

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

**Thème :**

ÉTUDE D'ÉCOULEMENT DANS UNE CONDUITE  
A SECTION CARRÉE

**Devant le jury composé de:**

Dr. BOUSBIA Seif Eddine  
Dr. Noureddine MENECEUR  
Dr.KHECHANA Mohamed  
M. BERKANE Houda

**Président**  
**Examineur**  
**Examineur**  
**Encadreur**

**Présenté par:**

-BELHADI Mohammed Abdelkarim  
-MEHELLOU Ilyes  
-SENIGRA Bilal  
-HASSI Bachir

2021-2022

# *Dédicaces*

*Nous dédions ce modeste travail :*

*A nos parents en témoignage de leurs sacrifices et leurs encouragements.*

*A nos sœurs et frères pour leurs soutiens.*

*A nos amis en souvenirs des bons moments passés ensemble.*

*A notre professeur, notre modèle, et notre grand frère, au Dr Abdelhamid  
Bouhleb*

# REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés à réaliser ce mémoire en apportant des renseignements ou en acceptant de répondre à nos questions.

En premier lieu nous tenons à remercier chaleureusement **M. BERKANE Houda** qui n'a épargné aucun effort pour nous aider durant la réalisation de ce modeste travail. Nous lui sommes très reconnaissants pour sa patience, ses suggestions et ses conseils qui nous ont bien orientés et nous ont beaucoup aidés à réaliser ce projet.

Nous exprimons également nos profondes gratitude à tous les enseignants du département de génie mécanique qui nous ont donnés une bonne formation durant toute la période de master, en particulièrement aux : **Dr. Boukhari, Dr. Guerehet Dr. Nacib**

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Table des matière

<i>Dédicaces</i> .....	1
REMERCIEMENT .....	2
Table des matières .....	3
Nomenclature .....	6
Liste De figures .....	8
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I: Généralités</b> .....	3
IV.1. Introduction .....	3
IV.2. Concept de la mécanique des fluides .....	3
IV.3. Notion d'un fluide .....	3
IV.4. Propriétés des fluides .....	4
IV.4.1. Masse volumique .....	4
IV.4.2. Poids volumique .....	4
IV.4.3. Densité .....	4
IV.4.4. Viscosité .....	4
IV.4.5. Compressibilité .....	5
IV.5. Types d'écoulement .....	5
IV.5.1. Ecoulement Laminaire .....	5
IV.5.2. Régime turbulent .....	5
IV.5.3. Nombre de Reynolds .....	5
IV.5.4. Ecoulement permanant et transitoire .....	6
IV.5.5. Ecoulement bidimensionnel et unidimensionnel .....	6
IV.6. Les types de conduites .....	6
IV.6.1. Conduites circulaire / spirale .....	6
IV.6.2. Conduites rectangulaires .....	7
IV.6.3. Conduites oblongs .....	8
IV.6.4. Conduites autoportants et isolants .....	9
IV.6.5. Conduites souples et conduits semi rigides .....	9
IV.6.6. Conduites diffusants, conduits textiles, et conduits perforés .....	10

IV.7. Équations régissant l'écoulement.....	10
IV.7.1. Équation de continuité.....	11
IV.7.2. Équations de quantité du mouvement.....	11
IV.7.3. Équation d'énergie.....	11
<b>Chapitre II: Étude théorique</b> .....	<b>14</b>
IV.1. Introduction.....	14
IV.2. Programmes de simulation.....	14
IV.2.1.MATLAB.....	14
IV.2.2.SolidWorks.....	14
IV.2.3.Ansys Fluent.....	14
IV.3. Les étapes d'ANSYS FLUENT.....	15
IV.3.1. Première étape ( La géométrie ).....	15
IV.3.2. Deuxième étape (Mesh).....	15
IV.3.3. Troisième étape ( Setup ).....	16
IV.3.4. Quatrième étape (Solution ).....	17
IV.3.5. Cinquième étape (Results).....	17
IV.4. Travaux antérieures.....	17
IV.5. Présentation du travail.....	18
IV.6. Profils de vitesse.....	19
IV.7. Conclusion.....	20
<b>Chapitre III : Simulation numérique</b> .....	<b>22</b>
IV.1. Résolution numérique.....	22
IV.2. Principe de la méthode des volumes finis.....	22
IV.2.1. Description d'un volume de contrôle.....	22
IV.2.2. Discrétisation par la méthode des volumes finis.....	23
IV.3. Mise en équations du problème.....	24
IV.4. Présentation du logiciel de calcul.....	27
IV.5. Simulation du problème.....	28
<b>Chapitre IV : Résultats et discussions</b> .....	<b>53</b>
IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Convergence "ANSYS FLUENT ".....	53
IV.3. Résultats, validation et discussion.....	53

IV.3.1. Effet de l'angle d'inclinaison $\alpha$ et validation des résultats.....	53
IV.3.2. Effet de nombre de Reynolds.....	55
IV.3.3. Effet de type de fluide.....	55
IV.4. Conclusion.....	57
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>59</b>
<b>Références</b> .....	<b>60</b>

# Nomenclature :

a	Longueur de section carré	m
Dh	Diamètre hydraulique	m
g	Accélération de gravité	$\frac{m}{s^2}$
L	Longueur de conduite	m
P	Pression	Pa
Q	Débit volumique	$\frac{m^3}{s}$
Re	Nombre de Reynolds	
Pr	Nombre de Prandtl	
T	Temps	T
T	Température	k
U	Vitesse d'écoulement	$\frac{m}{s}$
X	Compsante de direction	(m)
$\rho$	Masse volumique	$\frac{kg}{m^3}$
$\mu$	Viscosité dynamique	
$\lambda$	Coefficient de perte de charge	
$\Delta h$	Perte de charge dans une conduite	j
$\gamma$	Le poids volumique	$\frac{N}{m^3}$
$\alpha$	L'angle d'inclinaison	
h(n)	Contrainte de cisaillement	$\frac{m^2}{s^2}$

$C_F$	Le coefficient de frottement	$\frac{m}{\text{kg} \cdot \text{s}}$
$\tau$	Nombre d'itération	

## *Liste des figures :*

Fig. I.1	Conduite circulaire/spiral	7
Fig. I.2	Conduite rectangulaire	8
Fig. I.3	Conduite oblong	8
Fig. I.4	Conduites autoportants et isolants	9
Fig. I.5	Conduites souples et conduits semi rigides	10
Fig. II.1	Maillage structuré et non structuré	16
Fig. II.2	Canal ouvert a section carré	19
Fig. III.1	Schéma représentant un volume de contrôle bidimensionnel	23
Fig.III.2	Schéma représentant le maillage décalé	24
Fig.III.3	Volume de contrôle autour du nœud P	26
Fig.III.4	ANSYS menu toolbox	28
Fig.III.5	Création de La géométrie sur ANSYS Modeler design	28
Fig.III.6	L'espace de conception de la géométrie (Modeler design)	29
Fig.III.7	Sketching toolboxes	29
Fig.III.8	Le canal rectangulaire	30
Fig.III.9	Les dimensions de canal	30
Fig.III.10	Detail view	31

Fig.III.11	Surfaces from sketches	31
Fig.III.12	Conversion la figure en air	31
Fig.III.13	L'étape Mesh	32
Fig.III.14	Choix des côtés du canal	32
Fig.III.15	Nomination des cotés	32
Fig.III.16	Division des sections supérieure et inférieure	33
Fig.III.17	Choix du nombre d'itération	33
Fig.III.18	Division des autre parties	34
Fig.III.19	Démarrage de l'exécution du réseau sélectionné	34
Fig.III.20	Modification du connexion de réseau	35
Fig.III.21	démarrage l'exécution du réseau sélectionné	35
Fig.III.22	Terminaison de deuxième étape	36
Fig.III.23	L'étape Setup	36
Fig.III.24	Modélisation des caractéristiques d'écoulement	37
Fig.III.25	Sélection de volume de fluide	38
Fig.III.26	Modèles physiques	38
Fig.III.27	Viscous models "laminar"	39
Fig.III.28	Le modèle de flux	39
Fig.III.29	Les propriétés de modèle de flux	40

