide...). Par exemple, pour modéliser la turbulence dans un continuum fluide, on applique le modèle $k - \epsilon$. Un solveur, quant à lui, a une étendue plus large, et peut s'appliquer sur plusieurs continnumms.*

5 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont spécifiées dans "Region" dans le menu déroulant à gauche.

6 Initialisation du calcul

Dans le continuum physique créé, on peut spécifier les conditions initiales du calcul. Là encore, STARCCM+ propose plusieurs possibilité d'initialisation, soit en imposant une valeur constante (pour la vitesse, la pression, la température...) soit en imposant des valeurs à partir d'une fonction, soit à partir d'un tableau de valeur. L'initialisation du domaine de calcul permet au solveur de partir de valeurs qui ne sont pas trop éloignées de la solution. Pour cette raison, il est conseillé de rentrer des valeurs proches de celles espérées ou estimées.

7 Critère de convergence

Le critère de convergence ou le critère d'arrêt du calcul est le critère qui doit être vérifié pour arrêter le calcul. On peut par exemple imposer un nombre d'itérations ou alors demander à ce que le calcul continue d'itérer tant que les résidus n'ont pas atteint une certaine valeur.

La simulation se lance au moyen de la barre d'outils, avec le petit bonhomme qui court (Fig. 9).

8 Visualisation graphique

Pour toutes les visualisations graphiques sous STARCCM+, il faut créer, dans "Scenes", une nouvelle entité soit pour visualiser une géométrie, un maillage, un champ de vitesses ou un champ

scalaire. Il est également possible de visualiser une solution en temps réel, c-à -d, l'évolution de la solution en fonction des itérations. Ces scènes seront affichées sur des "Parts" du domaine de calcul, ou sur des "Derived Parts"(par exemple un plan de coupe, ou une sphère) que l'on peut créer *a posteriori*.

L'évolution d'une variable (bien choisie si possible) nous renseignera sur l'état de convergence du calcul. Dans ce cas, on doit d'abord définir un "Reports", que l'on pourra ensuite transformer en "Monitor" affiché dans la console de résultats, puis en "Plot".

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* »).

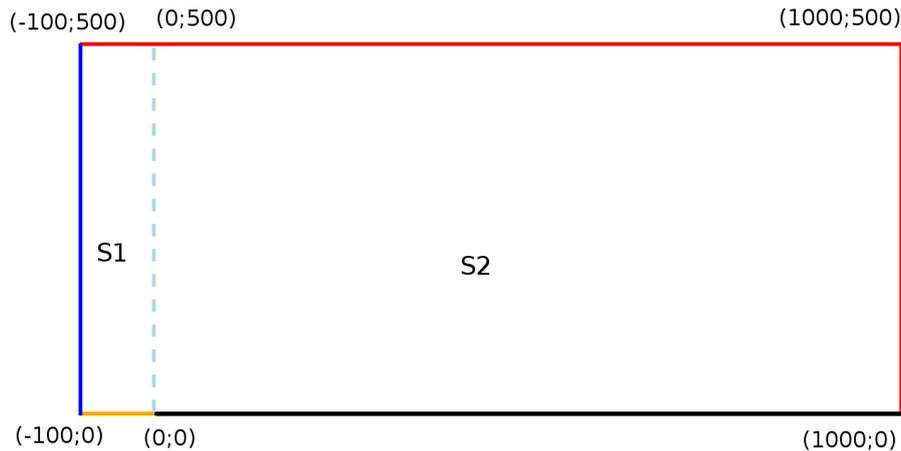


FIGURE 14 – Géométrie du problème. $S1$ et $S2$ sont deux domaines fluides reliés par une interface (en pointillés bleus). La plaque (en noir) se trouve entre les points $(0;0)$ et $(1000;0)$ mm. La partie (jaune) entre les points $(-100;0)$ et $(0;0)$ mm est une condition de symétrie. L'entrée se fait 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".

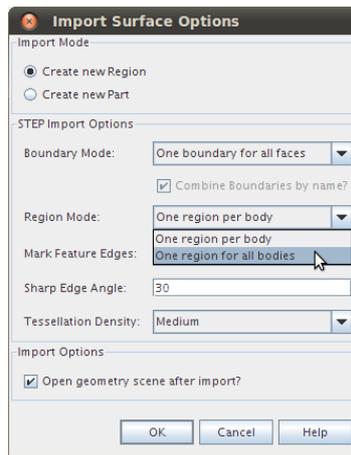


FIGURE 15 – Options d'import de la géométrie.

