

Formation Ingénieur Spécialité,
filiale « Génie Energétique ».
Introduction à la simulation numérique des écoulements.
Application à un écoulement autour d'un profil portant avec
STARCCM+.

F. Ravelet^a, H. Nouri ¹
^a *Arts et Métiers Sciences et Technologie, LIFSE,*
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France.
contact: florent.ravelet@ensam.eu

2 mars 2022

1. ancien doctorant (2009-2012), à l'origine des chapitres I.1 et I.2

Table des matières

Objectifs	iii
I Généralités sur la CFD	1
1 Introduction	3
1.1 Qu'est-ce que la CFD	3
1.2 Intérêts de la CFD	3
2 Quelques généralités sur la CFD	4
2.1 Equations de la mécanique des fluides	4
2.2 Direct Numerical Simulation (DNS)	4
2.3 Modèles de turbulence de type RANS	5
La moyenne de Reynolds	5
Modélisation de la turbulence, cas du modèle $k - \epsilon$	6
2.4 Méthodes numériques	7
2.5 Récapitulatif	8
3 Etapes de la CFD	9
3.1 Domaine de l'espace	9
3.2 Maillage	9
Composants du maillage	9
Choix du type de maillage	9
Techniques générales de génération du maillage	11
Convergence en maillage	13
3.3 Simulation	13
Choix des équations résolues par le solveur	14
Choix du modèle de turbulence	14
Définition des caractéristiques du fluide	19
Operating conditions	19
Conditions aux limites	20
Choix des critères de convergence	21
Initialisation des calculs	22
Sauvegardes	22
3.4 Post-traitement	22
II Tutoriel sous StarCCM+	23
1 Introduction à StarCCM+	25
1.1 Présentation de l'interface	25

1.2	Préparation des domaines	26
1.3	Maillage	27
1.4	Modèles physiques	28
1.5	Conditions aux limites	28
1.6	Initialisation du calcul	29
1.7	Critère de convergence	29
1.8	Visualisation graphique	29
1.9	Extraction de données quantitatives	30
2	Transfert thermique sur plaque plane en écoulement laminaire	31
2.1	Introduction	31
2.2	Description du problème	31
2.3	Réalisation de la géométrie	31
2.4	Maillage	32
	Choix du modèle de maillage	33
	Paramètres du maillage global	33
	Déclaration des conditions aux limites	33
	Choix du modèle pour la simulation	33
	Lancement de la simulation	35
2.5	Post-traitement	35
2.6	Discussion, travail personnel	37
2.7	Obtention d'une meilleure solution, (convergence en maillage)	37
3	Écoulement autour d'un profil portant	39
3.1	Introduction	39
3.2	Travail à réaliser	41
	Mise en place du domaine et du maillage (voir première vidéo)	41
	Mise en place des modèles physiques et des quantités relevées (voir deuxième vidéo)	42
	Etude paramétrique avec Design Manager Project (voir troisième vidéo)	43
	Bibliographie	44

Objectifs

- 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.

- La première partie (pages 3 à 22) contient des informations d’ordre général. La seconde partie est une introduction succincte au logiciel StarCCM+, avec quelques tutoriels.

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
Généralités sur la CFD

1 Introduction

1.1 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.

1.2 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 n’est jamais à l’abri d’une surprise!).

2 Quelques généralités sur la CFD

2.1 Equations de la mécanique des fluides

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (2.1)$$

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j}. \quad (2.2)$$

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+).

2.2 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 turbulent¹, 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.

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 :

$$\eta = L Re_L^{-3/4}, \quad (2.3)$$

1. On pourra compléter efficacement ses notions de turbulence en consultant Cadot [2013]

L est l'échelle intégrale représentative de la taille des plus grandes structures tourbillonnaires ².

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,

$$\eta N \geq Nh > L. \quad (2.4)$$

Soit encore,

$$N \geq L/\eta = Re_L^{3/4}. \quad (2.5)$$

Passons à présent en 3D, on obtient :

$$N_{3D} = N_{1D}^3 = Re_L^{9/4}. \quad (2.6)$$

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).

2.3 Modèles de turbulence de type RANS

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 :

$$u_i = U_i + u'_i, \quad (2.7)$$

où U_i est la valeur moyenne de la vitesse ⁴ 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. (2.1) et (2.2)) 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 :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2.9)$$

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

3. Voir également quelques vidéos sur <http://florent.ravelet.free.fr/oldpa6.html>

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).

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.

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. (2.2)) 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 :

$$\overline{u'_i u'_j} = -\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.10)$$

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. (2.10) dans l'Eq. (2.9) on obtient :

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j}. \quad (2.11)$$

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 :

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (2.12)$$

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 :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.13)$$

5. qui n'est qu'une hypothèse.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \epsilon \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\epsilon 1} \nu_t \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.16)$$

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 abouti à la fermeture du système.

2.4 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

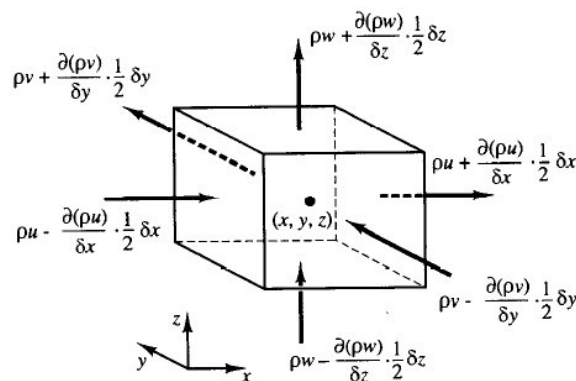


FIGURE 2.1 – Méthode des volumes finis : bilans sur des volumes élémentaires.

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

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 § 3.2, page 9.

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].

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.

2.5 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.

3 Etapes de la CFD

3.1 Domaine de l'espace

Toute simulation CFD commence par la définition d'un ou plusieurs domaine(s) de l'espace occupé(s) par le fluide, et borné(s) par des frontières sur lesquelles des conditions aux limites de différents types seront appliquées.

La réalisation de la géométrie en $2D$ ou $3D$ s'effectue soit avec un logiciel intégré au code de calcul CFD soit à l'aide d'un logiciel de CAO externe. Dans le deuxième cas, la géométrie doit être exportée en un format lisible par le logiciel de maillage. Les formats STEP¹ ou IGES² sont les plus couramment utilisés.

Le découpage des frontières et la définition des frontières communes séparant plusieurs domaines sont guidés d'une part par le besoin d'utiliser différentes conditions aux limites (une entrée, une sortie, un obstacle solide fixe?), et d'autre part par les besoins de post-traitement (mesure de débit à travers le domaine, couple résultant sur les pales d'une éolienne, voire sur chacune des pales), que l'on doit donc anticiper au maximum.

3.2 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* ».

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”.

Choix du type de maillage

On définit les maillages structurés, et non structurés (voir Fig. 3.1).

Maillage structuré (quadrangles, hexahèdres)

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

1. STandardized Exchange of Product

2. Initial Graphics Exchange Specification

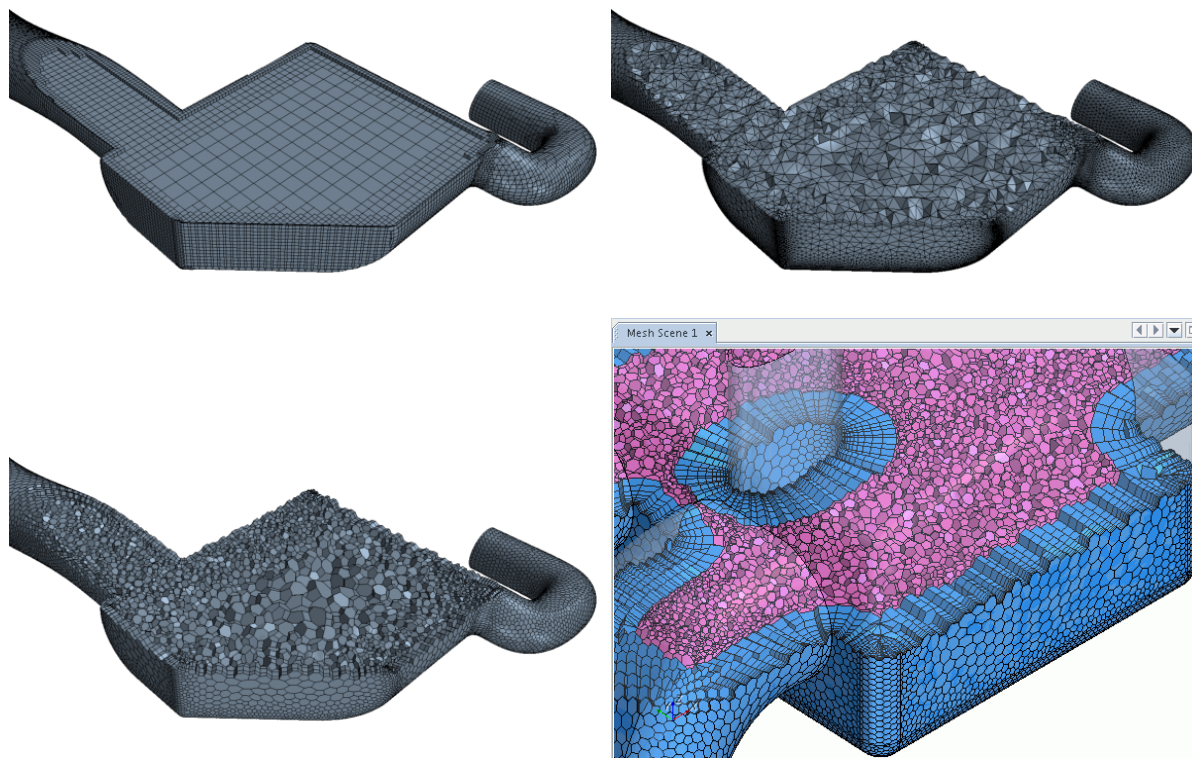


FIGURE 3.1 – Différents types de maillages (structuré par blocs, tétraédrique, polyhédrique et polyhédrique à couches prismatiques extrudées depuis les parois).