Fig.III.30	Choix de fluide	40
Fig.III.31	Condition aux limites	41
Fig.III.32	Les valeurs à la paroi	41
Fig.III.33	Condition aux limites à l'entrée de canal	42
Fig.III.34	Valeur de référence	43
Fig.III.35	Définition de la méthode de résolution	44
Fig.III.36	Définition comment analyser la solution et la zone initial	45
Fig.III.37	Run calculation	45
Fig.III.38	Représentation de flux	46
Fig.III.39	L'étape "results"	46
Fig.III.40	Assigne une ligne pour étudier les coordonnées	47
Fig.III.41	Choix de l'axe de entretoises	47
Fig.III.42	Choix de l'axe de disposition	48
Fig.III.43	Les détails de vitesse	48
Fig.III.44	La courbe de vitesse	49
Fig.III.45	La courbe de pression C. Y. CHUEN.	49
Fig.III.46	La courbe de taux de cisaillement	49
Fig.VI.1	Distribution de vitesse en fonction de distance x	53
Fig.VI.2	Validation des résultats avec ceux de Chun et comparaison à	54

diffèrent angles d'inclinaison

Fig.VI.3	Comparaison de nos résultats avec ceux de chun et comparaison à différents nombres de Reynolds	55
Fig.VI.4	Comparaison de nos résultats avec ceus de chun : effet de type de fluide	55



*Introduction générale*

## Introduction générale

La mécanique des fluides est une science qui étudie le comportement des fluides au repos et en mouvement. Cette science a une grande importance dans de nombreux domaines, tels que : l'astrophysique, la biomédecine, la météorologie, la géophysique, la physique du plasma, l'aérodynamique, l'hydraulique, les turbomachines et les équipements thermiques [1]. La mécanique des fluides est subdivisée essentiellement en deux branches : la mécanique des fluides interne (écoulements confinés ; écoulements dans les conduites...) et la mécanique des fluides externe (écoulements libres autour des obstacles) [2].

L'écoulement à surface libre occupe une place importante dans de nombreuses applications de la mécanique des fluides. Beaucoup de travaux de recherches expérimentales et numériques ont été réalisés afin de fournir le maximum d'informations sur les caractéristiques de cet écoulement. Une large gamme de méthodes a été développées pour résoudre mathématiquement ce phénomène [3].

Dans ce contexte, ce travail s'intéresse à étudier numériquement les caractéristiques de d'un écoulement à surface libre dans une canalisation ouverte inclinée d'un angle  $\alpha$ quelque. L'objectif principal est d'identifier l'effet de cette inclinaison sur les caractéristiques de l'écoulement. Pour ce faire, l'écoulement en question a été simulé numériquement en utilisant un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics), ANSYS-Fluent.

Pour réaliser cet objectif, le mémoire a été organisée comme suit :

- Dans le premier chapitre on présente quelques généralités et notions de base sur la mécanique des fluides en présentant quelques propriétés du fluide, et des différents types d'écoulements, puis un rappel général sur les équations gouvernantes et les écoulements à surface libre.
- Dans le deuxième chapitre, on va présenter certains programmes de simulation et introduction de certaines expériences et les équations précédentes utilisées dans l'expérience.
- Dans le troisième chapitre, on va présenter la modélisation numérique du problème étudié : principe de la méthode des volumes finis, discrétisation spatiale du problème, schémas de résolution, conditions aux limites ... etc.
- Dans le quatrième chapitre, on va présenter les résultats de la simulation numérique obtenus à l'aide du logiciel Fluent, la validation des résultats ainsi que leurs interprétations.

Enfin, notre travail va achever par une conclusion générale récapitule les principaux résultats trouvés suivie par quelques perspectives à réaliser dans les prochaines études.



# *Chapitre* **I**

---

## *Généralités*

---



---

# Chapitre I : Généralités

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter quelques généralités de base à comprendre dans lequel s'inscrit ce mémoire. Au début, on va présenter quelques fondements de la mécanique des fluides, comme la notion du fluide, ses propriétés fondamentales, les différents types des écoulements...etc. Ensuite, les équations gouvernantes seront également présentées.

## IV.2. Concept de la mécanique des fluides

La mécanique des fluides est la science des lois de l'écoulement des fluides. Elle est la base du dimensionnement des conduites de fluides et des mécanismes de transfert des fluides. C'est une branche de la physique qui étudie les écoulements de fluides c'est-à-dire des liquides et des gaz lorsque ceux-ci subissent des forces ou des contraintes. Elle comprend deux grandes sous branches :

- La statique des fluides, ou hydrostatique qui étudie les fluides au repos. C'est historiquement le début de la mécanique des fluides, avec la poussée d'Archimède et l'étude de la pression.
- La dynamique des fluides qui étudie les fluides en mouvement. Comme autres branches de la mécanique des fluides.

On distingue également d'autres branches liées à la mécanique des fluides : l'hydraulique, l'hydrodynamique, l'aérodynamique, ...Une nouvelle approche a vu le jour depuis quelques décennies : la mécanique des fluides numérique (CFD ou Computational Fluid Dynamics en anglais), qui simule l'écoulement des fluides en résolvant les équations qui les régissent à l'aide d'ordinateurs très puissants : les supercalculateurs ou Clusters.

## IV.3. Notion d'un fluide

Un fluide peut être considéré comme étant une substance formée d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. C'est donc un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler. Les forces de cohésion entre particules élémentaires sont très faibles de sorte que le fluide est un corps sans forme propre qui prend la forme du récipient qui le contient, par exemple : les

---

métaux en fusion sont des fluides qui permettent par moulage d'obtenir des pièces brutes de formes complexes. Théoriquement, un fluide peut être réel (visqueux) ou parfait (non visqueux) [4].

## IV.4. Propriétés des fluides

### IV.4.1. Masse volumique

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Elle est généralement notée par la lettre grecque  $\rho$  :

$$\rho = \frac{m}{v}$$

### IV.4.2. Poids volumique

Le poids volumique est le poids par unité de volume d'un matériau. Le symbole du poids spécifique est  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{\text{poids}}{\text{volume}}$$

### IV.4.3. Densité

La densité d'un corps notée  $d$ , correspond au rapport de la masse volumique de corps à la masse volumique d'eau :

$$d = \frac{\rho_{\text{substance}}}{\rho_{\text{eau}}}$$

### IV.4.4. Viscosité

C'est une grandeur physique qui caractérise les frottement interne de fluide, elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force, c'est-à-dire, le fluide de grande viscosité résiste à l'écoulement et le fluide de faible viscosité s'écoule facilement :

- si  $\mu \approx 0$ , le fluide est dit parfait
- si  $\mu \neq 0$ , le fluide est dit réel

#### IV.4.5. Compressibilité

La compressibilité est la propriété d'un corps quantifiant sa variation relative de volume sous l'effet d'une pression appliquée.

Le coefficient de compressibilité d'un gaz est très supérieur à celui d'un liquide, donc :

- Les milieux gazeux sont considérés comme des milieux compressibles
- Les milieu liquide sont considérés comme des milieux incompressibles

### IV.5. Types d'écoulement

#### IV.5.1. Ecoulement Laminaire

Dans l'écoulement laminaire, les diverses couches de liquide glissent l'un sur l'autre sans se mélanger, ce qui revient à dire que la composante des vitesses normales à la direction générale du mouvement est faible vis-à-vis des composantes tangentielles. Dans un tube cylindrique, ces couches sont limitées par des surfaces cylindriques

La perte de charge dans l'écoulement laminaire est :

$$\Delta h = \lambda \frac{L W^2}{D 2g}$$

#### IV.5.2. Régime turbulent

On dit qu'un écoulement est laminaire lorsque le mouvement des particules fluides se fait de façon régulière et ordonnée. L'écoulement est turbulent lorsque le déplacement est irrégulier et que des fluctuations aléatoires de vitesse se superposent au mouvement moyen du fluide. L'une des premières analyses de la transition d'un régime laminaire vers la turbulence est basée sur des observations d'écoulements en conduit cylindrique effectuées par Reynolds en 1883. Une étude systématique du régime d'écoulement a été réalisée en fonction des différents paramètres intervenant dans le problème : la masse volumique du fluide, la viscosité, la géométrie de la conduite, etc. Reynolds a montré que la transition du régime laminaire au régime turbulent ne dépend pas séparément de chacun des paramètres mais d'une seule grandeur les regroupant tous : le nombre de Reynolds.

