

MASTER 1 MÉCANIQUE UPEC - UGE

TP3 - SIMULATION NUMÉRIQUE EN MÉCANIQUE DES FLUIDES

Écoulement fluide et transfert de chaleur dans un mélangeur coudé

Auteur :
LIBAT Louis

Date : 1 décembre 2022

Table des matières

Table des figures	i
1 Introduction	1
2 Modélisation	1
3 Résolution du problème	1
3.1 Géométrie	2
3.2 Maillage	2
3.3 Résolution sous Fluent	3
4 Analyse des résultats	4
4.1 Visualisation des champs	4
4.2 Convergence en maillage	5
4.3 Essai avec un autre diamètre d'injecteur	5
4.4 Maillage adaptatif	6
4.5 Essai avec différentes vitesses	8
4.6 Coupe vertical et horizontal	9
4.7 Profil sur ligne fictive	11
4.8 Essai avec différents modèles	12
5 Conclusion	14
Références	14

Table des figures

1	Dimensionnement	1
2	Géométrie	2
3	Maillage 1	2
4	Maillage 2	2
5	Configuration de Fluent	3
6	Résidus	3
7	Résultats	4
8	Profil de température selon la position	4
9	Température max en fonction de la taille du maillage	5
10	Champ de température des deux injecteurs	6

11	Champ de vitesse des deux injecteurs	6
12	Résultats - Maillage adaptatif	7
13	Profil de température selon la position	7
14	Résultats Température - Essai vitesses	8
15	Résultats Vitesse - Essai vitesses	9
16	Coupe transversal et profil de vitesse et température	10
17	Profil de vitesse et température sur ligne fictive au centre	11
18	Modèle k-w SST	12
19	Modèle 4 équations	13

1 Introduction

Le problème posé dans ce TP est celui d'un écoulement turbulent 3D de fluide et de transfert de chaleur dans un mélangeur coudé. Ce type de mélangeur se retrouve dans les systèmes de tuyauteries de centrales électriques et d'industrie.

Le but de ce projet est de prédire le champ de température dans la zone d'écoulement en fonction de la taille de la jonction afin de dimensionner l'installation.

Ce TP a pour but d'étudier les écoulements de matières et transfert de chaleur mais aussi de travailler sur des maillages dit adaptatifs prenant en compte les forts gradients de températures. Quelques hypothèses sont mises en place :

- Écoulement tri-dimensionnel (3D)
- Modèle d'écoulement turbulent
- $Re=50800$

2 Modélisation

On considère donc un mélangeur composé de deux tuyaux comme représenté ci-dessous. Un fluide froid à $T_f=20^\circ\text{C}$ s'écoule avec une vitesse de 0.4 m/s dans le tuyau le plus large puis se mélange avec un deuxième fluide à $T_c=40^\circ\text{C}$ d'une vitesse de 1.2 m/s via une petite entrée. L'entrée se fait au niveau du coude.

Les longueurs sont indiquées sur la figure et permettront de construire la géométrie via le logiciel Design Modeler.

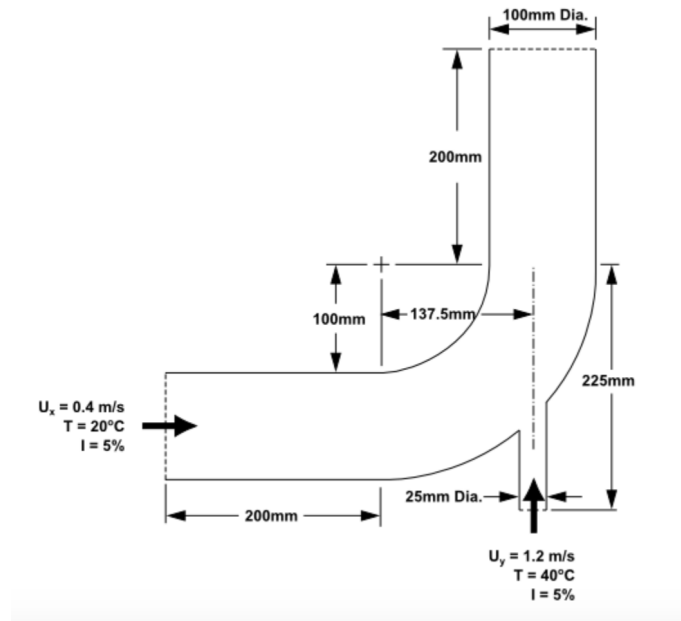


FIGURE 1 – Dimensionnement

3 Résolution du problème

La résolution du problème se fait grâce au solveur Fluent. Après avoir construit la géométrie via l'outil Design Modeler, le maillage est généré via l'outil Meshing. Le problème est ensuite résolu via le solveur Fluent.

3.1 Géométrie

La géométrie du problème a été présentée ci-dessus. Grâce à des éléments géométriques élémentaires tels qu'un tore puis à des opérations (extrusion, ...), on peut construire la géométrie.

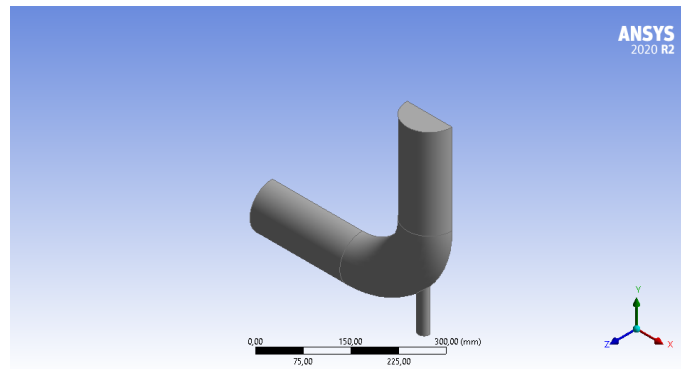


FIGURE 2 – Géométrie

3.2 Maillage

Le premier maillage mis en place est un maillage généré automatiquement via le mailleur avec une taille des éléments de $6e-3m$. On rajoute un élément inflation permettant de raffiner le maillage. Au final le maillage présente :