à un maillage non structuré équivalent.

- 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 ; on a alors des maillages structurés par blocs, tel celui présenté en haut à gauche de la Fig. 3.1.

Maillage non structuré (triangles, tétraèdres, polyèdres)

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 (triangles, tétraèdres) 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.

Le maillage en polyèdres (voir en bas à gauche de la Fig. 3.1) est réputé réduire ces erreurs

par rapport au maillage tétraédrique.

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. On utilise notamment des maillages dits « à couches prismatiques » en proche paroi, tel celui illustré en bas à droite de la Fig. 3.1.

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

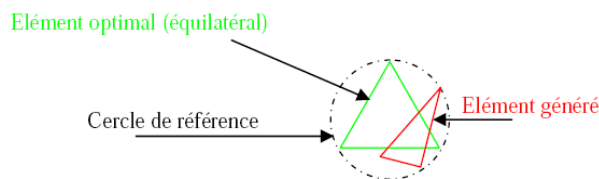


FIGURE 3.2 – Définition de la skewness sur un volume triangulaire.

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. 3.2) :

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

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 3.1 illustre la variation de la qualité des éléments de maillage en fonction de la valeur du coefficient de distorsion F_d :

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

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 3.1 – Qualité associée au facteur de distorsion.

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. 3.3, et les détails donnés en p. 16 pour le choix de cette taille). Enfin, on considère qu'entre deux parois, il faut au minimum une dizaine de mailles.

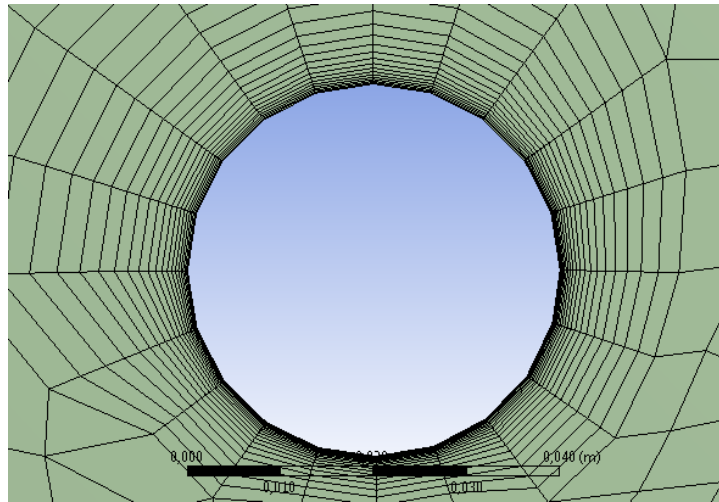


FIGURE 3.3 – Exemple de maillage en proche paroi de type « maillage de couche limite », réalisé avec le mailleur intégré dans ANSYS 13.

Lissage

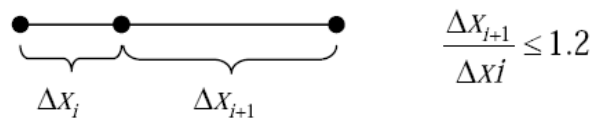


FIGURE 3.4 – Evolution de la taille des éléments.

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. 3.4).

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.

Convergence en maillage

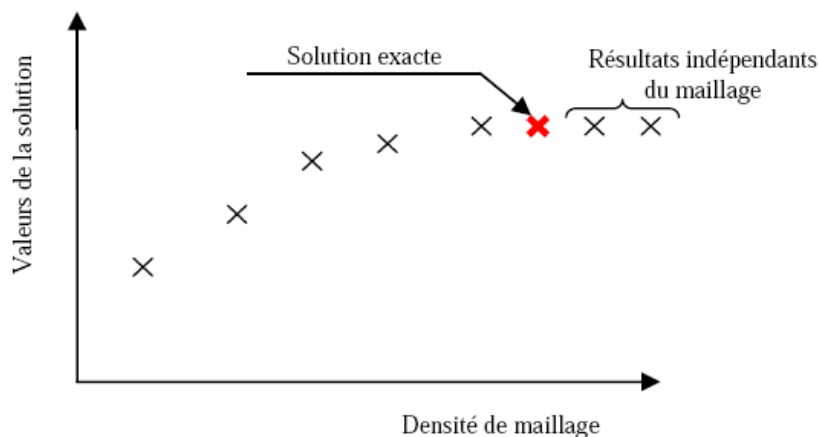


FIGURE 3.5 – Test de convergence en maillage.

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. 3.5).

3.3 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.

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*³ ;
- 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 (eau/vapeur, air/eau, transport de grains) ...

Choix du modèle de turbulence

On pourra commencer par consulter Cadot [2013] 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. 4), 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. 5), 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. 3.2. Un exemple traitant de l'influence du choix du modèle de turbulence sur les résultats peut être consulté dans Zeghib and Talbi [2008].

3. 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 $\Rightarrow c = 340\text{m.s}^{-1}$).

<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 3.2 – Modèles statistiques de turbulence de type RANS.

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 fluide⁴ 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.

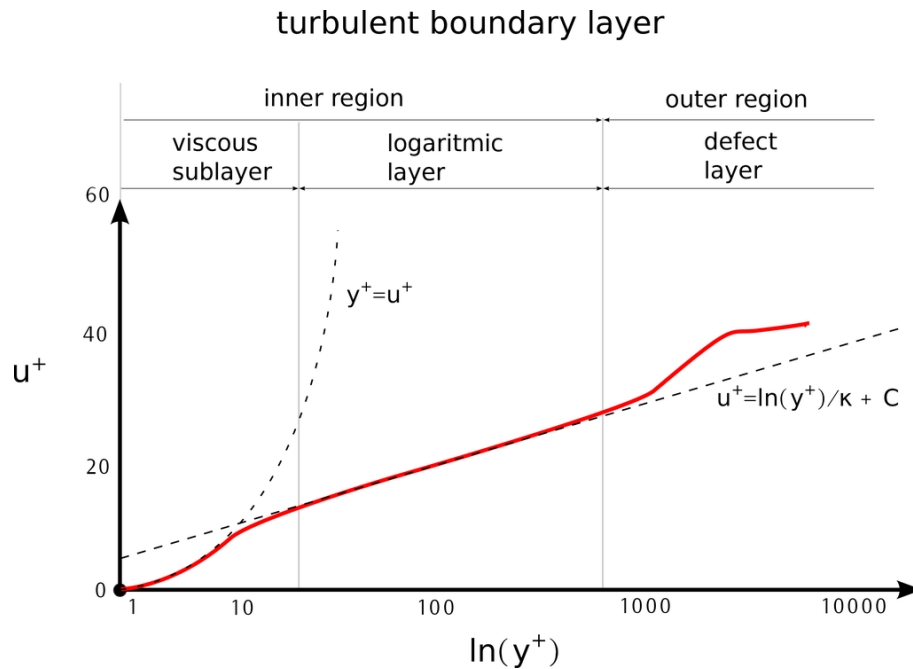


FIGURE 3.6 – Profil de vitesse dans une couche limite turbulente sur plaque plane, en unités de paroi.

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. 2.4 p. 37). La couche limite conditionne directement la résistance de frottement du corps en mouvement dans le fluide.

C'est une zone où les effets visqueux dominant. 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

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

résolue, 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.

Rappelons brièvement la structure d'une couche limite turbulente, illustrée en Fig. 3.6. 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. 3.6.
- 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. 3.6). 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 3.3 – Principales options de traitement des parois pour FLUENT et STARCCM+.

Le tableau 3.3 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^+ .

Définition des caractéristiques du fluide

Les codes disposent de bibliothèques des fluides les plus courants. Attention toutefois à garder à l'esprit que les lois de comportements qui seront simulées sont celles que vous aurez choisies : en choisissant un modèle « incompressible » de fluide à densité constante, la valeur de la pression absolue n'a aucune importance et rien n'interdit des pressions négatives, ou bien d'avoir de l'eau liquide à 1 bar et 300°C.

Il est enfin souvent préférable de régler soit-même les valeurs de masse volumique ρ et viscosité pour faciliter le post-traitement. Par exemple, pour une étude de turbomachine véhiculant un fluide en écoulement incompressible, la quantité d'intérêt n'est pas la différence de pression totale Δp mais bien $\frac{\Delta p}{\rho}$ qui représente l'énergie massique échangée ; il est plus commode d'avoir de l'eau avec $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ que la valeur par défaut $\rho = 997.561 \text{ kg.m}^{-3}$ d'un certain code commercial ou $\rho = 998.2 \text{ kg.m}^{-3}$ pour un autre code commercial. D'ailleurs, sous OPENFOAM —un logiciel libre— les solveurs « incompressibles » ICFOAM, PIMPLEFOAM, PISOFOAM ou SIMPLEFOAM travaillent avec la pression cinématique $\frac{p}{\rho}$.

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, et donc par défaut, bien souvent, une condition de pression imposée correspond à $P_{gauge} = 0$.

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 ?

Conditions aux limites

On dispose d'un certain nombre de conditions utilisables sur les frontières du domaine, 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 :

- Axis : the axis boundary represents the axis of a two-dimensional axisymmetric region.
- Flow split outlet
- Free-stream : to model free-stream compressible flow conditions at a far-field boundary.
- Mass flow inlet
- Pressure outlet (pression statique fixée en sortie).
- Stagnation inlet (pression totale fixée en entrée).
- Symmetry plane
- Velocity inlet
- Wall

On peut imposer une direction ou des angles d'écoulement à travers une entrée, des conditions de type glissement ou adhérence sur une paroi solide,...

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. Toutefois, l'évolution des résidus seule n'est pas une garantie de bonne convergence.