#### IV.5.3. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds c'est un nombre sans dimension joue un rôle prépondérant dans la prévision des tendances du comportement d'un fluide. Le nombre de Reynolds, appelé  $Re$ ,

est utilisé pour déterminer si l'écoulement du fluide est laminaire ou turbulent. C'est l'un des principaux paramètres de contrôle dans tous les écoulements visqueux où un modèle numérique est sélectionné en fonction du nombre de Reynolds.

$$Re = \frac{\text{Force d'inertie}}{\text{Force visqueuse}}$$

#### IV.5.4. Ecoulement permanent et transitoire

On dit qu'un écoulement est permanent (ou stationnaire) si toutes les variables décrivant le mouvement sont indépendantes du temps, comme la pression, la masse volumique la vitesse. etc. On dit qu'un écoulement transitoire (ou instationnaire) si les variables décrivant le mouvement sont dépendant du temps.

#### IV.5.5. Ecoulement bidimensionnel et unidimensionnel

Dans certains cas particuliers intéressants, le problème réel tridimensionnel peut ramener à l'étude d'un écoulement théorique bidimensionnel ou unidimensionnel. C'est pour ça, on peut considérer l'écoulement de grande étendue suivant l'axe des (Z) comme un écoulement bidimensionnel suivant les axes des (X) et des (Y), et toutes les grandeurs cinématiques ne dépend alors que de deux variables d'espace.

### IV.6. Les types de conduites

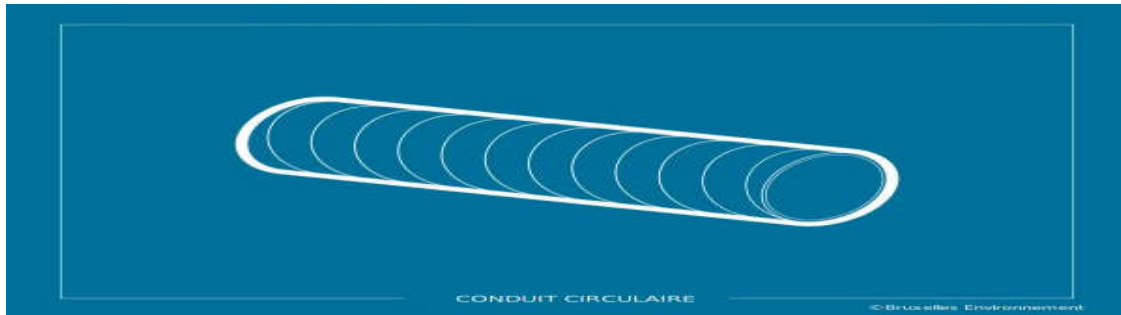
#### IV.6.1. Conduites circulaire / spirale

Conduit d'air de forme circulaire assurant le transport et l'évacuation de l'air. Les conduits circulaires peuvent avoir les propriétés suivantes : Acier, aluminium, acier revêtu d'un alliage aluminium-zinc, PVC, etc. Elles peuvent être installées dans les réseaux primaires et secondaires, en apparent, dans les faux plafonds et embâtonnés. Elle se trouve en différents forme : rigides, semi-rigides, flexibles.

- **Avantages :**

- ✓ Léger et économique ;
- ✓ Idéal pour les changements de direction en plan et en élévation ;
- ✓ Pertes de charges réunites ;
- ✓ Très bonne étanchéité avec raccord en double joint ;
- ✓ Montage et entrain aisés.

- **Inconvénient :**
  - ✓ Encombrement en hauteur plus important ;
  - ✓ Piquages et placement de bouches en parois sont plus compliqués.



**Fig. I.1:**Conduites circulaire / spirale..

#### IV.6.2. Conduites rectangulaires

Conduite d'aire de forme rectangulaire limitant l'encombrement et disposant des différentes caractéristiques suivantes : Acier, aluminium, acier revêtu d'un alliage aluminium-zinc, PVC, etc. Installés principalement pour les réseaux secondaires, en apparent, dans les faux plafonds, embâtonné. Forme : Rigides ou semi-rigides.

- **Avantages :**
  - ✓ Encombrement en hauteur plus réduit ;
  - ✓ Supports, piquages et bouches en flanc de conduit faciles à réaliser ;
  - ✓ Coudes facilement équipés d'aubes directrices.
- **Inconvénients :**
  - ✓ Déformation des conduits plus rapide ;
  - ✓ Étanchéité du réseau qui dépend de la mise en œuvre et de la qualité des joints ;
  - ✓ Il est presque impossible d'atteindre l'étanchéité des conduits circulaires ;
  - ✓ Attention à l'empoussièrement dans les coins.

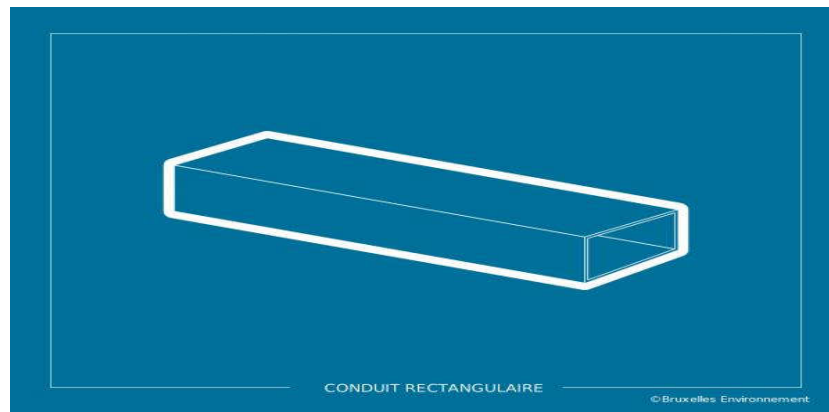


Fig. I.2: Conduite rectangulaire.

#### IV.6.3. Conduites oblongs

Principalement utilisés pour le passage des débits d'air dans des espaces réduits.

- **Avantages :**

- ✓ Bon compromis entre les conduits circulaires et rectangulaires : encombrement moins important que le circulaire et pertes de charges plus faibles que le rectangulaire ;
- ✓ Bonne étanchéité avec raccord en double joint ;
- ✓ Montage et entretien aisés.

- **Inconvénients :**

- ✓ Conduite souvent en PVC
- ✓ Pas disponible pour de grands débits.

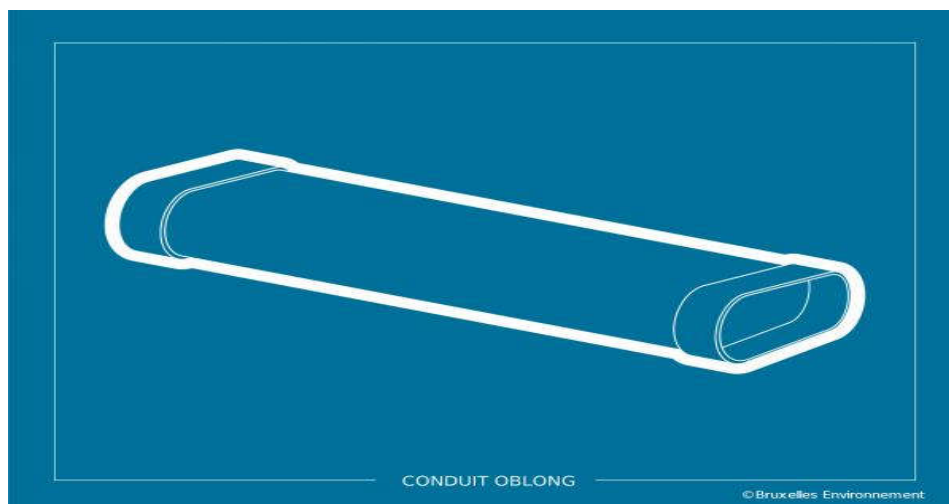


Fig. I.3: Conduit oblong.

#### IV.6.4. Conduites autoportants et isolants

Applications de conditionnement d'air, notamment dans les parties terminales des installations de type ventilo-convecteurs gainables ou unités terminales de climatisation gainables.

- **Avantages :**
  - ✓ Assemblage sur le site, de façon modulaire ;
  - ✓ Bon niveau d'isolation thermique.
- **Inconvénients :**
  - ✓ Fragile à la pose et au nettoyage.