- 67662 noeuds
- 173395 éléments

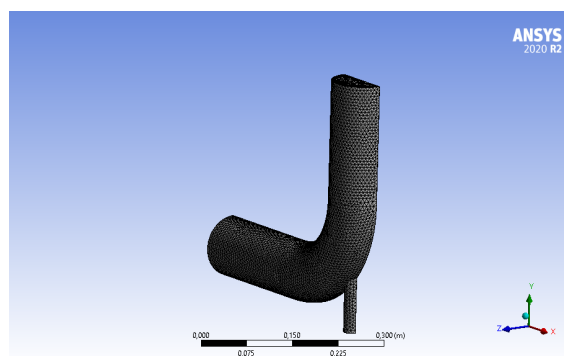


FIGURE 3 – Maillage 1

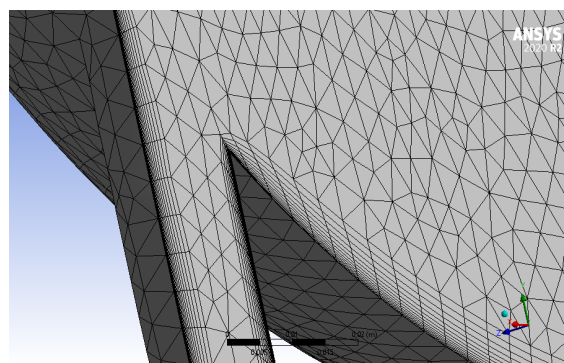


FIGURE 4 – Maillage 2

3.3 Résolution sous Fluent

Grâce au solveur Fluent, on définit la physique mise en jeu, les conditions limites, les valeurs de références. On lance la simulation et on laisse itérer jusqu'à ce que les résidus atteignent la précision machine. On visualise ensuite les champs des grandeurs.

On utilise un modèle $k-\epsilon$ standard. C'est un modèle largement utilisé en CFD. C'est un modèle comprenant 2 équations supplémentaires permettant de représenter les propriétés turbulentes de l'écoulement (énergie cinétique turbulente, dissipation turbulente).

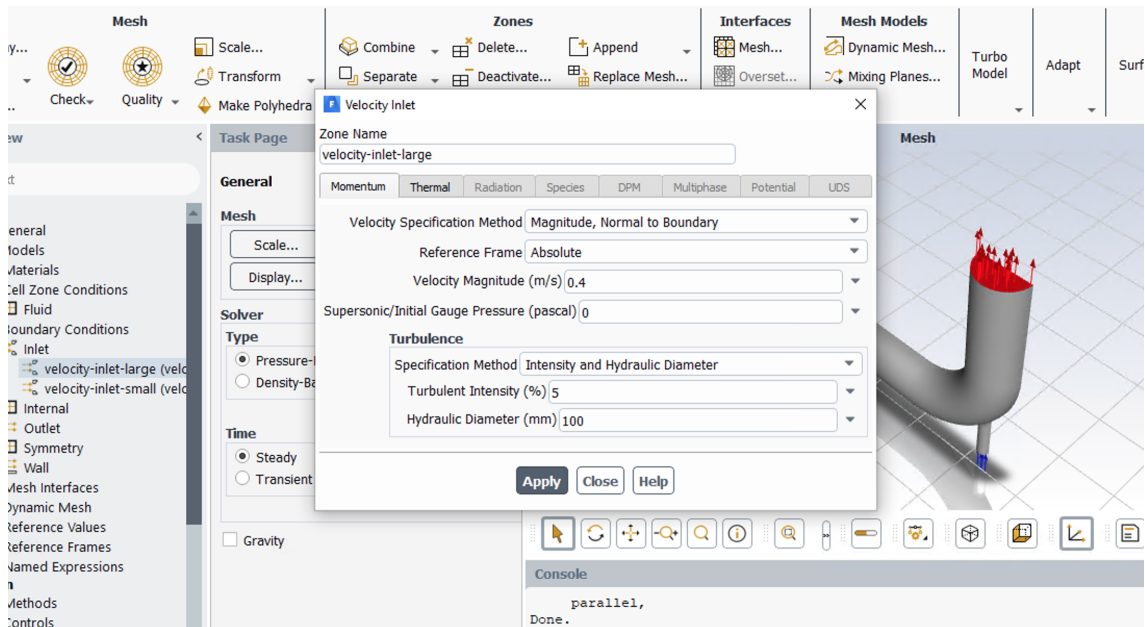


FIGURE 5 – Configuration de Fluent

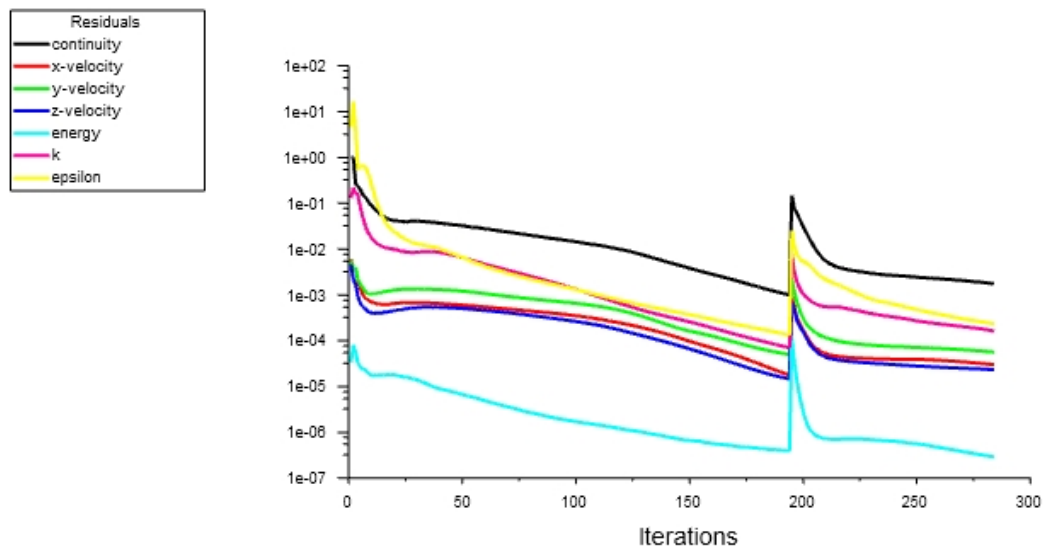


FIGURE 6 – Résidus

Le pic de résidu situé à l'itération 200 est lié à l'ajout de 90 itérations supplémentaires pour le maillage adaptatif.