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.

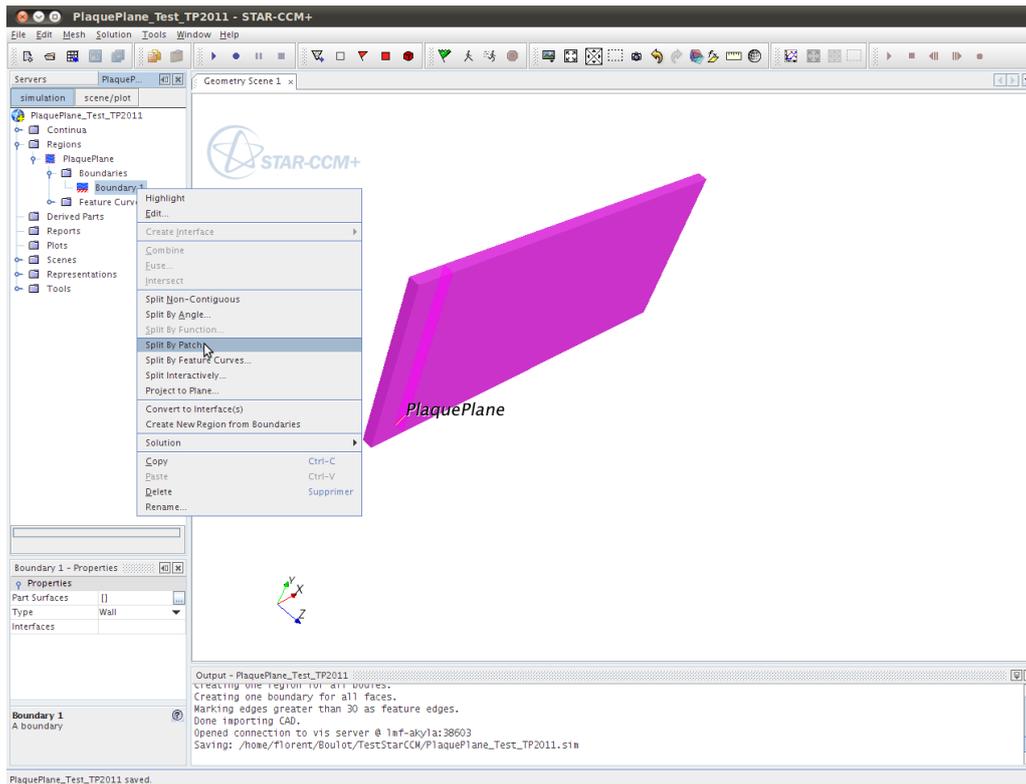


FIGURE 16 – Création des frontières.

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 différents¹⁶. 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* ».

¹⁶. 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*¹⁷ » ⇒ « *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 terminée¹⁸. 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.

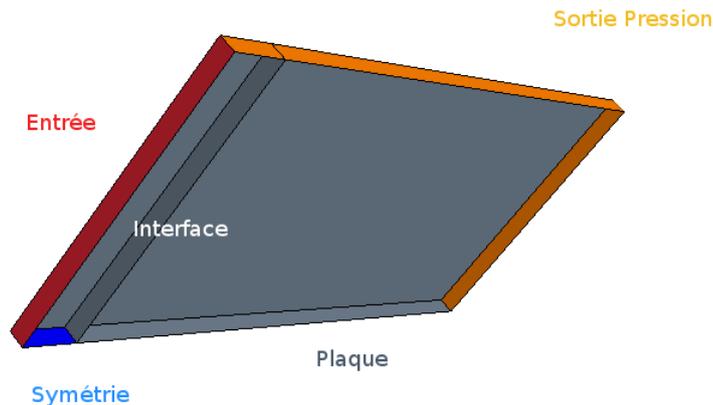


FIGURE 17 – Types des conditions aux limites

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 scalaire¹⁹ calculée par STARCCM+ —le coefficient de transfert de chaleur—, et on le multiplie par le premier élément²⁰ du vecteur²¹ 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 \$\$.

Pour comparer les résultats de la simulation aux valeurs théoriques, on pourra importer le tableau “PlaquePlaneRele5.csv”. Pour ce faire, dans « *Tools* » ⇒ « *Tables* » faire un clic-droit puis choisir « *New Table* » ⇒ « *File* » et importer le fichier csv²². On peut alors dans le même « *Plot* » afficher les valeurs de “MonNusseltLocal” sur la plaque et les valeurs de x et Nu contenues dans la table.