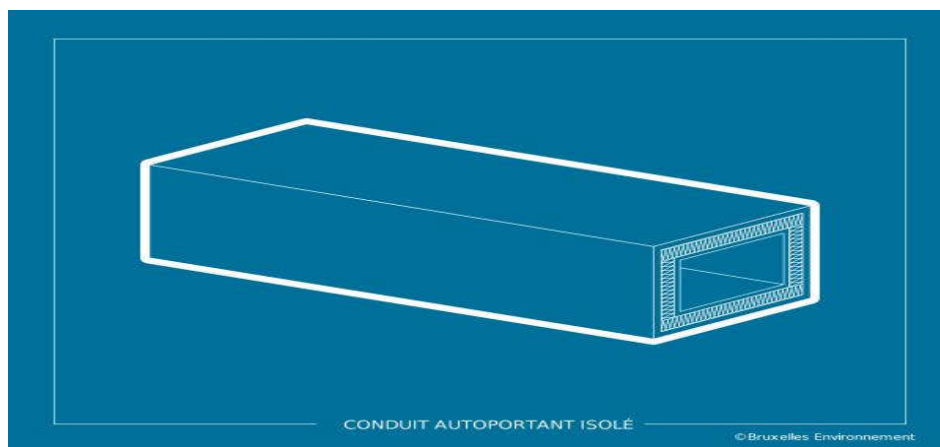


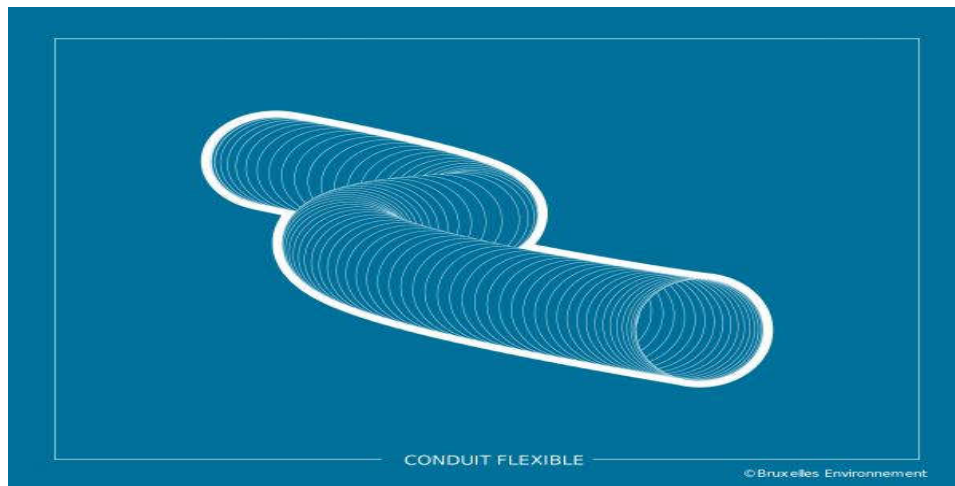
Fig. I.4: Conduite autoportant et isolant.

#### IV.6.5. Conduites souples et conduites semi rigides

Utilisés sur les parties terminales des installations, en amont des bouches et diffuseurs.

Utilisés pour des zones acoustiques sensibles.

- **Avantages :**
  - ✓ Intéressant pour les zones acoustiques sensibles ;
  - ✓ Connexion facilitée au niveau des bouches ;
- **Inconvénients :**
  - ✓ Pertes de charges élevées ;
  - ✓ Empoussièrément plus important ;
  - ✓ Nettoyage délicat.



FigI.5: Conduites souples et conduites semi rigides.

#### IV.6.6. Conduites diffusants, conduites textiles, et conduites perforés

Utilisés uniquement comme éléments terminaux de pulsion d'air dans les ambiances à traiter.

Initialement utilisés pour les affectations commerciales et industrielles, ce type de conduite est aussi présent pour le tertiaire.

- **Avantages**
  - ✓ Très bonne diffusion de l'air
  - ✓ Confort accru : homogénéité des températures, vitesse d'air faible, nuisance sonore réduite.
  - ✓ Faibles pertes de charge.
  - ✓ Faible coût d'investissement et de montage des conduits.
  - ✓ Conduit textile lavable.
- **Inconvénients**
  - ✓ Conduits apparents utilisés uniquement pour la pulsion et diffus.

#### IV.7. Équations régissant de l'écoulement

En mécanique des fluides, on suppose que le fluide est un milieu continu, ce qui permet d'utiliser les lois classiques de conservation à savoir :

1. Conservation de masse.
2. La quantité de mouvement.
3. Conservation d'énergie.

#### IV.7.1. Équation de la continuité

Elle est déduite de la loi de conservation de masse et s'exprime mathématiquement sous la forme :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

#### IV.7.2. Équations de quantité du mouvement

Le principe de conservation de quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques de fluide, son mouvement et les causes qui le produisent.

Si on suppose que le milieu est continu, isotrope, homogène et que le fluide est newtonien (relation contrainte – déformation linéaire), les équations de quantités de mouvement s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \left( \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \left( \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g \end{aligned} \quad (I.1)$$

#### IV.7.3. Équation d'énergie

Elle est déduite de la loi de conservation d'énergie. Elle s'écrit :

$$\left( \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (I.2)$$

Où :  $u$ ,  $v$  et  $w$  représente les vitesses de l'écoulement suivant les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$  respectivement.  $P$ , est la pression.  $T$ , la température.  $\mu$ , la viscosité dynamique du fluide.  $Pr = (\mu \cdot Cp / \lambda)$ , représente le nombre de Prandtl.

L'ensemble de toutes les équations présentées en dessus forme les équations de Navier-Stokes d'un fluide Newtonien pour un écoulement stationnaire, tridimensionnel et visqueux (non parfait).



*Chapitre* **II**

---

*ETUDE THEORIQUE*

---



# Chapitre II : Étude théorique

## IV.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté quelques notions de base d'écoulement et quelques notions de base de fluide. Dans ce chapitre, nous présenterons quelques travaux antérieurs et étudierons l'équation de Navier-Stokes dans un canal carré, puis nous présenterons l'expérience utilisée avec la définition de certains programmes de simulation.

## IV.2. Programmes de simulation

### IV.2.1. MATLAB

Un environnement de programmation pour le développement d'algorithmes, l'analyse de données, la visualisation et le calcul numérique.

### IV.2.2. SolidWorks

Solution de simulation qui permet aux entreprises d'évaluer les conceptions structurelles, le chargement dynamique et les matériaux composites.

### IV.2.3. Ansys Fluent

ANSYS Fluent offre toutes les capacités physiques nécessaires pour la modélisation des écoulements fluides, des turbulences, des transferts de chaleur et des réactions chimiques.

Le logiciel est utilisé pour des applications industrielles allant de l'écoulement d'air autour d'une aile d'avion, à la combustion à l'intérieur d'un four ; des colonnes à bulles aux plates-formes pétrolières ; du flux sanguin à la fabrication de semi-conducteurs ; de la conception de salles blanches aux usines de traitement des eaux usées. Des modèles spécifiques sont proposés pour modéliser les phénomènes de combustion interne, d'aéroacoustique ainsi que les turbomachines.

### IV.3. Les étapes d'ANSYS FLUENT

#### IV.3.1. Première étape (La géométrie)

Dans un premier temps l'utilisateur est tenu de choisir un système de coordonnées afin de caractériser la géométrie. Les domaines pouvant varier suivant les études. Il peut employer des coordonnées cartésiennes ou cylindriques, il peut alors définir son domaine d'écoulement.

#### IV.3.2. Deuxième étape (Mesh)

La génération de maillages (2D / 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée.

La spécification de maillage dépend de la nature et de complexité de géométrie

Pour une meilleure précision des résultats un test de dépendance de maillage doit être effectué pour différentes nombres de cellules

#### Les types de maillages

##### ➤ Maillage structuré

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente les avantages suivants :

- Économiques en nombre d'éléments ;
- Présentent un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent ;
- Réduit les risques d'erreur numérique car l'écoulement est aligné avec le maillage ;

##### **Inconvénients :**

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

##### ➤ Maillage non structuré

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leurs dispositions et avantages :

- Peut-être génères pour une géométrie complexe tout gardant une bonne qualité des éléments ;
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage sont très automatisés ;

**Inconvénients :**

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré ;
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

➤ **Maillage hybride**

Maille générée par un mélange de d'élément de différents types triangulaire ou quadrilatéraux en 2 D, tétraédrique, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

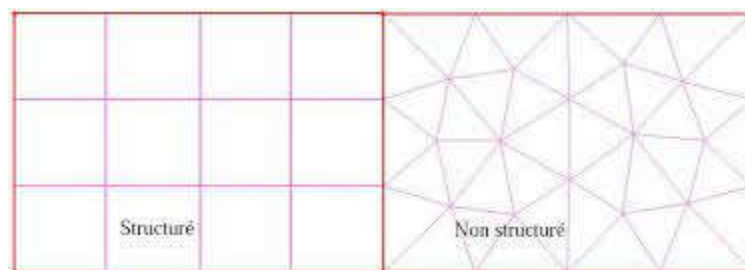


Fig II.1: maillage structuré et non structuré.