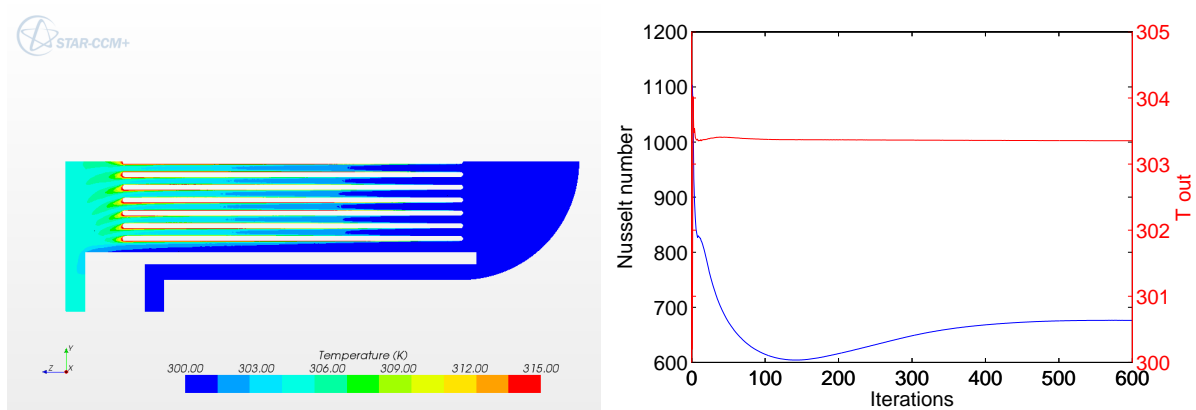


FIGURE 3.7 – Evolution du nombre de Nusselt moyenné sur le cœur (courbe du bas, échelle de gauche) et de la température moyenne en sortie (courbe du haut, échelle de droite).

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 (surfactive 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. 3.7), on peut voir que la température moyenne en sortie converge beaucoup plus rapidement que le nombre de Nusselt sur les éléments chauffants⁵.

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.

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.

3.4 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 logiciels⁶ 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.

5. 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.

6. libres.

Deuxième partie

Tutoriel sous StarCCM+

1 Introduction à StarCCM+

1.1 Présentation de l'interface

Les différentes étapes décrites précédemment donnent une méthode générale à suivre pour une simulation numérique d'un problème de mécanique des fluides. Chaque code de calcul propose différentes possibilités et options. Dans le cadre de ces TP, on va utiliser le code de calcul STARCCM+ qui intègre les fonctionnalités suivantes :

- Importation, modifications, créations de géométries, avec des outils de CAO *paramétriques* ;
- Maillages ;
- Solveurs ;
- Post-traitement ;
- Et possibilité d'automatiser les simulations en vue d'études paramétriques.

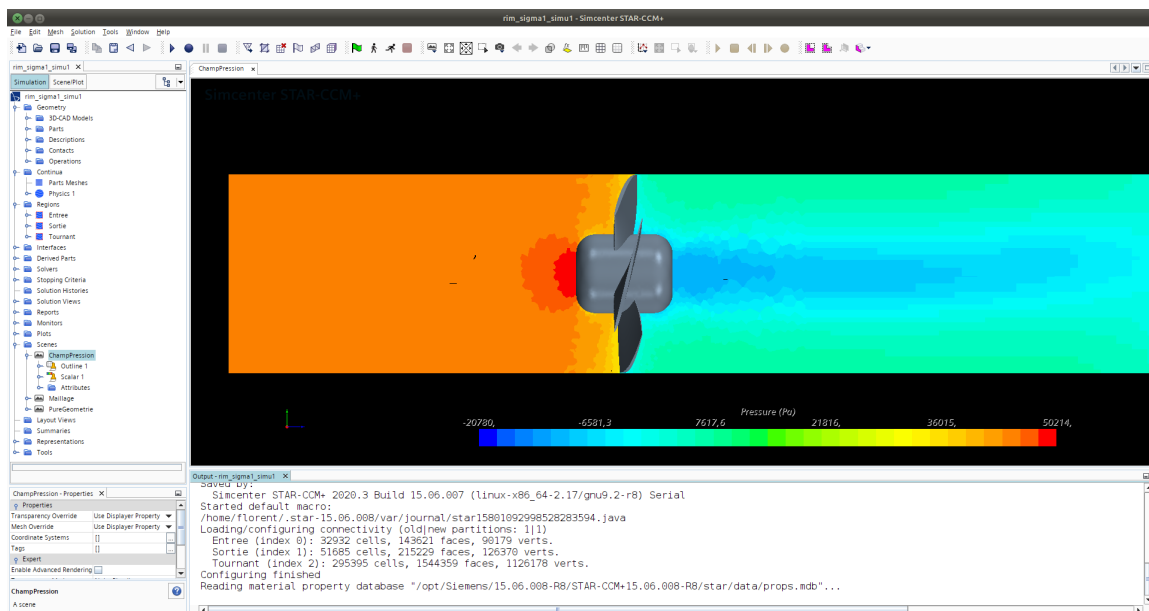


FIGURE 1.1 – Interface de STARCCM+, version 15.06.007.

STARCCM+ possède une interface écrite en Java, illustrée en Fig. 1.1. 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 déroulé les paramètres de la "Scene" affichée ;
- 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 "Scene" « ChampPression » ;
- 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,...

1.2 Préparation des domaines

Les opérations de préparation de la géométrie se déroulent majoritairement dans le menu “Geometry” (voir Fig. 1.2). On importe et travaille sur la géométrie dans un atelier de CAO appelé “3D-CAD”.

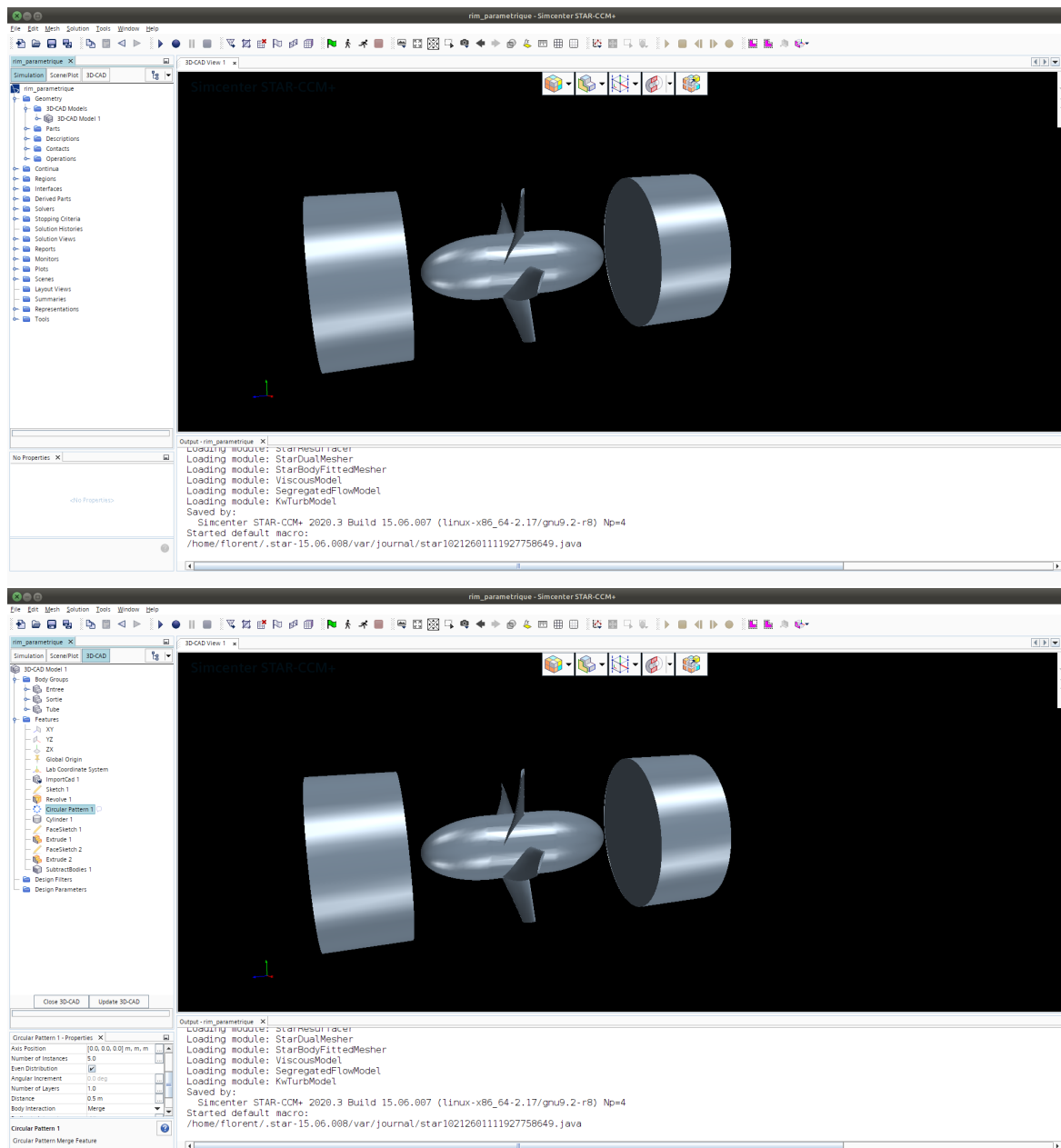


FIGURE 1.2 – Préparation de la géométrie : vue générale de l’arborescence avec le menu “Geometry” déroulé, et vue de l’atelier “3D-CAD” montrant le modèle créé : on a mis en lumière ici l’opération de réplification circulaire appliquée à la pale “ImportCad 1”, avec 5 instances comme on peut le voir dans la fenêtre des propriétés.

Ensuite, à partir de ces entités de type CAO, on définit :

- des entités géométriques (sous “Geometry → Parts”), sur lesquelles on applique les opérations de maillage (sous “Geometry → Operations”).
- puis des domaines fluides (sous “Region”) sur lesquels seront appliquées les équations du modèle définies sous “Continua → Physics”.