4 Analyse des résultats

La première simulation avec un maillage non adapté fournit les résultats suivants.

4.1 Visualisation des champs

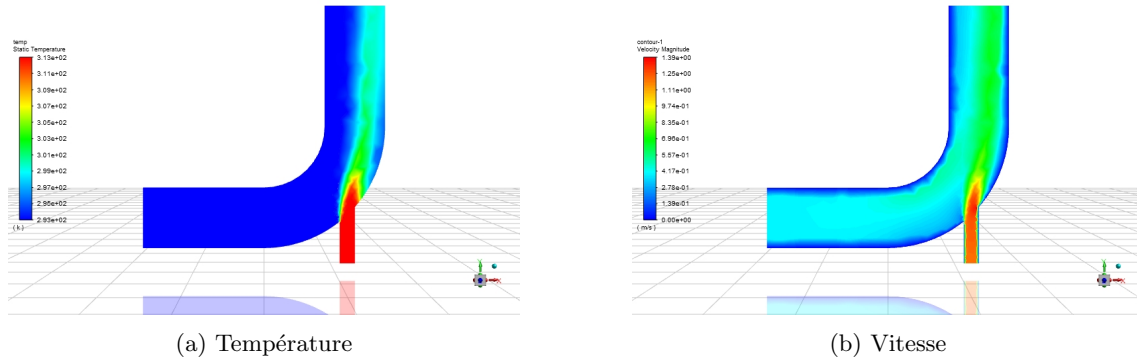


FIGURE 7 – Résultats

La simulation rend bien compte de la réalité. En effet, concernant la température, le fluide froid reste à sa température avant de rencontrer le fluide injecté. Lors de l'injection, les fluides se mélangent et la température varie. Le coude présente une zone de fort gradient de température. Concernant le champ de vitesse, il est nul sur la paroi, du fait de la condition d'adhérence et est maximale en milieu de la conduite. Au niveau de l'injecteur, la vitesse du fluide augmente fortement. Cette zone présente aussi un fort gradient de vitesse. Du fait de la forme du coude et du positionnement de l'injecteur, la vitesse avant l'injecteur diminue légèrement sur la partie inférieure de la conduite mais augmente légèrement sur la partie supérieure. La vitesse après le coude se stabilise dans la conduite.

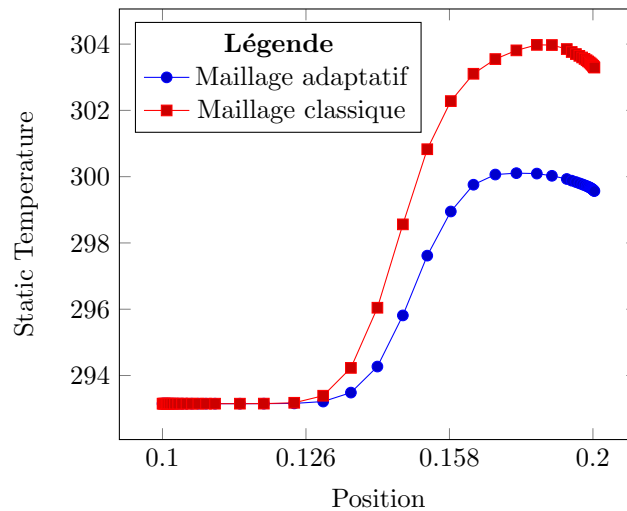


FIGURE 8 – Profil de température selon la position

On constate que au niveau de l'injecteur, la température augmente fortement. Le gradient de température est fort. Il est nécessaire de raffiner le maillage dans cette zone.

4.2 Convergence en maillage

L'étude de convergence en maillage est une partie essentielle d'un projet de simulation numérique. Un maillage dit "fin" est plus précis qu'un maillage dit "grossier", par contre le temps de calcul est lui plus important. Choisir un type de maillage fait partie du compromis entre précision et temps de calcul. La première étape d'une étude en convergence consiste à suivre l'évolution d'une grandeur en fonction du maillage. Puis une fois que le maillage est "bon" (l'erreur sur la grandeur ne varie quasiment plus), on effectue une étude de convergence en résidu. On fait varier le critère d'arrêt des résidus de 10^{-3} à 10^{-15} .