### IV.3.3. Troisième étape (Setup)

A cette étape, on définit :

- Le type de l'écoulement : stationnaire ou instationnaire, incompressible ou compressible, axisymétrique ou non ...etc.
- Le problème physique : turbulence, équation d'énergie, radiation ...
- Propriétés de fluide : masse volumique, viscosité, ...etc.
- Les conditions aux limites : (wall, velocityinlet, pressure outlet ...).
- Algorithmes de résolution : (SIMPLE, SIMPLEC ...).
- Type de discrétisation : (Upwind, Quick ...).
- Initialisation des solutions : mettre une valeur initiale.

#### IV.3.4. Quatrième étape (Solution)

A cette étape, le programme discrétise les équations différentielles gouvernant le problème sur le maillage généré en utilisant la méthode des volumes finis et ensuite il résout automatiquement le système d'équations algébriques résultat.

#### IV.3.5. Cinquième étape (Results)

A cette étape, le programme affiche les résultats obtenus en utilisant un sous-programme intégré appelé CFD-Post.

### IV.4. Expériences précédentes

**II - 4-1- Direct numerical simulation of a fully developed turbulent square duct flow up to  $Re\tau = 1200$  HaoZhanga,b, F. Xavier Triasa , Andrey Gorobetsa,c, YuanqiangTand , Assensi Oliva:**

Une simulation numérique directe d'un écoulement rectiligne en conduit carré turbulent a été réalisée à  $Re\tau = 300, 600, 900$  et  $1200$ . Des maillages échelonnés cartésiens ont été utilisés avec jusqu'à 167,8 millions de nœuds. Un quatrième ordre totalement conservateur. La discrétisation spatiale a été utilisée avec un temps explicite de second ordre.

**II-4-2-Experiments on Low-Reynolds-number turbulent flow through a square duct**

**Bayode E. Owolabi<sup>1</sup>, Robert J. Poole<sup>1</sup> and David J. C. Dennis, School of Engineering, University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, UK:**

Le comportement d'un écoulement turbulent dans un conduit carré à des nombres de Reynolds relativement faibles a été étudié. Les résultats pour un écoulement légèrement turbulent à  $Re\tau = 81$  et un écoulement complètement turbulent à  $Re\tau = 161$  montrent un bon accord avec les données DNS de Uhlmann et al. (2007) et Gavrilakis (1992), respectivement.

**II 4-3-Linear stability of magnetohydrodynamic flow in a square duct with thin conducting walls Janis Priede<sup>1</sup>, Thomas Arlt and Leo Bühler: Applied Mathematics Research Centre, Coventry University, UK Institut für Kern- und Energietechnik, Karlsruhe Institute of Technology, Germany:**

Cette étude porte sur l'analyse numérique de la stabilité linéaire de l'écoulement de métal liquide dans un conduit carré à parois minces électriquement conductrices soumises à un champ magnétique.

---

**II -4-4--Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct Bay ASMUND HUSERT AND SEDAT BIRINGEN Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA:**

Une simulation numérique directe d'un écoulement turbulent entièrement développé à faible nombre de Reynolds dans un conduit carré est présentée. Le schéma numérique utilise une méthode de fractionnement temporel pour intégrer les équations tridimensionnelles incompressibles de Navier-Stokes à l'aide d'une discrétisation spectrale/à différences finies d'ordre élevé sur un maillage échelonné ; les termes non linéaires sont représentés par des différences finies au près du cinquième ordre.

**II -4-5-Turbulent Flow in a Square Duct with Strong Curvature by J. A. C. Humphrey, J. H. Whitelaw, and G. Yee:**

L'écoulement stable, incompressible, isotherme, se développant dans un conduit courbe de section carrée à parois lisses a été étudié. Un conduit de 40 mm x 40 mm avait un rapport de rayon de 2,3 avec de longs conduits droits en amont et en aval attachés.

Mesures longitudinales et composantes radiales de la vitesse moyenne et composantes correspondantes du tenseur de contrainte de Reynolds, ont été obtenus avec un anémomètre laser-Doppler un nombre de Reynolds de  $4 \times 10^4$  et dans divers plans transversaux.

**IV.5. Présentation du travail**

Dans ce travail, comme indiqué à la figure ci-dessous, on considère un canal ouvert incliné de section carrée faisant un angle  $\theta$  avec l'horizontale. L'axe des x est toujours choisi parallèle au canal, et l'angle  $\theta$  est supposé être si petit que la surface libre est partout parallèle à la base du canal.

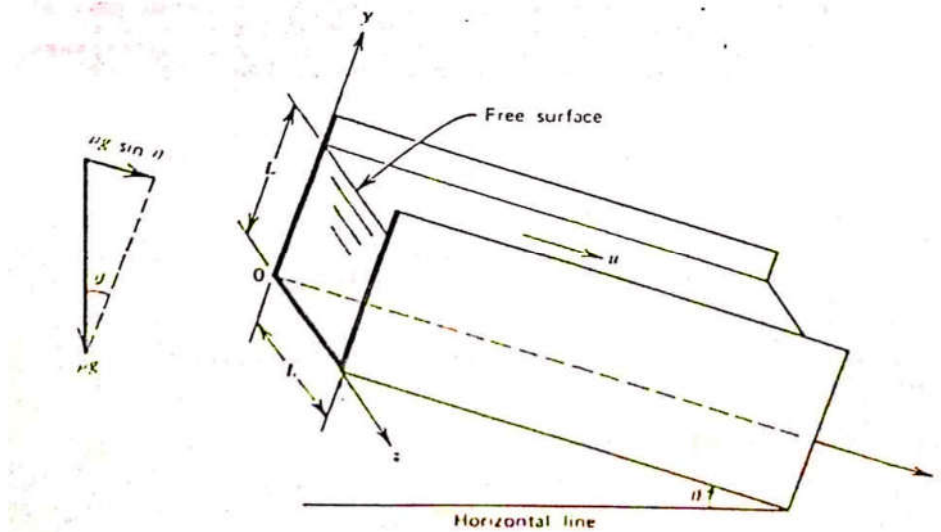


Fig. II.2- Canal ouvert a section carré

#### IV.6. Profil de vitesse

D'après la loi de Newton on a :

$$\sum fs = 0 = F1 + wt \sin \theta - F2 - \tau LW$$

L'écoulement est uniforme donc les forces de pression (F1 et F2) s'annulent et la composante du poids parallèle à l'écoulement doit être équilibrée par le cisaillement appliqué. Cela donne une expression de la contrainte de cisaillement dans un écoulement en canal ouvert :

$$\gamma L(D - y)W \sin \theta = \tau LW$$

Où :

$$\tau = \gamma(D - y) \sin \theta$$

Pour un écoulement laminaire

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} = \gamma(D - y) \sin \theta$$

En séparant les variables et en les intégrant, on obtient une expression pour

Le profil de vitesse dans un écoulement laminaire à canal ouvert est donné par :

$$v = \frac{\gamma}{\mu} \sin \theta \int (D - y) dy = \frac{\gamma}{\mu} \sin \theta \left( Dy - \frac{y^2}{2} \right) + c$$

$$v = \frac{\gamma}{\mu} \sin \theta \left( Dy - \frac{y^2}{2} \right) + c$$

La constante c peut être calculé à partir les conditions aux limites pertinentes.

#### IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques logiciels de simulation et une attention particulière a été mise en place sur le logiciel Ansys Fluent, qui est un logiciel CFD basé sur la méthode des volumes finis. Les expériences précédentes et les équations mathématiques pour un canal carré ont été également présentés. Enfin, nous avons présenté la présente étude et sa solution exacte qui peut être utilisée plus tard dans la validation des résultats numériques.

↓

# *Chapitre* **III**

---

*Simulation numérique*

---

↓

---

# Chapitre III : Simulation numérique

## IV.1. Résolution numérique

Comme nous avons déjà vu dans le premier chapitre, le problème étudié est gouverné par des équations aux dérivées partielles non-linéaires, très complexes à résoudre d'une manière analytique. C'est pourquoi nous utilisons les méthodes numériques afin de trouver des solutions.