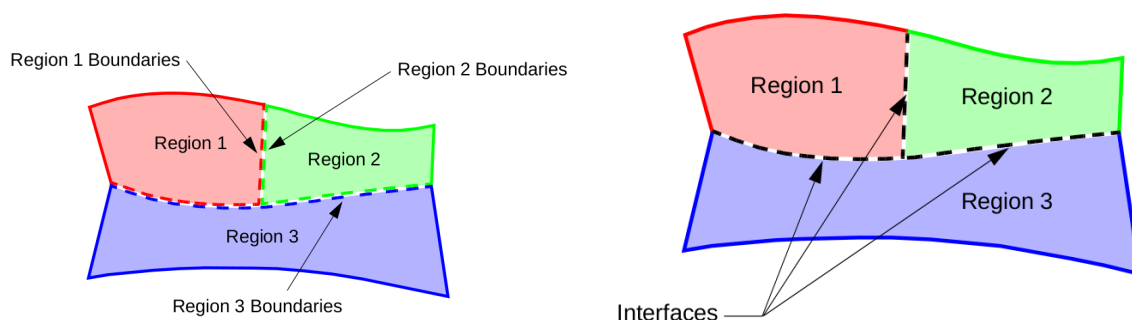


FIGURE 1.3 – Définition des domaines, des frontières et des interfaces.

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*). Il vaut mieux effectuer le découpage des frontières dès la création des domaines. Si deux domaines sont adjacents et partagent une même frontière commune, on crée ce qu’on appelle des *Interfaces* entre ces deux frontières pour relier physiquement les deux domaines (Fig. 1.3). Cette opération de création d’interfaces est automatisable.

1.3 Maillage

On définit les maillages sous “Geometry → Operations”. On peut créer plusieurs maillages, un pour chaque domaine si c’est nécessaire. De plus, STARCCM+ permet d’appliquer des paramètres de maillage différents sur une frontière ou une partie des domaines.

Les opérations sont regroupés en trois types :

- “Surface Preparation”, permettant de réparer une géométrie de mauvaise qualité (contour ou surface ouverts, trous, écart entre deux surfaces...) avant de commencer à la mailler ;
- Opérations booléennes variées ;
- “Mesh”, les modèles de maillage, parmi lesquels on utilise principalement l’“Automated Mesh” et ses sous-modèles :
 - **Surface remesher**, nécessaire pour commencer par mailler finement les surfaces avant d’attaquer le maillage en volume (en effet, à la base on a un maillage de type CAO par patches triangulaires, assez grossier)
 - **Mailleurs volumiques au choix** :
 - *Tetrahedral Mesher* : c’est le plus simple et le plus rapide des trois.
 - *Polyhedral Mesher* : relativement facile à mettre en place et efficace. Il nécessite cinq fois moins de mailles par rapport au cas précédent.
 - *Trimmed Cell Mesher* : permet de réaliser des maillages pseudo-structurés pour des géométries simples ou complexes. Les cellules sont de formes hexahédriques.
 - Une fois choisi un type de maillage volumique, on a alors accès d’autres sous-modèles :
 - *Generalized cylinder* : 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* : permet d'avoir un volume maillé supplémentaire et extrudé à partir de la frontière à laquelle il s'applique.

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. Un exemple de résultat se trouve en Fig. 1.4.

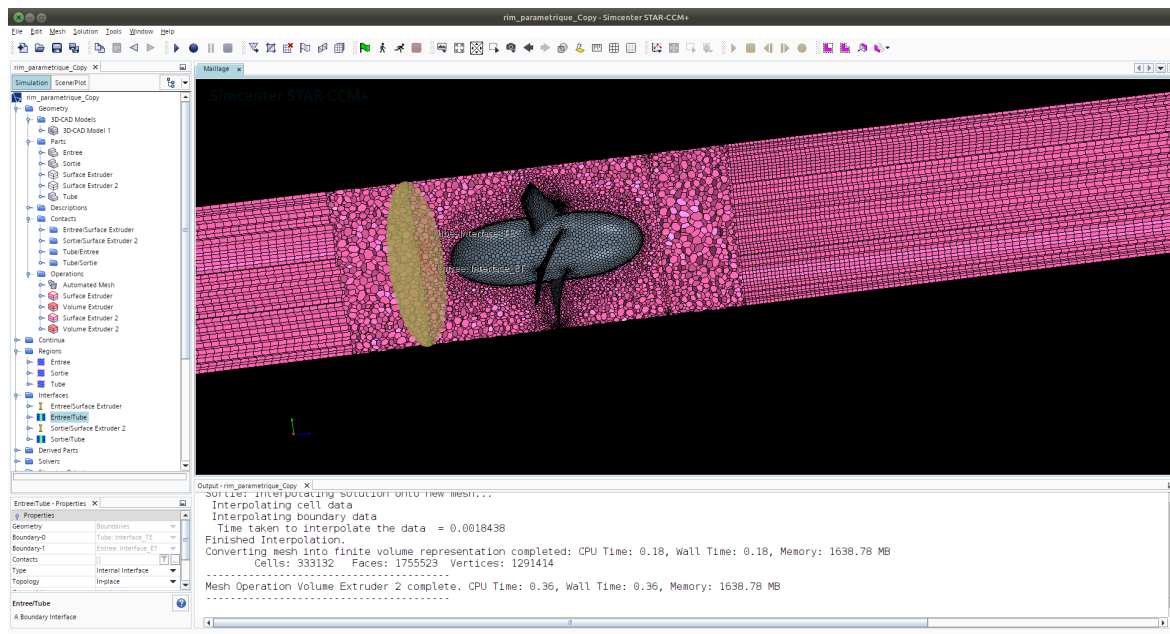


FIGURE 1.4 – Un exemple de résultat obtenu en fin de préparation de la géométrie et du maillage. On remarque ici la présence de trois régions séparées par des interfaces, l'utilisation d'un maillage polyhédrique et de prolongement des domaines en entrée et sortie par des extrusions.

1.4 Modèles physiques

Les paramètres concernant les équations à résoudre sont définis sous “Continua → Physics”. On y définit :

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

La figure 1.5 montre un exemple de choix des modèles.

1.5 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont spécifiées dans “Region” dans le menu déroulant à gauche. Sur la figure 1.5, on peut remarquer en bas du menu déroulant les frontières du domaine « Entree », dont le type est repéré par une icône, et notamment celle nommée sur l'exemple « Surface

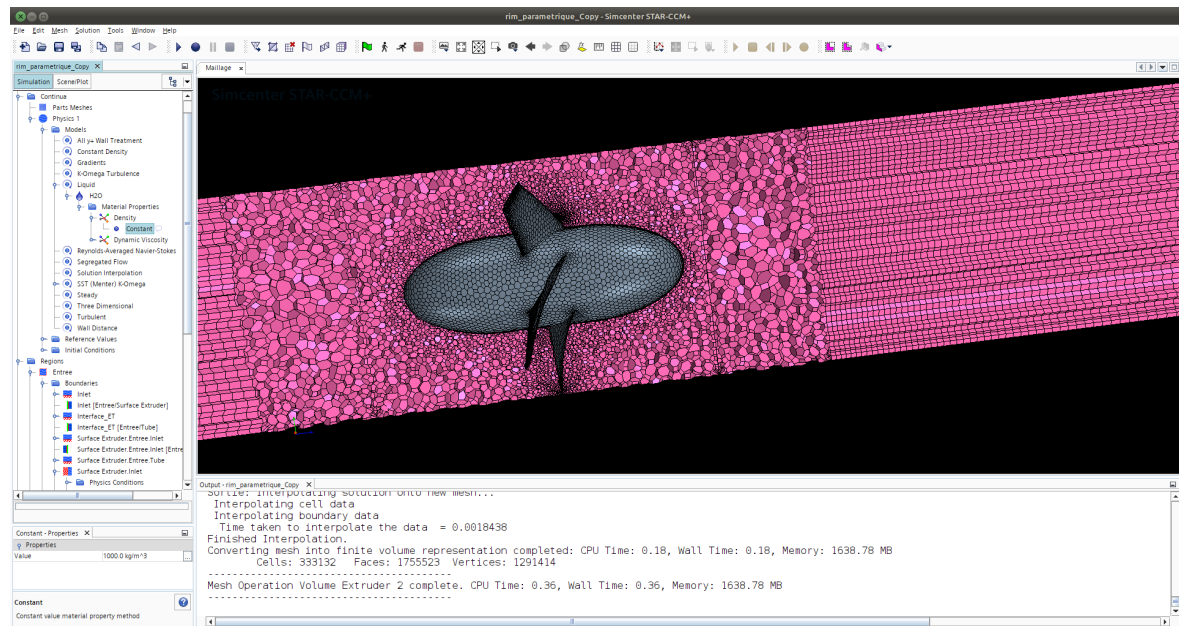


FIGURE 1.5 – Exemples de modèles, avec l’accent mis sur les propriétés physiques du fluide, ici la masse volumique.

Extruder.Inlet », de type “Mass Flow Inlet” en l’occurrence.

1.6 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.

1.7 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 (Ici, sous “Stopping Criteria”). 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. Par défaut, le calcul s’arrête au bout de 1000 itérations.

La simulation se lance au moyen de la barre d’outils, avec le petit bonhomme qui court (Fig. 1.1).

1.8 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*.

1.9 Extraction de données quantitatives

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". On peut également définir ses propres fonctions utilisateur et ses propres paramètres (voir Fig. 1.6).