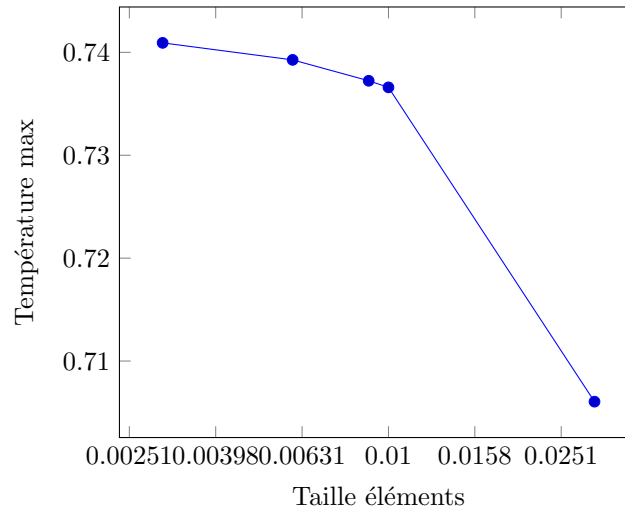


FIGURE 9 – Température max en fonction de la taille du maillage

Taille du maillage	Maximum Température
0.003	0.74092044
0.006	0.73926706
0.009	0.73723635
0.01	0.73659579
0.03	0.70605222

TABLE 1 – Maximum de température et taille minimale des éléments

Résidus	Nb itérations
e-3	145
e-4	445
e-5	745
e-6	1045

TABLE 2 – Résidus

On choisit un maillage avec une taille d'éléments de $6 \times 10^{-3} \text{ m}$ permettant une solution de qualité tout en limitant le temps de calcul. On choisit le critère d'arrêt des résidus à 10^{-4} . On pourrait affiner le critère d'arrêt en fonction des grandeurs (10^{-3} pour la continuité, 10^{-6} pour epsilon, ...).

4.3 Essai avec un autre diamètre d'injecteur

L'autre étape de l'étude est d'étudier l'écoulement avec un injecteur différent ayant un diamètre inférieur au premier. Voici les champs de vitesses et de températures capturés.

On constate que la diminution du diamètre de l'injecteur entraîne une diminution de la vitesse à la sortie de la conduite. Le gradient de vitesse est moins étendu que pour un diamètre d'injecteur

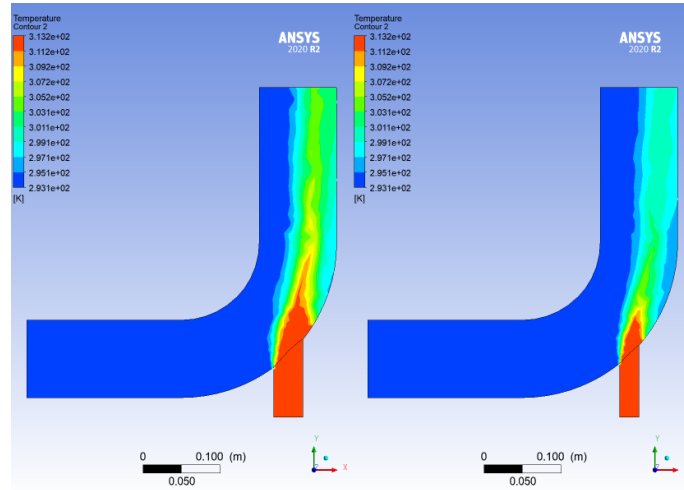


FIGURE 10 – Champ de température des deux injecteurs

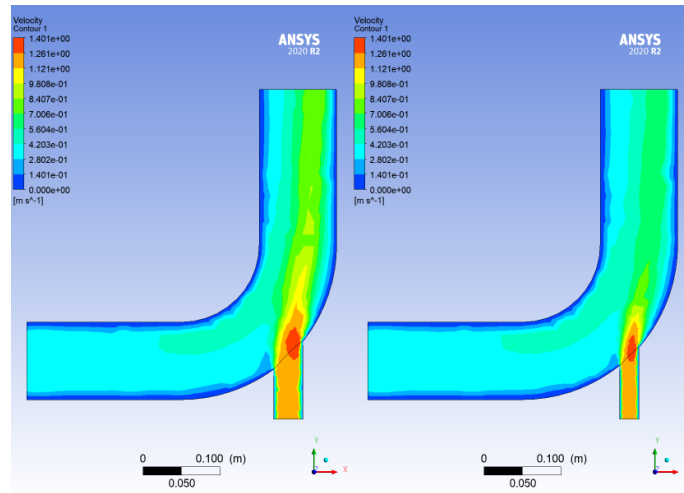


FIGURE 11 – Champ de vitesse des deux injecteurs

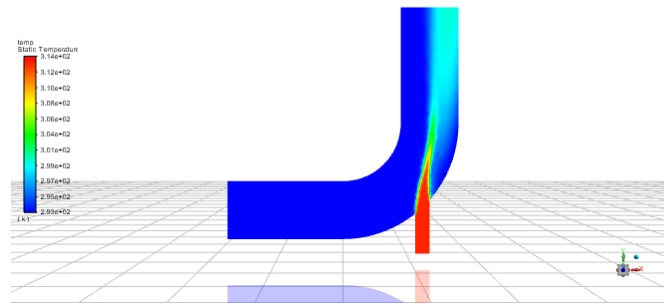
large. La zone de post-injection présente moins d'irrégularités de vitesse. Les lignes de courant dégènerent moins qu'avec un diamètre large. Le gradient de température est aussi moins présent. L'injection de fluide est concentrée sur la partie droite de la conduite.

4.4 Maillage adaptatif

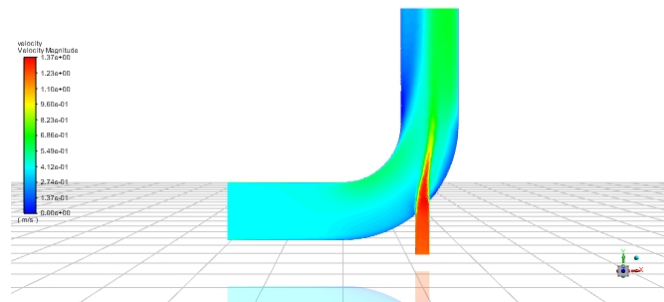
L'objectif ici est de construire un maillage adaptatif permettant de représenter plus fidèlement les phénomènes mis en jeu.

Un maillage adaptatif est un maillage présentant des éléments de taille adaptés à la physique mis en jeu. Il s'agit dans notre cas d'un resserrement des mailles. Du fait du ressaut hydraulique et de la perte importante de vitesse du fluide injecté, il est nécessaire d'adapter le maillage dans cette zone.