Pour obtenir une solution numérique, le modèle mathématique constitué par une équation différentielle aux dérivées partielles (EDP) ou par un système d'EDP doit être transformé à l'aide d'une méthode de discrétisation en système d'équations algébriques. Il existe plusieurs schémas de discrétisations des équations aux dérivées partielles : la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis, la méthode des éléments finis, méthodes spectrales, etc.

Dans ce travail, nous avons utilisé le logiciel ANSYS FLUENT qui est basée sur la méthode des volumes finis.

## IV.2. Principe de la méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation numérique des équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Cette méthode a été développée par Patankar en 1980 [18]. Elle est basée sur l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui assurent la conservation de toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle [19].

### IV.2.1. Description d'un volume de contrôle

Dans la simulation par la méthode des volumes finis, le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle. Chacun de ces derniers (volume de contrôle) contenant un nœud appelé le nœud principal. Un exemple de volume de contrôle est illustré dans la figure II-3. Pour un nœud principal (P'), les points E et W (E : Est, W : West) sont des voisins dans la direction X, tandis que N et S (N : Nord, S : Sud) sont ceux dans la direction Y. Le volume de contrôle

entourant ( $P'$ ) est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux point (e) et (w) dans la direction X, (n) et (s) dans la direction Y [18].

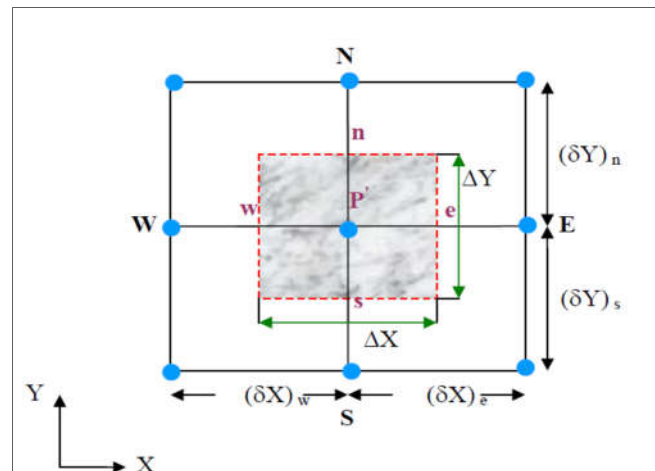


Fig. III.1: Schéma représentant un volume de contrôle bidimensionnel.

#### IV.2.2. Discrétisation par la méthode des volumes finis

Le maillage est subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection représente un nœud.

La discrétisation du domaine est obtenue par un maillage constitué d'un réseau de points (nœuds). Ainsi un élément de volume (volume de contrôle) est défini autour de chaque nœud.

Les grandeurs scalaires sont stockées dans le nœud ( $P'$ ) du maillage, tandis que les grandeurs vectorielles sont stockées aux milieux des segments reliant les nœuds. L'équation générale de transport est intégrée sur le volume de contrôle associé aux variables scalaires et les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur le volume de contrôle associé aux composantes de la vitesse.

Le volume de contrôle de la composante longitudinale ( $U$ ) est décalé suivant la direction ( $X$ ) par rapport au volume de contrôle principal, celui de la composante transversale ( $V$ ) est décalé suivant la direction ( $Y$ ). Ce type de maillage appelé le maillage décalé, qui permet une bonne approximation des flux convectifs et une stabilisation numérique de la solution.

La construction des volumes de contrôle et le maillage décalé sont montrés dans la figure III - 4 [17, 18] :

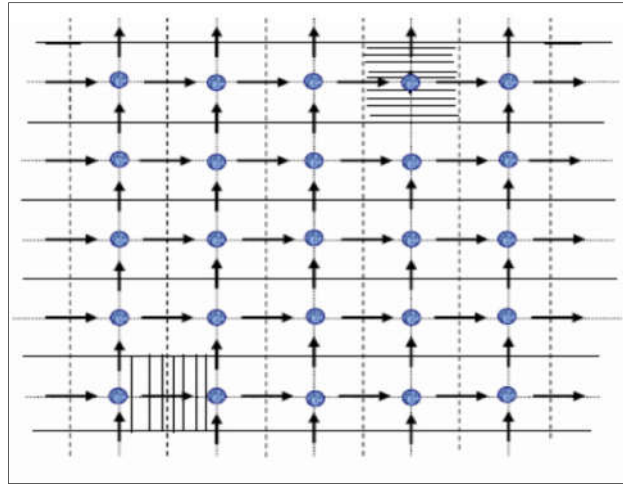
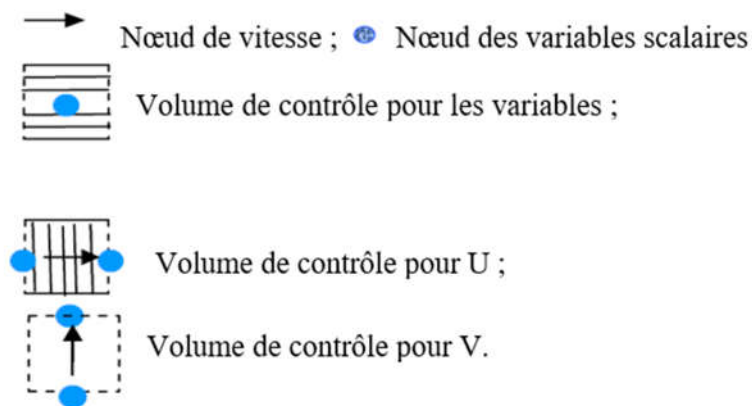


Fig. III.2: Schéma représentant le maillage décalé.



### IV.3. Mise en équations du problème

Les équations mathématiques exposées précédemment qui régissent l'écoulement expriment le transport des quantités de masse, de mouvement et d'énergie.

On peut procéder à la conversion des équations différentielles de transport en systèmes d'équations algébriques. Ce procédé est simplifié si on traite le cas d'une équation généralisée de transport d'une variable  $\phi$ . Cette équation s'écrit dans le cas stationnaire et bidimensionnel :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi} \quad (\text{III.1})$$

Tous les termes sont représentés dans la table III.1.

**Tableau III.1:** Coefficients de diffusion et termes source.

Équation de	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_P$	$S_U$
Conservation de la masse	1	0	0	0
Impulsion dans le sens X	$U$	$\mu_{eff}$	0	$S^U - \frac{\partial P}{\partial x}$
Impulsion dans le sens Y	$V$	$\mu_{eff}$	0	$S^V - \frac{\partial P}{\partial y}$
Energie	$C_p T$	$\frac{\mu}{Pr}$	0	$\frac{dP}{dt}$

Avec

$$S^U = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial x} \right)$$

$$S^V = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (III.2)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial x} + V \frac{\partial P}{\partial y} = U \frac{\partial P}{\partial x} + V \frac{\partial P}{\partial y}$$

Où :

$\phi$  : La propriété transportée ;

$\Gamma_\phi$ : Le coefficient de diffusion ;

$S_\phi$  : Le terme source.

Pour bien comprendre cette méthode, on considère le cas le plus simple. Soit l'écoulement permanent unidimensionnel dans lequel seuls les termes de convection et de diffusion sont présents. L'équation différentielle gouvernante est :

$$\frac{d}{dx}(\rho u \phi) = \frac{d}{dx} \left( \Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) \quad III.3$$

L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{d}{dx}(\rho u) = 0 \text{ Soit, } \rho u = \text{constante} \quad III.4$$

Pour obtenir l'équation discrétisée, on utilise le système à trois nœuds, représenté dans la figure III.4. On suppose que "e" est localisé au milieu entre P et E, et w est entre W et P.

L'intégration des équations autour du volume de contrôle de la figure II.5, donne :

$$(\rho u \phi)_e - (\rho u \phi)_w = \left( \Gamma \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left( \Gamma \frac{d\phi}{dx} \right)_w \quad \text{III.5}$$

$$(\rho u)_e - (\rho u)_w = 0 \quad \text{III.6}$$

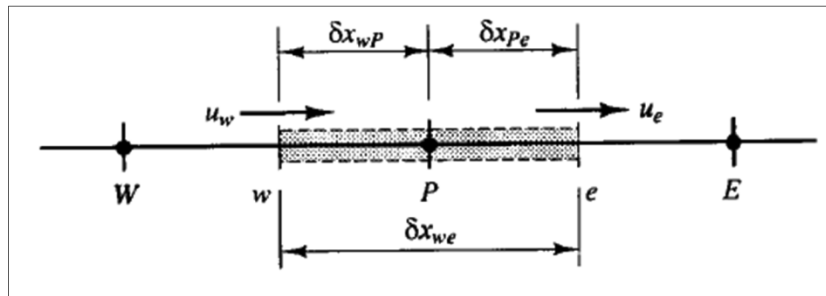


Fig. III.3: Volume de contrôle autour du nœud P.