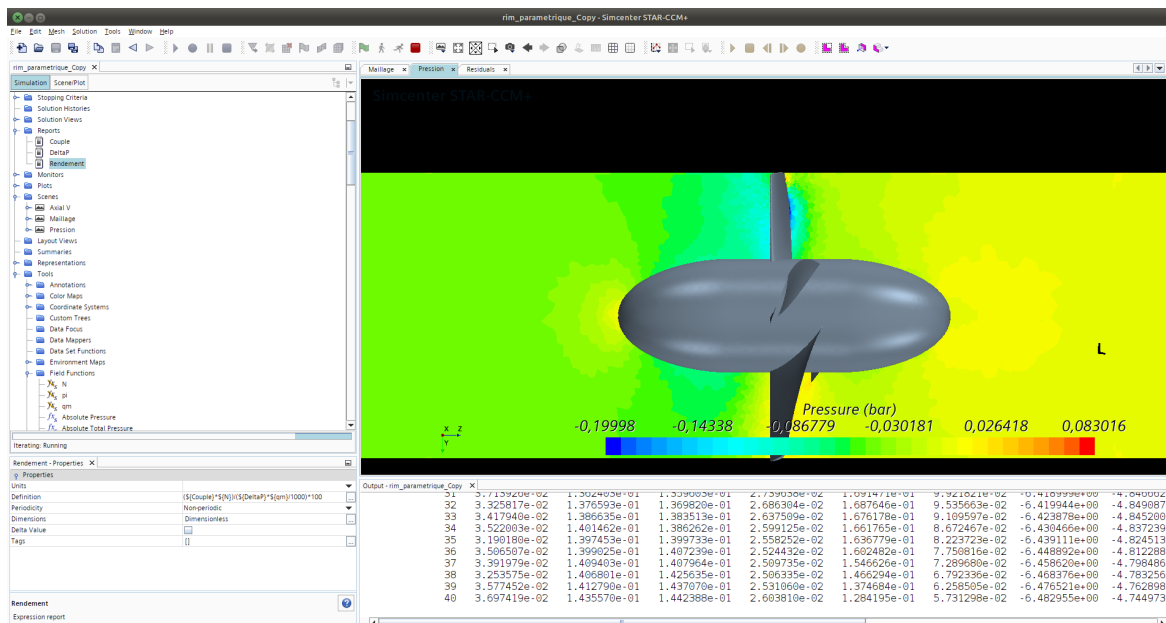


FIGURE 1.6 – Exemples de post-traitement, avec un affichage sur un plan de coupe du champ de pression, et l'accent mis sur la définition du "Report" nommé ici « Rendement », qui fait appel à d'autres "Report" (le couple résultant exercé par le fluide sur les pales et la chute de pression totale entre l'amont et l'aval de cette turbine) et à des fonctions utilisateur définies sous le menu "Tools → Field Functions" (la vitesse angulaire, le débit massique, utilisés comme paramètres dans la simulation).

2 Transfert thermique sur plaque plane en écoulement laminaire

2.1 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...).

2.2 Description du problème

On considère une plaque plane de longueur $L = 1$ m (voir Fig. 2.1). L'écoulement est horizontal et est caractérisé par un nombre de Reynolds bâti sur la longueur de la plaque et une vitesse en dehors de la couche limite V_b de $Re = \frac{\rho V_b L}{\mu} = 10^5$. La température du fluide en entrée est de 300 K, la température de la plaque est maintenue à $T = 400$ K. Le fluide a les propriétés physiques suivantes :

- $\rho = 1 \text{ kg.m}^{-3}$;
- $c_p = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
- $\lambda = 0.02 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
- $\mu = 1 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$.

2.3 Réalisation de la géométrie

Avant de réaliser le maillage, on va dessiner la géométrie dans le module 3D-CAD models. Pour cela :

1. Lancer le logiciel STARCCM+ et créer une nouvelle simulation ;
2. Sauvegarder la session avec le nom que vous souhaitez (penser à sauvegarder régulièrement votre travail en cours) ;
3. Faire dérouler le menu « Geometry » et faire un clic droit sur « 3D-CAD Models » puis « New » ;

Un nouvel onglet, indiquant que l'on est dans l'atelier « 3D-CAD » apparaît. Nous choisissons de créer une géométrie 3D par extrusion. On crée une esquisse dans le plan XY, puis on l'extrude :

1. Faire un clic-droit sur le plan XY et créer une nouvelle esquisse ;
2. Créer un rectangle de hauteur 0.5 m (selon l'axe Y de l'esquisse) et de longueur 1 m (selon l'axe X de l'esquisse) ; en cliquant sur les points dans l'esquisse on peut changer leurs coordonnées ;
3. Après avoir cliqué sur « OK », une nouvelle esquisse s'ajoute à l'arborescence ;
4. Faire un clic-droit dessus et créer une extrusion (garder les valeurs par défaut) ;

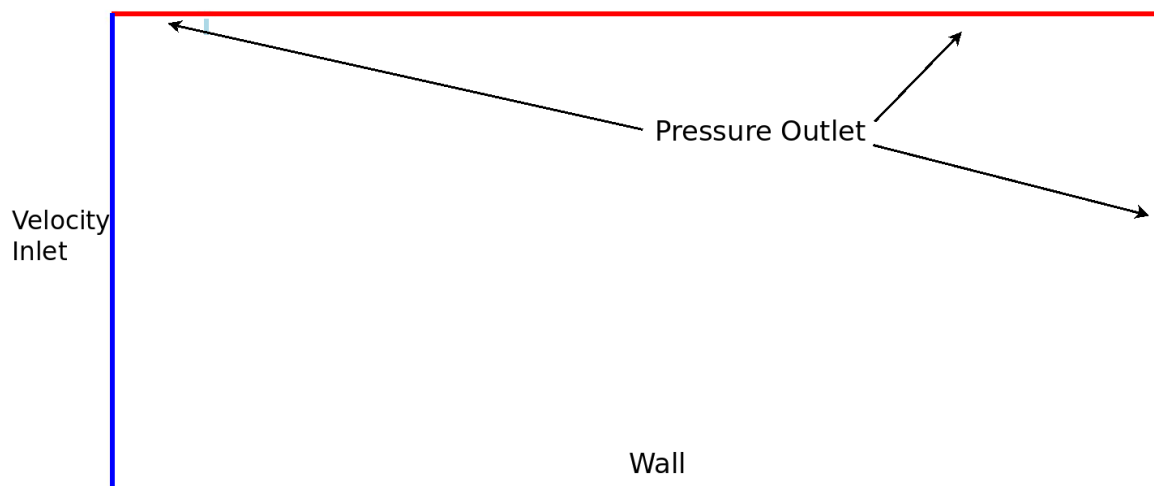


FIGURE 2.1 – Géométrie du problème. La plaque (en noir) se trouve entre les points $(0;0)$ et $(1000;0)$ mm. L'entrée se fait à gauche à travers la frontière (bleue) comprise entre les points $(0;0)$ et $(0;500)$ mm. Le reste (en rouge) est une condition de sortie de type « Pressure Outlet ».

5. Pour finir la géométrie, il est important de nommer chaque surface. Ceci permettra par la suite d'identifier les frontières du domaines et d'appliquer les conditions aux limites. Pour nommer une face, il suffit de faire un clic-droit et de sélectionner « Rename » ;
6. « Close » pour sortir de 3D-CAD.

A présent le modèle 3D est terminé. Avant de pouvoir le mailler, il faut déclarer les différentes régions. Il faut d'abord convertir le modèle crée avec 3D-CAD en pièces géométriques :

1. Sous « Geometry \Rightarrow 3D-CAD \Rightarrow Bodies », sélectionner le corps et faire clic droit, puis « New geometry part » ;
2. Sous « Geometry \Rightarrow Parts » apparaît le nouveaux corps ;
3. pour pouvoir visualiser la géométrie, il faut créer une nouvelle scène de type géométrie ;
4. Sous « Geometry \Rightarrow Parts », sélectionner la pièce et faire un clic-droit, puis « Assign Parts to Region » ;
5. Choisir « One Region per part » et « One boundary per part surface » puis « ok » ;
6. En déroulant le menu « Regions », il est possible de voir les frontières renommées précédemment.

2.4 Maillage

La réalisation du maillage peut donc commencer. STARCCM+ 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 différents¹. Il est donc utile de déclarer le type des conditions aux limites de chaque surface avant même de lancer le maillage.

1. 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.

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.

Choix du modèle de maillage

1. Clic droit sur « Operations \Rightarrow New \Rightarrow Mesh \Rightarrow Badge for 2D Meshing », puis sélectionner la pièce.
2. Clic droit sur « Operations \Rightarrow New \Rightarrow Mesh \Rightarrow Automated Mesh (2D) », puis sélectionner « Quadrilateral Mesher » et « Prism Layer Mesher ».

Paramètres du maillage global

1. Sous « Automated Mesh (2D) », dérouler le menu « Default Controls ».
2. Dans « Base Size », entrer 25 mm. 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.
3. Dans « Minimum Surface Size \Rightarrow Percentage of Base », entrer la valeur de 100%. La valeur absolue s'affiche également. Cela signifie qu'on a choisi des mailles qui ne dépasseront pas la taille de 25 mm dans le maillage.
4. Dans « Number of Prism Layers » entrer la valeur 3.
5. Dans « Prism Layer Total Thickness » choisir une taille relative de 100%.

Déclaration des conditions aux limites

1. Sous « Regions \Rightarrow Body1 \Rightarrow Boundaries » sont répertoriées toutes les conditions aux limites.
2. Cliquer sur chacune des limites et entrer son type (voir Fig. 2.1).

On peut lancer l'opération de maillage : Clic-droit « Automated Mesh \Rightarrow Execute » ou cliquer sur le bouton qui y correspond dans la barre d'outil. Pour afficher le maillage, créer une nouvelle scène de maillage.

Choix du modèle pour la simulation

1. Clic-droit sur « Models » dans « Continua \Rightarrow 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 » (voir Fig. 2.2) ;
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 § 2.2, page 31.
4. Imposer une température $T = 400$ K sur la plaque, et une température d'entrée de 300 K : pour la plaque, il faut changer sous « Physics Conditions » la « Thermal Specification » par défaut adiabatique vers une condition de type température imposée...