L'adaptation d'un maillage fait partie d'un processus de calcul. On utilise un premier maillage non adapté, pour en déduire une zone de maillage à raffiner. Cette zone renseigne les positions spatiales des zones où les paramètres de maille doivent être diminué (présence de gradients) ou au contraire peuvent être augmenté (zone de repos). Cette zone est obtenue par le post-traitement de données via le calcul du gradient et du laplacien sur l'ensemble des variables physiques du problème. Le remaillage est alors lancé. Ce processus peut être répété à plusieurs reprises et permet d'aboutir à des solutions extrêmement précises. Voici les champs obtenues grâce au maillage adaptatif.



(a) Température - Maillage adaptatif



(b) Vitesse - Maillage adaptatif

FIGURE 12 – Résultats - Maillage adaptatif

L'ajout de 90 itérations avec le maillage adaptatif permet d'affiner la zone de fort gradient. Le champ de température est affiné au niveau de la zone d'injection. On constate que le fluide injecté se diffuse dans le fluide froid. La température en sortie de conduite augmente. Le fluide "chaud" se situe à droite de la conduite. Concernant le champ de vitesse, le maillage adaptatif permet bien de confirmer qu'il y a un ralentissement de vitesse en amont de l'injecteur au niveau de la partie inférieure de la conduite et une accélération du fluide sur la partie supérieure. Après injection, la vitesse du fluide en sortie de la conduite augmente. Le fluide est tout de fois plus rapide sur la partie droite de la conduite que sur la partie gauche.

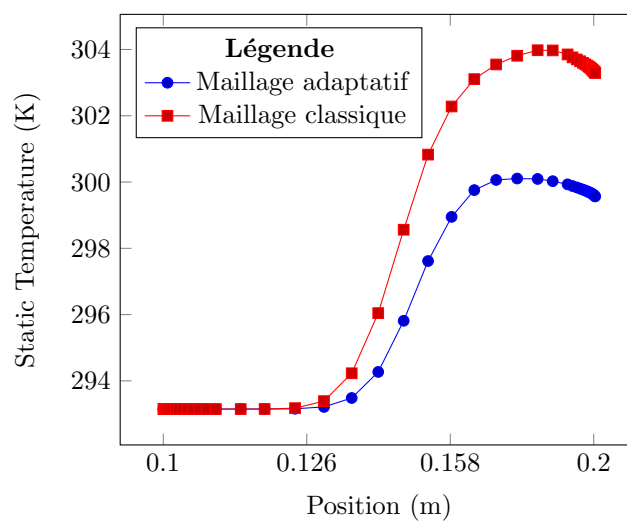
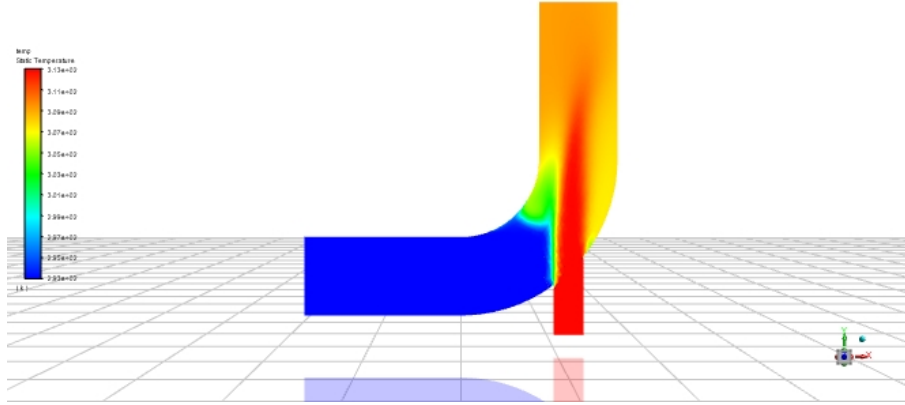


FIGURE 13 – Profil de température selon la position

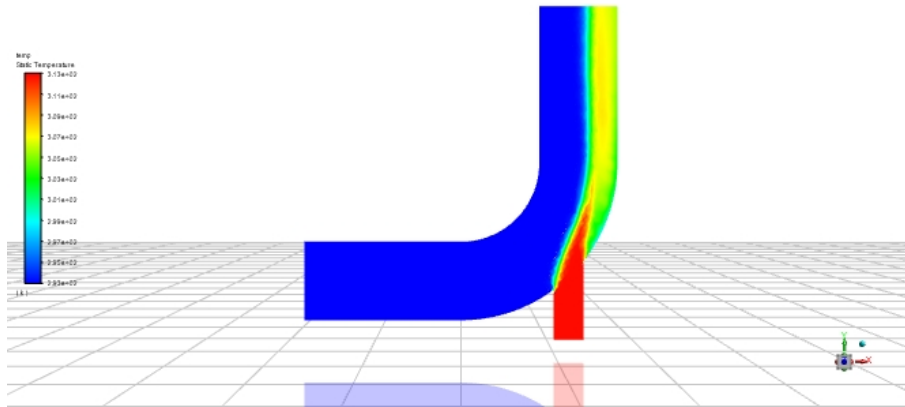
Grâce au maillage adaptatif, le gradient de température a été affiné.

4.5 Essai avec différentes vitesses

En faisant varier la vitesse d'écoulement dans le grand tuyau, on constate différentes solutions à la fois sur le champ de température mais aussi sur le champ de vitesse.