Sur les deux graphes obtenus, est-ce que les courbes sont proches (superposables)? Autrement dit, STARCCM+ parvient-il à retrouver la loi empirique?

Lorsque nous avons réalisé le maillage, nous n’avons pas vérifié le nombre de mailles dans la couche limite (Cf. Fig. 18). Or, c’est une zone où le gradient de vitesse est important. Il est donc important de mailler finement cette zone pour capter ces variations et obtenir un profil de vitesse suffisamment précis. Dans le cadre de ce TP, on souhaite avoir 10 mailles dans la couche limite.

Épaisseur de la couche limite δ

L’épaisseur de la couche limite δ est la distance à laquelle $v_b=0.99*V$. V_b représente la vitesse à la frontière de la couche limite.

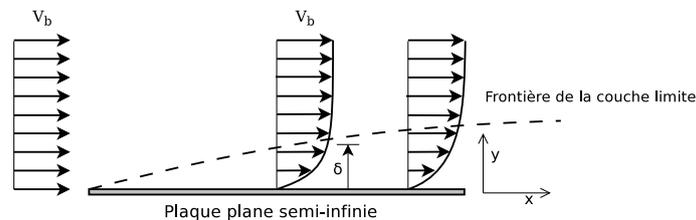


FIGURE 18 – Evolution de la couche limite dynamique sur une plaque plane. V_b est la vitesse dans le “bulk”. δ est l’épaisseur de la couche limite, pour laquelle la vitesse vaut 99% de V_b .

Épaisseur de la couche limite thermique

A la hauteur de la couche limite thermique δ_{th} (Cf. Fig. 19), on doit vérifier la relation suivante :

$$\frac{T_{th} - T_p}{T_\infty - T_p} = 0.99 \quad (21)$$

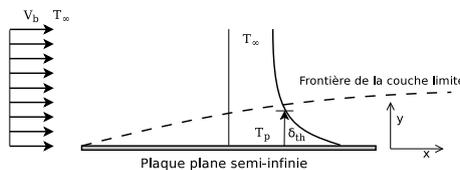


FIGURE 19 – Épaisseur de la couche limite thermique.

6 Obtention d’une meilleure solution, (convergence en maillage)

Déterminer dans STARCCM+ le nombre de mailles dans la couche limite du maillage actuel. Est-ce que le critère de 10 mailles dans la couche limite est respecté?

22. Comma Separated Variables, un format lisible par tous les tableurs, il existe en effet des non-utilisateurs de Microsoft Excel.

Ouvrir à nouveau le fichier du maillage 3D et raffiner-le de manière à avoir 10 mailles minimum dans la couche limite, en modifiant les paramètres du modèle de maillage « Prism Layer Mesher ».

Refaire la simulation et les deux graphes. Les courbes sur les graphes, se superposent-elles mieux ?

Tracer $V_x=f(Y)$.

Tracer $T=f(Y)$.

Déterminer δ_{dyn} et δ_{th} , respectivement l'épaisseur de la couche limite dynamique et l'épaisseur de la couche limite thermique à partir de ces deux courbes. Comparer-les pour une même isosurface (par ex. $x=0.5m$). Quel lien existe-t-il entre ces deux quantités et le nombre de Prandtl ?

Références

- O. Cadot. Introduction à la turbulence, 2009. URL <http://wwwy.ensta.fr/~cadot/CoursdeTurbulence/coursdeturbulence.pdf>.
- CFD-Online. Turbulence modeling, 2012a. URL http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_modeling.
- CFD-Online. Turbulence modeling, 2012b. URL http://www.cfd-online.com/Wiki/Introduction_to_turbulence/Wall_bounded_turbulent_flows.
- H. Schlichting. *Boundary Layer Theory*. Springer-Verlag, 2000. 8th revised and enlarged edition.
- H. Versteeg and W. Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method, 2nd edition*. Pearson Education, 2007.
- A. Zeghib and K. Talbi. Comparaison des différents modèles de turbulence d'un écoulement aérodynamique dans un cyclone. In *Revue des Energies Renouvelables, 2ème Conférence Internationale sur les Sciences de la Mécanique CISM'08, Oum El Bouaghi, 16-18 Novembre 2008*, pages 311–324, 2008. URL www.cder.dz/download/CISM08_28.pdf.