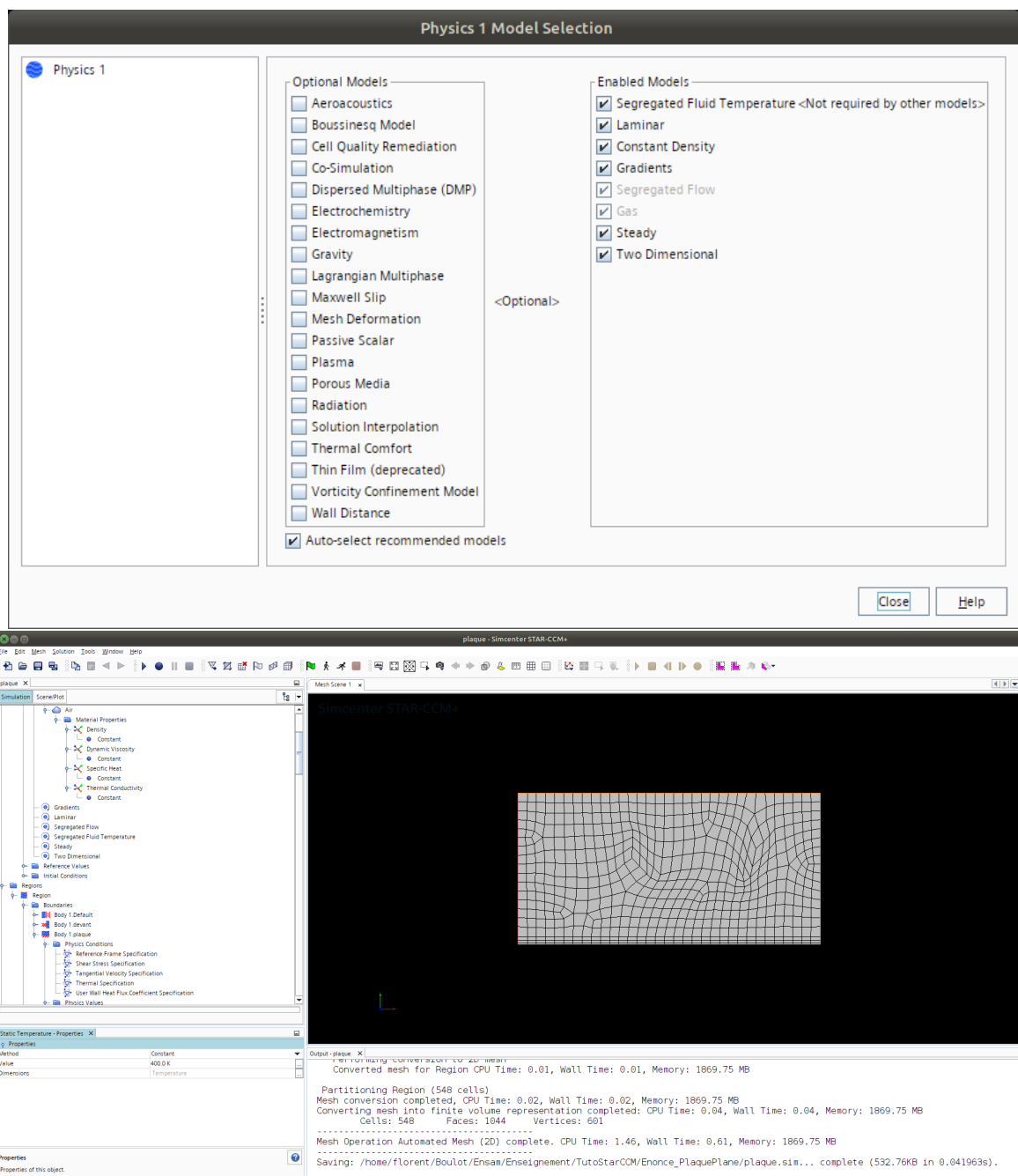


FIGURE 2.2 – Sélection des modèles physiques, et paramétrage des propriétés du fluide et des conditions aux limites

Lancement de la simulation

Nous avons terminé avec le maillage, le 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.

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* \Rightarrow *Scalar* \Rightarrow *scalar field* » choisir la vitesse. Recommencer la même opération pour définir une nouvelle scène pour la température.

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

2.5 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 :

$$C_f = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad (2.1)$$

Ici, le nombre de Reynolds est un nombre de Reynolds local $Re_x = \frac{\rho V_b x}{\mu}$.

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

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho V_b^2} \quad (2.2)$$

avec V_b une vitesse de référence à modifier dans « *Tools* \Rightarrow *Reference Values* » (il faut prendre la valeur à l'infini amont pour être cohérent avec la formule analytique).

Nombre de Nusselt :

1. Loi analytique :

$$Nu = 0.332\sqrt{Re_x}(Pr)^{1/3} \quad (2.3)$$

Avec $Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$, le nombre de Prandtl. Dans notre cas, il vaut 0.5 (à vérifier, bien sûr).

2. Dans STARCCM+, il faut définir une nouvelle « *Tools* \Rightarrow *Field Function* », à appeler, par exemple « *MonNusseltLocal* » (voir Fig. 2.3) :

$$\text{\$HeatTransferCoefficient} * \text{\$\$Centroid}[0]/0.02 \quad (2.4)$$

Ici, on récupère une valeur scalaire² calculée par STARCCM+ —le coefficient de transfert de chaleur—, et on le multiplie par le premier élément³ du vecteur⁴ coordonnées. Par défaut, la température de référence dans la définition du « *\\$HeatTransferCoefficient* » est de 300 K, ce qui est cohérent ici si on n'a pas modifié la température d'entrée.

Pour comparer les résultats de la simulation aux valeurs théoriques, on pourrait préparer et importer un tableau en format csv. Pour ce faire, dans « *Tools* » \Rightarrow « *Tables* » faire un clic-droit puis choisir « *New Table* » \Rightarrow « *File* » et importer le fichier csv⁵. 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. On pourrait également créer des fonctions utilisateur correspondant aux formules analytiques.

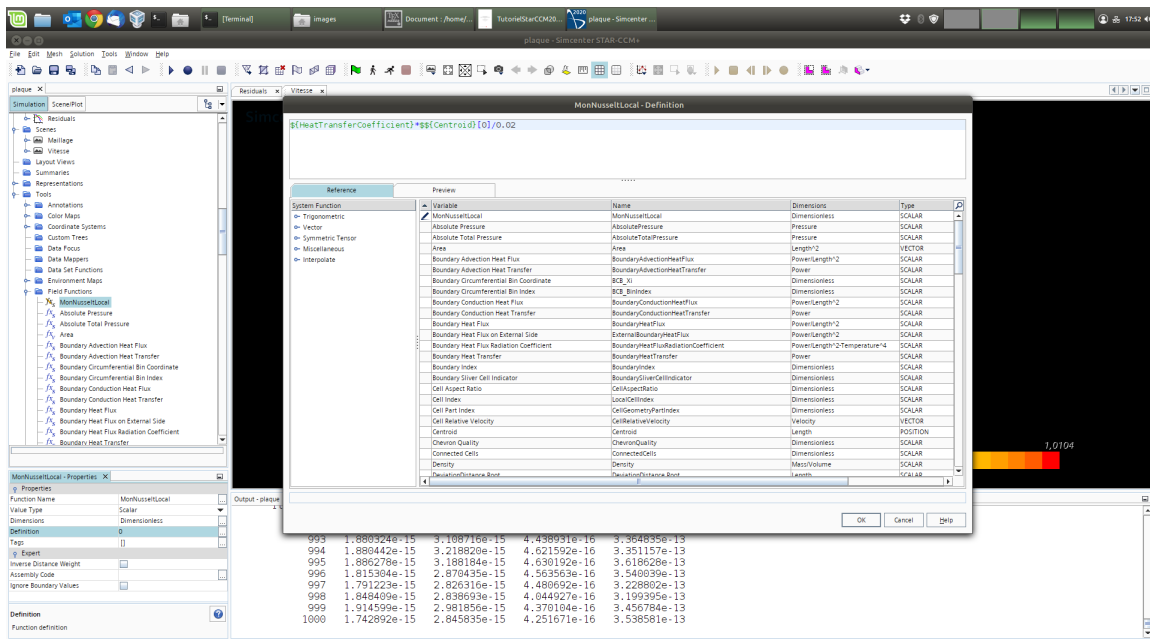


FIGURE 2.3 – Définition d'une fonction utilisateur.

Créer un « *Plot XY* » et afficher l'évolution du nombre de Nusselt local en fonction de la position x le long de la plaque, et comparer à la solution analytique. Faire de même avec le coefficient de frottement pariétal. Pour cela, demander de l'aide ou se référer aux vidéos disponible sur la plateforme SAVOIR.

2. C'est pour cela qu'il y a un \$.
3. D'où le [0], comme dans du C.
4. C'est pour cela qu'il y a deux \$\$.
5. Comma Separated Variables, un format lisible par tous les tableurs, il existe en effet des non-utilisateurs de Microsoft Excel.

2.6 Discussion, travail personnel

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. 2.4). 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 dynamique δ

L'épaisseur de la couche limite δ est la distance à laquelle $v = 0.99V_b$.

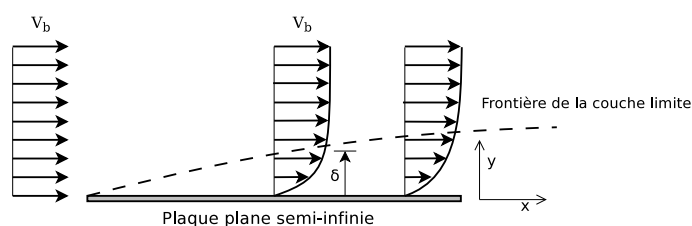


FIGURE 2.4 – Evolution de la couche limite dynamique sur une plaque plane. V_b est la vitesse dans le « bulk ». δ est l'épaisseur de la couche limite, pour laquelle la vitesse vaut 99% de V_b .

Épaisseur de la couche limite thermique

À la hauteur de la couche limite thermique δ_{th} (Cf. Fig. 2.5), on doit vérifier la relation suivante :

$$\frac{T_{th} - T_p}{T_\infty - T_p} = 0.99 \quad (2.5)$$

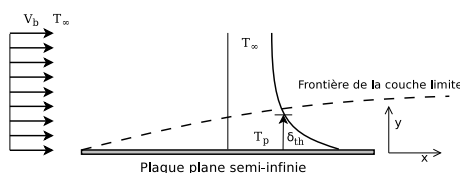


FIGURE 2.5 – Épaisseur de la couche limite thermique.

2.7 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 ?
- 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 (voir Fig. 2.6) ?
- Tracer $V_x = f(y)$ dans le domaine, à une position $x = 0.5$ m.
- Tracer $T = f(y)$ dans le domaine, à une position $x = 0.5$ m.
- 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. $x = 0.5$ m). Quel lien existe-t-il entre ces deux quantités et le nombre de Prandtl ?