(a) Champ de température - Vitesse 0.04 m/s

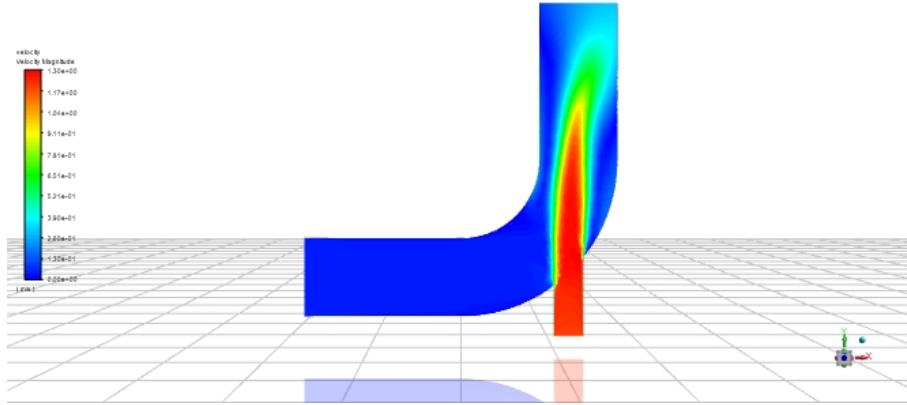


(b) Champ de température - Vitesse 0.8 m/s

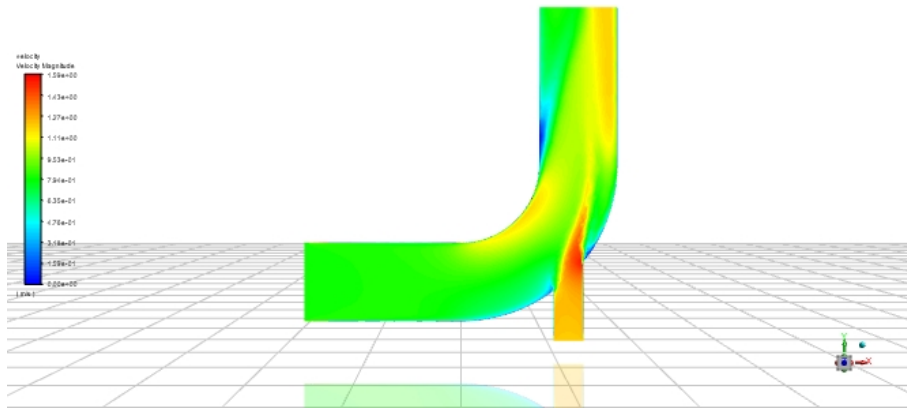
FIGURE 14 – Résultats Température - Essai vitesses

On choisit deux autres vitesses : 0.04 m/s et 0.8 m/s. Pour un vitesse de 0.04 m/s, on constate que la zone post-injection présente une température quasiment uniforme sur l'ensemble du tuyau. Le fluide arrive au niveau de l'injecteur et voit sa température augmenter à la suite de l'injection. Du fait de sa faible vitesse, le fluide "accroche" le fluide injecté et voit sa température augmenter plus rapidement qu'avec une vitesse supérieur. Le Reynolds s'établit à 5080.

Pour une vitesse de 0.8 m/s, on remarque que la zone post-injection présente 2 parties ; l'une à la température d'entrée et l'autre à une température plus élevé. Cette zone présente une hétérogénéité de température. Du fait de sa vitesse élevée, le fluide n'a quasiment pas le temps de se réchauffer au niveau de l'injecteur. Le gradient de température de la zone d'injection est plus fort que celui avec une vitesse de 0.04 m/s. Le Reynolds s'établit à 1,016M qui est un régime turbulent.



(a) Champ de vitesse - Vitesse 0.04 m/s



(b) Champ de vitesse - Vitesse 0.8 m/s

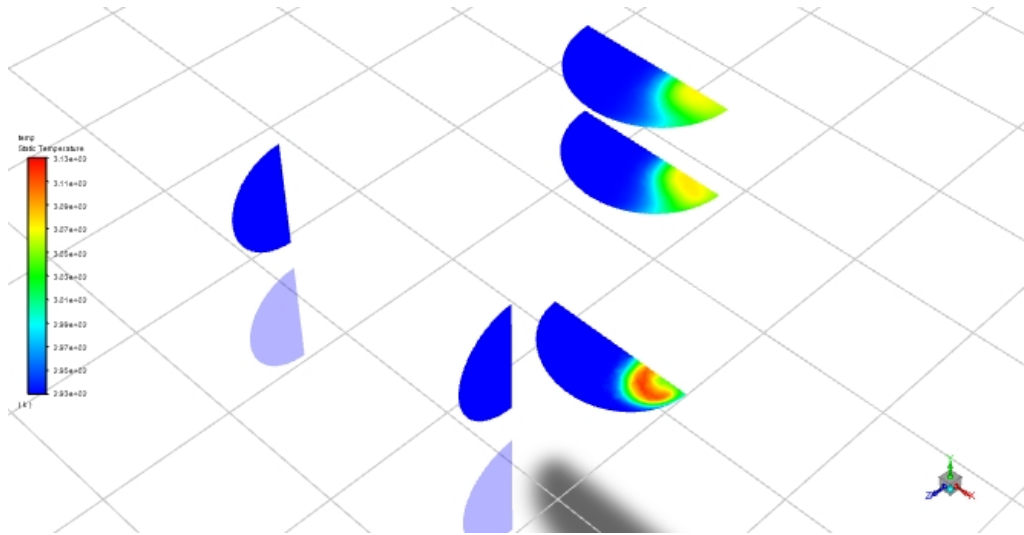
FIGURE 15 – Résultats Vitesse - Essai vitesses

Les champs de vitesses sont obtenues avec deux vitesses 0.04 m/s et 0.8 m/s. Pour une vitesse de 0.04 m/s, on constate que le fluide injecté contribue majoritairement à l'écoulement après injection. En effet, le champ de vitesse présente un fort gradient au niveau de la zone d'injection. L'adhérence au paroi est bien respecté. Le profil s'homogénéise en sortie de tuyau.