Pour arranger l'équation d'une façon compacte, on définit deux nouveaux termes :

$$F = \rho u \text{ et } D = \frac{\Gamma}{\delta x} \quad \text{III.7}$$

Les deux termes ont les mêmes dimensions ; F indique l'intensité de la convection, D est la conductance de diffusion.

Avec ces nouveaux symboles, les équations deviennent :

$$F_e \phi_e - F_w \phi_w = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad \text{III.8}$$

$$F_e - F_w = 0$$

Pour résoudre l'équation (III.8), on aura besoin de calculer la propriété de transport  $\phi$  aux faces e et w. Plusieurs méthodes ou schémas sont possibles pour déterminer les valeurs de la variable  $\phi$  aux centres des mailles. Dans ce qui suit on présente le schéma de différences centrées qui est largement utilisée dans la littérature.

L'approximation par un schéma de différences centrées est utilisée pour représenter le terme de diffusion. Pour le cas unidimensionnel, on peut écrire la valeur de la grandeur scalaire  $\phi$  aux faces du volume de contrôle comme :

$$\phi_e = (\phi_P + \phi_E) / 2 \quad \text{III.9}$$

$$\phi_w = (\phi_w + \phi_p) / 2 \quad \text{III.10}$$

Le facteur ( $1/2$ ) provient du fait qu'on a supposé que les interfaces dans la Figure III.5 soient au milieu.

L'introduction des deux expressions (III.3) et (III.9) dans l'équation (III.10) donne :

$$\frac{F_e}{2}(\phi_p + \phi_E) - \frac{F_w}{2}(\phi_w + \phi_p) = D_e(\phi_E - \phi_p) - D_w(\phi_p - \phi_w) \quad \text{III.11}$$

En réarrangeant cette équation, on aboutit à l'équation discrétisée suivante :

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_E \phi_E \quad \text{III.12}$$

$$\text{Avec } a_E = D_e - \frac{F_e}{2} ; a_w = D_w + \frac{F_w}{2} \text{ et } a_p = D_e + \frac{F_e}{2} + D_w - \frac{F_w}{2} = a_E + a_w + (F_e - F_w)$$

Après la discrétisation des équations gouvernantes le problème, on applique les équations discrétisées sur tous les nœuds du maillage, et ensuite, à l'aide d'un algorithme itératif de résolution numérique, on trouve les solutions recherchées avec certain niveau de précision.

#### IV.4. Présentation du logiciel de calcul

Le logiciel ANSYS FLEUNT, est un logiciel CFD sous licence commerciale, permettant de réaliser des simulations numériques 2D ou 3D en mécanique des fluides allant de la conception de la géométrie et la construction du maillage jusqu'à la résolution des équations de Navier Stokes et au post-traitement avec CFD-Post.

Ce logiciel de simulation numérique est largement utilisé dans le secteur industriel (échangeurs de chaleur, écoulements dans les tuyaux, automobile, aéronautique, espace, etc.) en raison de leur interface graphique puissante et de l'abondance de leurs options, ils permettent de réaliser des simulations sur tous types de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs et avec des modèles physiques variés (diphasiques, turbulents, etc.) [20].

## IV.5. Simulation du problème

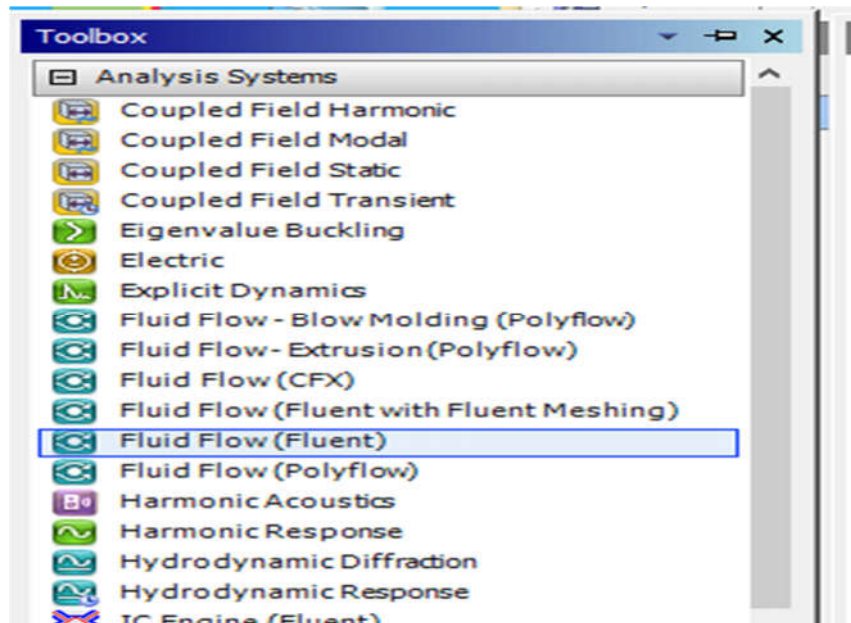


Fig. III.4: ANSYS menu toolbox.

Dans le menu Toolbox, on choisit fluid flow(fluent)

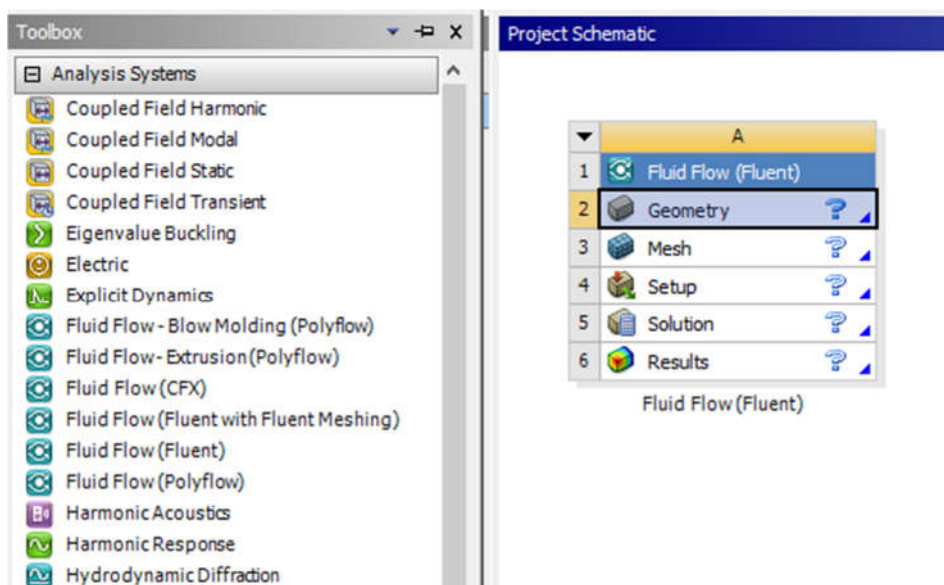


Fig. III.5: Création de la géométrie sur ANSYS Modeler Design.

Nous cliquons sur l'icône de géométrie pour représenter le tube dans lequel nous allons étudier l'écoulement dans la fonction Design Modeler.

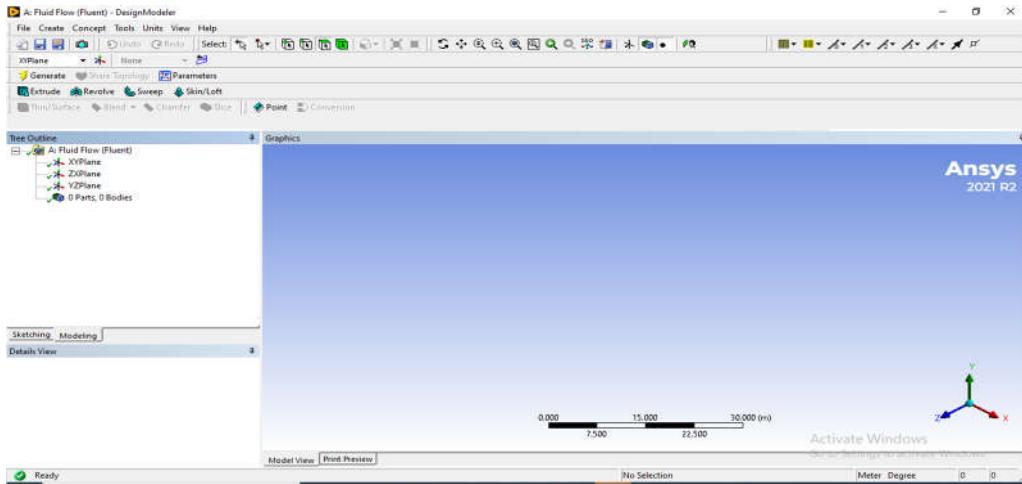


Fig. III.6: L'espace de conception de la géométrie (Modeler Design).