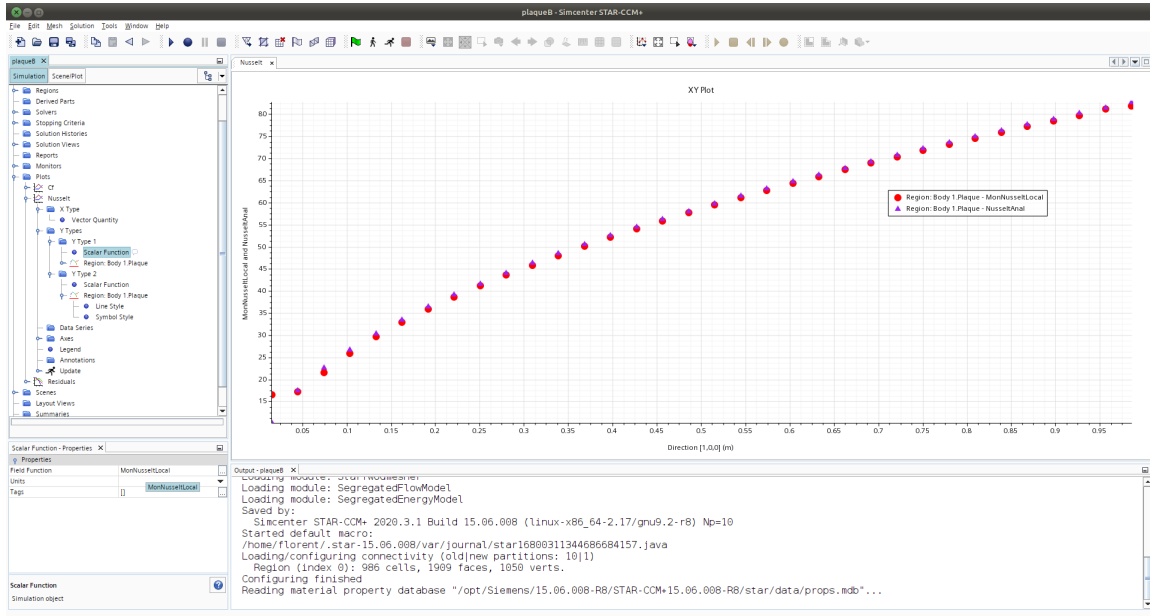


FIGURE 2.6 – *Obtention d'une solution satisfaisante.*

3 Écoulement autour d'un profil portant

3.1 Introduction

L'objectif de ce TP est de simuler l'écoulement autour d'un profil SG6042. Ce profil utilisé dans l'énergie éolienne constitue un cas de calcul intéressant puisqu'on dispose à son sujet de données expérimentales qui vont permettre de valider les simulations effectuées. Cette démarche de validation est fondamentale pour s'assurer que notre méthodologie de simulation est satisfaisante, pour en cerner les faiblesses et pour ensuite pouvoir effectuer des calculs prédictifs pour des profils moins bien documentés.

Vous pouvez consulter l'article de Leloudas et al. [2020] où un profil différent est étudié avec une démarche similaire. La géométrie de nombreux profils est disponible sur <http://airfoiltools.com/>. Un fichier de points au format CSV (« sg6042.csv ») contenant la géométrie du profil, les polaires au format PNG et trois vidéos sont disponibles sur la plateforme SAVOIR.

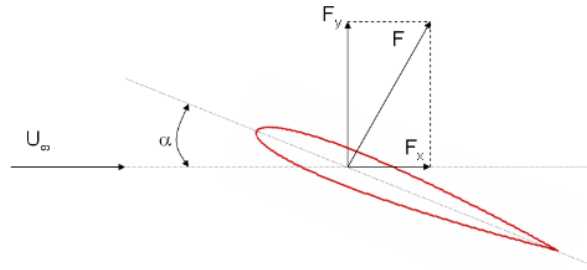


FIGURE 3.1 – Efforts aérodynamiques sur un profil portant.

Il s'agit donc de reproduire, par une simulation, l'écoulement autour d'un profil d'allongement infini (nous travaillerons donc en deux dimensions d'espace) que l'on place dans la veine d'essai d'une soufflerie comme on l'a représenté sur la figure 3.1. Sur cette figure, α est l'angle d'attaque du profil et U_∞ est la vitesse du vent à l'infini amont. Les efforts aérodynamiques exercés sur le profil permettent de définir les coefficients de trainée et de portance :

- Coefficient de trainée (“drag”) : $C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S_{ref}}$
- Coefficient de portance (“lift”) : $C_l = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S_{ref}}$

Ici, la surface de référence S_{ref} sera la surface projetée d'une aile d'allongement unitaire, c'est-à-dire la corde du profil. On note ρ la masse volumique du fluide.

On dispose de la polaire du SG6042 pour un nombre de Reynolds $Re = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} = 2 \times 10^5$ et lorsque l'écoulement est incompressible. L est la corde du profil et μ désigne la viscosité dynamique. Cette polaire est représentée sur la figure 3.2. On peut y observer aux faibles incidences la dépendance linéaire du coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence ainsi que le décrochage du profil pour une incidence d'environ 14 degrés.

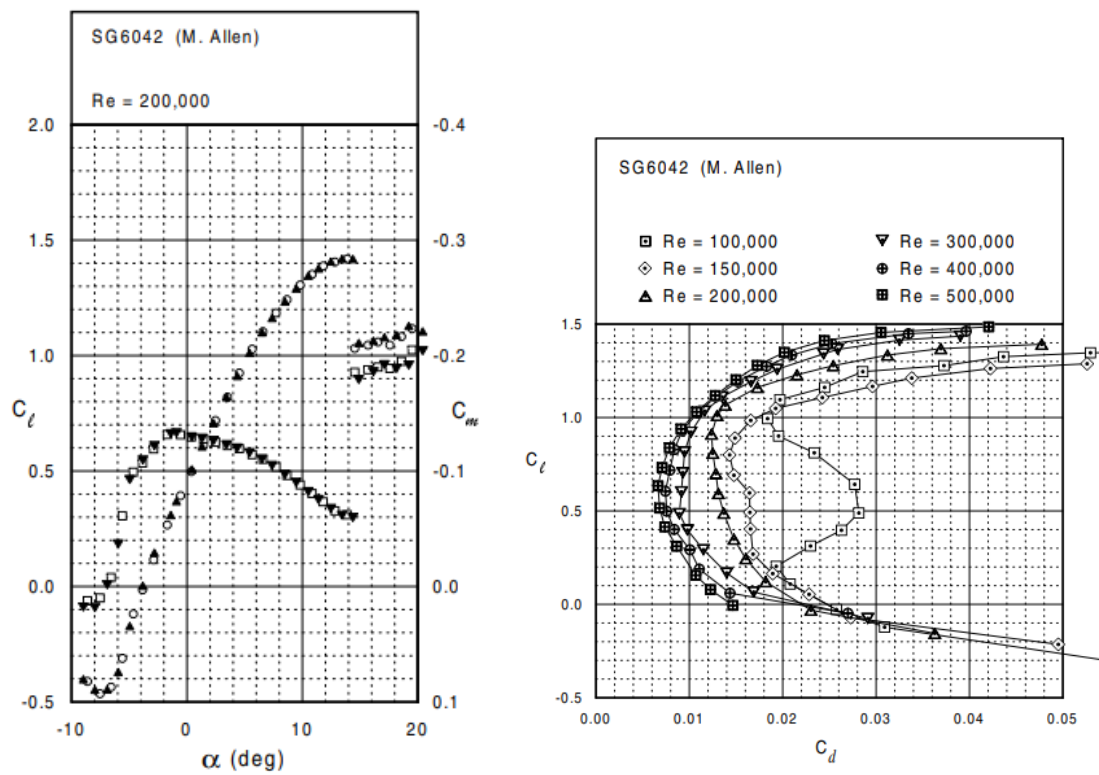


FIGURE 3.2 – Coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque d'un profil SG6042 et polaire de Eiffel (C_l vs. C_d), à $Re = 2 \times 10^5$.

3.2 Travail à réaliser

On utilisera pour les propriétés du fluide les valeurs suivantes :

— $\rho = 1.2 \text{ kg.m}^{-3}$;

— $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$.

La corde étant de $L = 1 \text{ m}$, calculer la vitesse U_∞ correspondant à $Re = 2 \times 10^5$.

Mise en place du domaine et du maillage (voir première vidéo)

- Importer la géométrie du profil, définir un paramètre d'angle d'attaque qui permettra ensuite d'automatiser les calculs, construire un domaine fluide autour du profil (voir Fig. 3.3), définir les conditions aux limites ;
- Construire un maillage autour du profil SG6042, avec un raffinement sur le profil et avec un raffinement local dans le sillage (voir Fig. 3.4) ;
- Bien choisir la taille de la première maille près du profil ;
- Préciser toutes les caractéristiques de ce maillage.

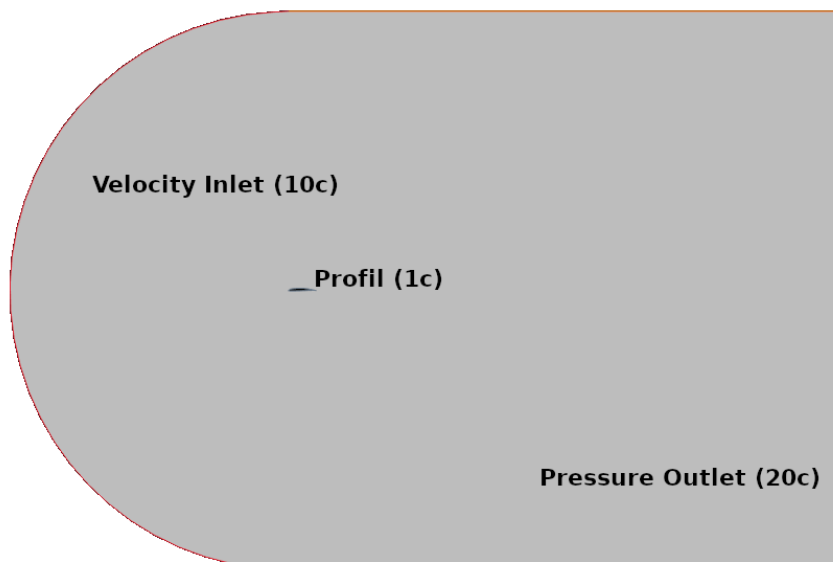


FIGURE 3.3 – Domaine fluide utilisé et conditions aux limites. Le profil est centré sur le point 0,0 et a une corde $L = 1 \text{ m}$. En amont, on trouve un demi-cercle de rayon $10L$ sur lequel on applique une condition de vitesse imposée. Sur les autres frontières, on applique une condition de pression statique imposée. L'aval du domaine se situe à $20L$.