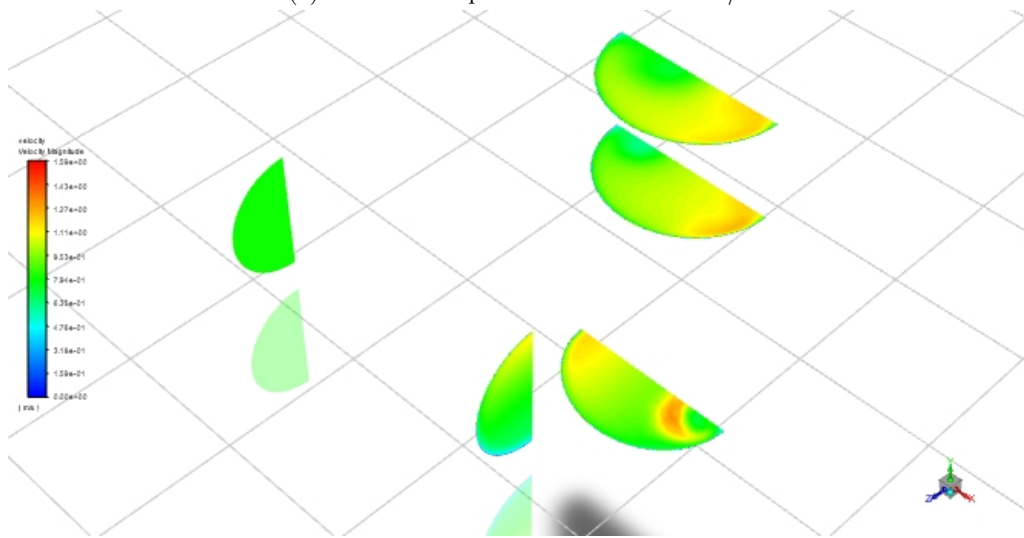
Pour une vitesse de 0.8 m/s, on remarque que le champ de vitesse est déjà plus homogène sur l'ensemble du domaine. Le fluide injecté contribue moins qu'avec une vitesse de 0.04 m/s à l'écoulement en sortie de coude. Le champ de vitesse présente des zones de ralentissement et d'accélération en sortie et entrée du coude.

4.6 Coupe vertical et horizontal

Dans cette partie, on étudie les champs de température ainsi que les champs de vitesse sur différentes sections. Les sections ici considérées sont les sections en $x=0$ et $x=40$ puis celles en $y=60$, $y=110$ et $y=170$. Au total on étudie 5 sections.



(a) Profil de température - Vitesse 0.8 m/s



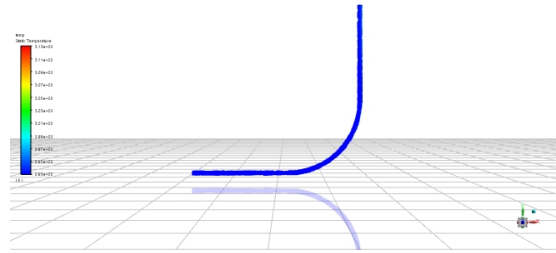
(b) Profil de vitesse - Vitesse 0.8 m/s

FIGURE 16 – Coupe transversal et profil de vitesse et température

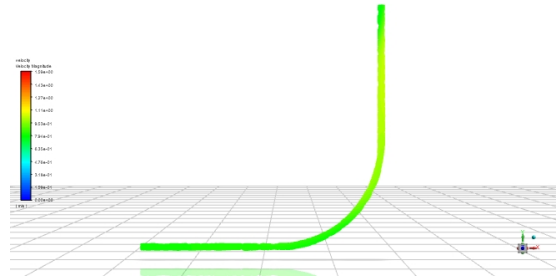
On se place dans le cas où la vitesse est de 0.8 m/s. Le champ de température est hétérogène au niveau de la zone post-injection ($y=60, 110, 170$). La zone de forte température est concentrée sur la partie droite du tuyau.

Concernant le profil de vitesse, le champ de vitesse est plus homogène. La zone de post-injection présente une zone d'accélération du fluide.

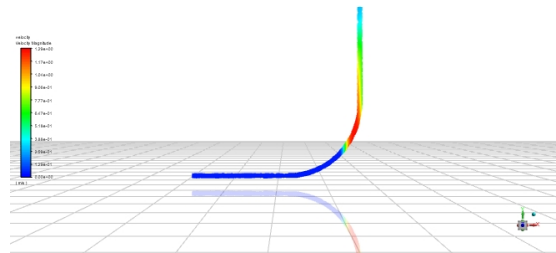
4.7 Profil sur ligne fictive



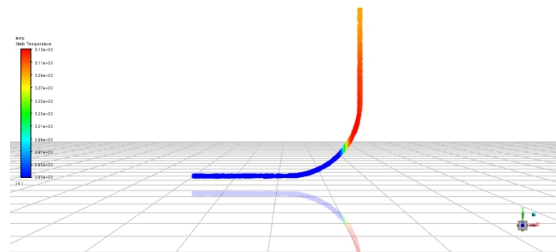
(a) Température - Vitesse 0.8 m/s



(b) Vitesse - Vitesse 0.8 m/s



(c) Vitesse - Vitesse 0.04 m/s



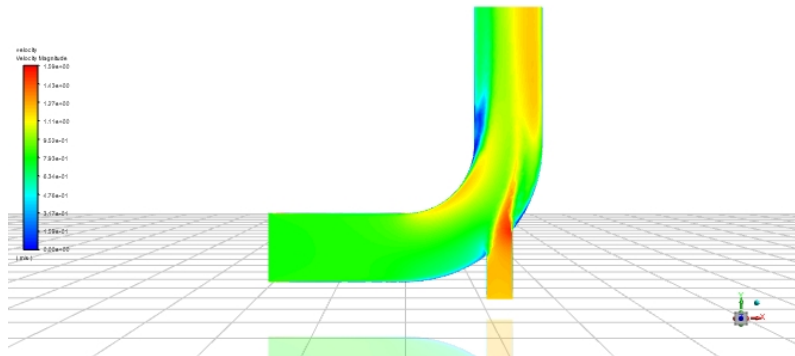
(d) Température - Vitesse 0.04 m/s

FIGURE 17 – Profil de vitesse et température sur ligne fictive au centre

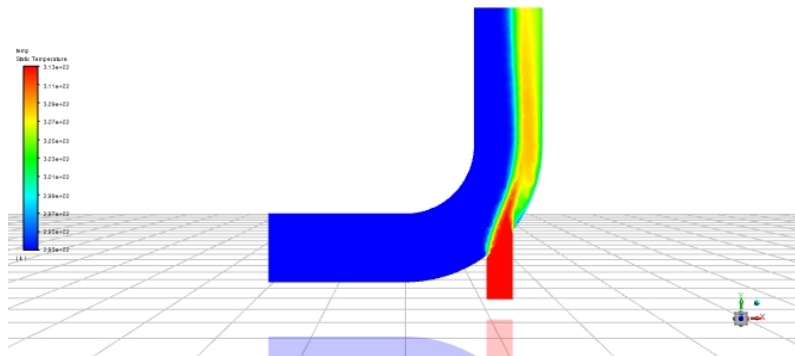
Vitesse 0.8m/s : On remarque que la température n'a pas augmenté après injection et qu'elle reste homogène sur l'ensemble de la conduite et même à la sortie. Concernant la vitesse, celle ci est homogène sur l'ensemble du domaine et il y a un léger changement après l'injection.

Vitesse 0.04m/s : il y a une variation du champ de vitesse, on remarque qu'il y a un fort gradient du champ de vitesse au niveau de la zone post-injection jusqu'à une diminution en sortie de la conduite de la vitesse du fluide. On remarque que la température est uniforme avant l'injecteur. Après l'injection la température augmente.

4.8 Essai avec différents modèles



(a) Vitesse - Modèle k-w SST

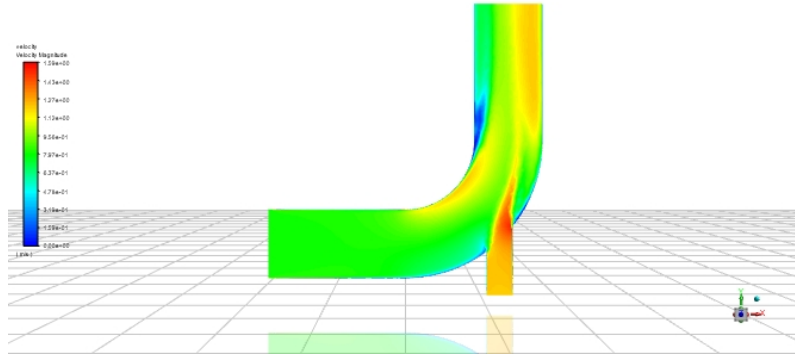


(b) Température - Modèle k-w SST

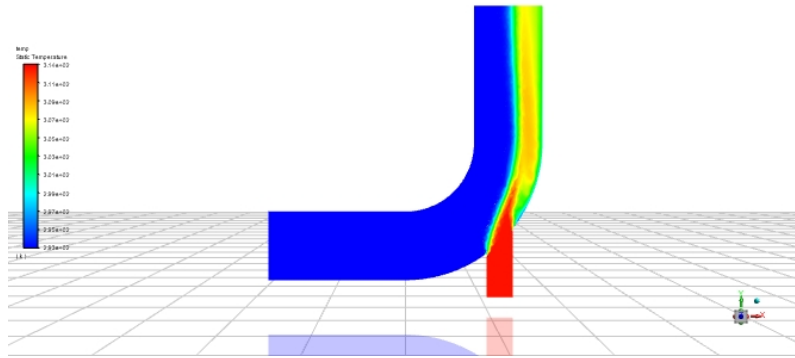
FIGURE 18 – Modèle k-w SST

Vitesse : On remarque que le champ de vitesse est homogène sur l'ensemble de la conduite, il y a moins de contribution du fluide injecté à la sortie du coude et on a obtenu des zones de ralentissement du champ de vitesse à l'entrée et à la sortie du coude.

Température : On observe qu'il y a un fort gradient de température dans la zone d'injection et que la zone post injection présente une hétérogénéité de température.



(a) Vitesse - Modèle 4 équations



(b) Température - Modèle 4 équations

FIGURE 19 – Modèle 4 équations

Vitesse : On remarque que l'on a obtenu le même résultat du champ de vitesse que celui avec le modèle k- ω SST. On retrouve la contribution du fluide injecté à la sortie du coude et la présence des zones de ralentissement du champ de vitesse. Température : On a obtenu aussi le même résultat que le champ de température qu'avec celui du modèle k- ω SST. On retrouve un fort gradient de température au niveau de la zone d'injection et une hétérogénéité de température dans la zone post injection.

5 Conclusion

Cette partie vient conclure ce travail riche d'enseignement à la fois sur le logiciel Ansys-Fluent mais aussi sur l'étude des maillages. Au travers de cette étude, ce TP nous a permis de mettre en application les notions de simulation numérique en mécanique des fluides. La taille du maillage, le critère d'arrêt des résidus sont des éléments permettant de réaliser un bon modèle et une bonne simulation numérique. La mise en place d'un maillage doit être en permanence reconsidéré pour affiner le modèle. L'étude en convergence du maillage permet de trouver le compromis entre précision et temps de calcul.

L'étude des champs et des profils de température et de vitesse nous renseigne sur les phénomènes se produisant au niveau de l'injecteur. Le dimensionnement des conduites et des paramètres de l'écoulement peuvent être complètement sélectionnés grâce à la simulation numérique et sont une étape avant la construction d'un démonstrateur.

Références

- [1] Cours Mécanique des fluides, X.Nicolas, 2022
- [2] Ansys Instruction : Fluid Flow and Heat Transfer in a Mixing Elbow