Épaisseur de la première maille Pour calculer l'épaisseur de la première maille, on se base sur des résultats connus concernant le comportement d'une couche limite turbulente sur une plaque plane à laquelle on assimilera notre profil aérodynamique. Les détails de cette étude dépassent le cadre de ce document, aussi ne donnera-t-on que les résultats permettant d'évaluer cette taille de maille.

On introduit une distance adimensionnée $y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$ où y est l'ordonnée de la première maille : c'est cette dimension que nous cherchons à connaître. On note $\nu = \mu/\rho$ la viscosité cinématique du fluide. La quantité $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ est la vitesse de frottement : pour l'évaluer on doit connaître la contrainte de frottement pariétal τ_w . A cette fin on utilisera l'expression approchée suivante

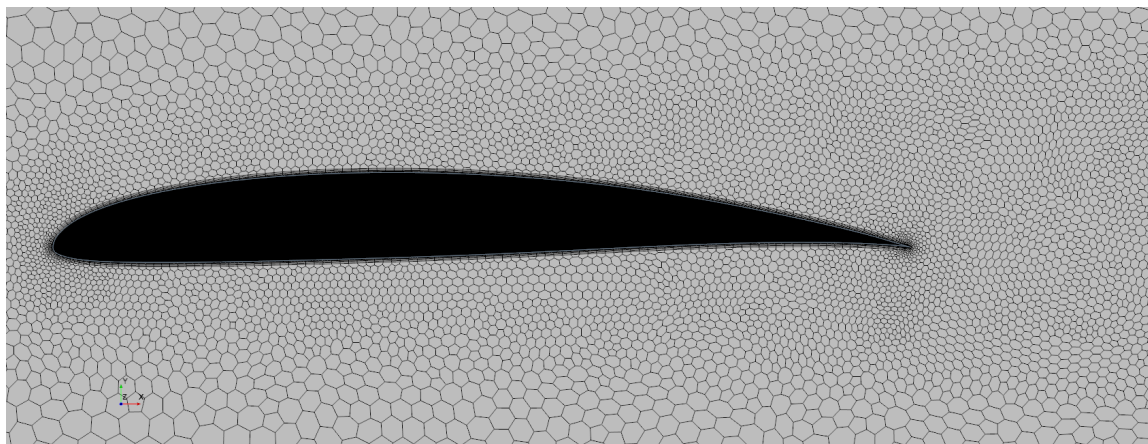


FIGURE 3.4 – Allure du maillage à obtenir et détail proche du profil.

du coefficient de frottement pariétal C_f :

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \simeq 0.0244Re^{-1/7}$$

Ici, $Re = 2 \times 10^5$ est le nombre de Reynolds basé sur la vitesse infinie amont et la longueur du profil. Prendre une cible pour y^+ de l'ordre de $y^+ \simeq 3$. C'est avec cette valeur que l'on choisira la taille de la première maille de couche limite.

Mise en place des modèles physiques et des quantités relevées (voir deuxième vidéo)

Les contraintes suivantes sont imposées :

- **Écoulement stationnaire** ;
- **Écoulement incompressible** ;
- **Nombre de Reynolds** basé sur la corde et la vitesse infinie amont égal à $Re = 2 \times 10^5$;
- **Modélisation de la turbulence de type RANS**. Le modèle exact parmi *Spalart-Allmaras*, $k - \epsilon$, $k - \omega$ est à votre discrétion. Ces différents modèles comportent de nombreuses variantes ($k - \epsilon$ standard ou Realizable, ...). Vous avez le droit d'en tester plusieurs.

- Mettre en place les modèles et les conditions aux limites ;
- Mettre en place un relevé des coefficients de portance et trainée, ainsi que des visualisations du champ de pression et du champ de vitesse et enfin un tracé des y^+ le long du profil ;
- Calculer la solution pour différents cas et proposer une analyse critique des résultats obtenus pour chacune des incidences retenues ;
- Les possibilités de visualisation sont nombreuses, on peut par exemple tracer les valeurs du coefficient de frottement pariétal afin de détecter un éventuel décollement, on peut visualiser des lignes de courant, etc...
- Ne pas oublier l'un des objectifs du TP qui est de comparer les solutions aux mesures expérimentales de la figure. 3.2!

Etude paramétrique avec Design Manager Project (voir troisième vidéo)

Une fois que tout est validé, il est possible de tirer parti de la déclaration de l'angle du profil comme paramètre, en automatisant une série de calculs pour une gamme d'angles d'attaque, et l'export des résultats de chacun. Vous pouvez numériser les données des polaires en utilisant par exemple <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/> ou <http://markummitcheil.github.io/engage-digitizer/>. Un exemple de résultat obtenu avec un modèle $k-\omega SST$ et un maillage à 311×10^3 cellules est représenté en Fig. 3.5.

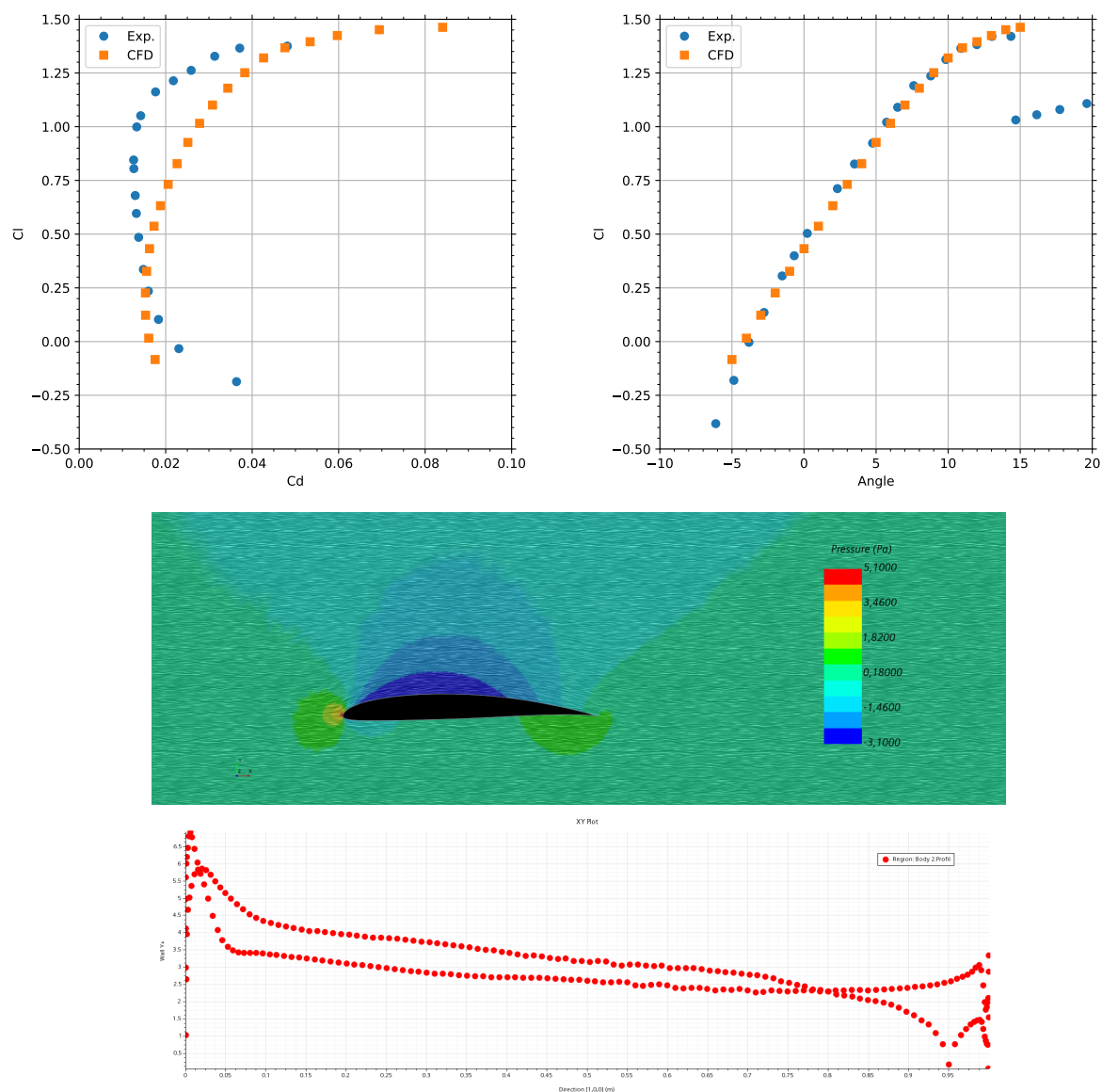


FIGURE 3.5 – Solutions obtenues. On remarque une surestimation de la traînée par la simulation, la portance étant correctement reproduite.

Bibliographie

- Olivier Cadot. Introduction à la turbulence, cours de l'ENSTA-ParisTech 2A. Lecture, January 2013. URL <https://hal-ensta-paris.archives-ouvertes.fr//cel-01228137>.
- 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.
- S. N. Leloudas, A. I. Eskantar, G. N. Lygidakis, and I. K. Nikolos. Low reynolds airfoil family for small horizontal axis wind turbines based on rg15 airfoil. *SN Appl. Sci.*, 2, 2020. URL <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2161-1>.
- 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.