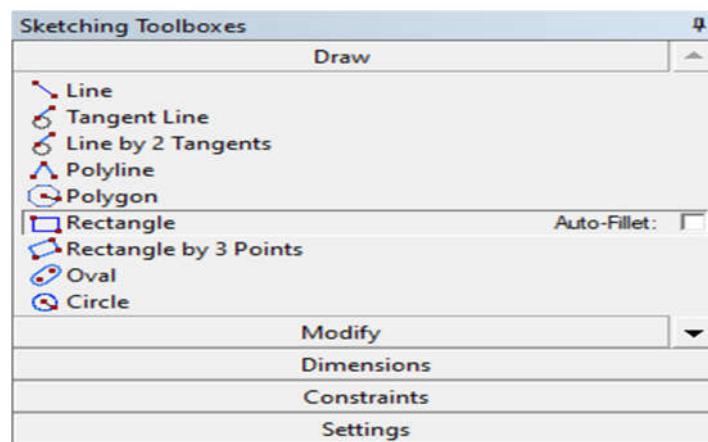


Fig. III.7: sketching toolboxes (Modeler Design).

Après avoir défini le paramètre approprié, nous choisissons la forme du rectangle à partir de l'icône sketching tool boxes.

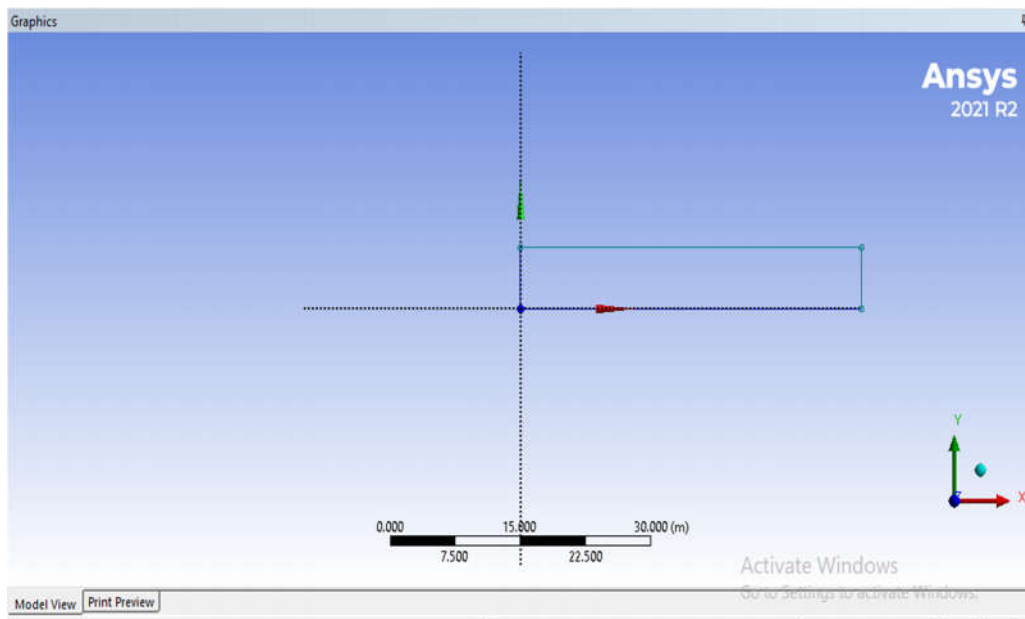


Fig. III.8: Le canal rectangulaire

Dessinez le rectangle sur la page de dessin

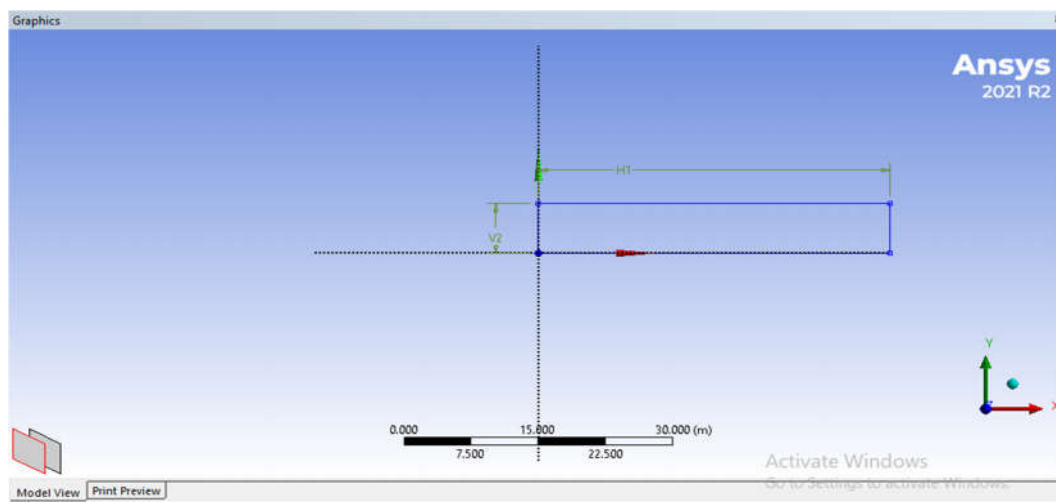


Fig. III.9: les dimensions de canal.

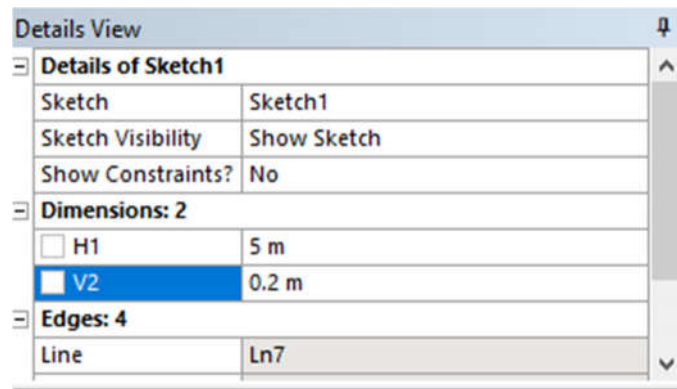


Fig. III.10: Detail view.

Déterminer les longueurs des côtés du rectangle

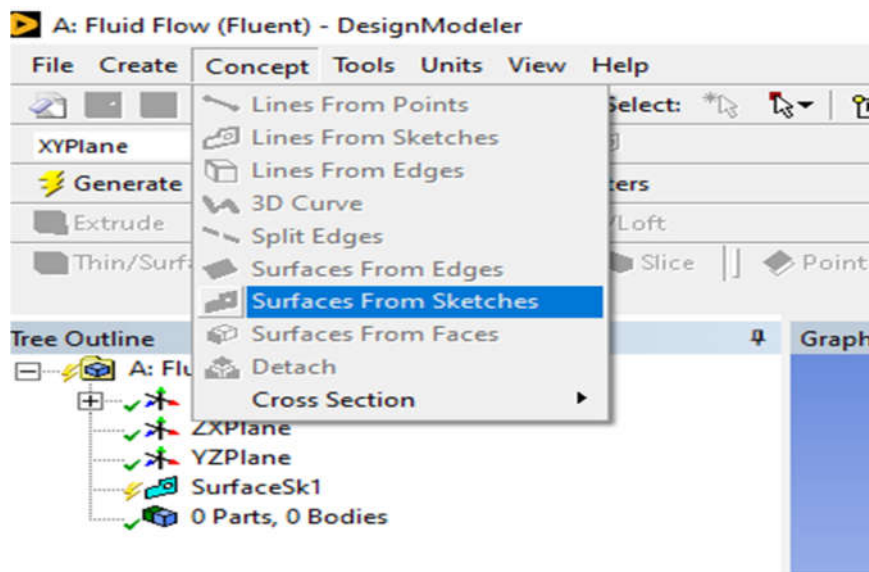


Fig. III.11: Surfaces from sketches.

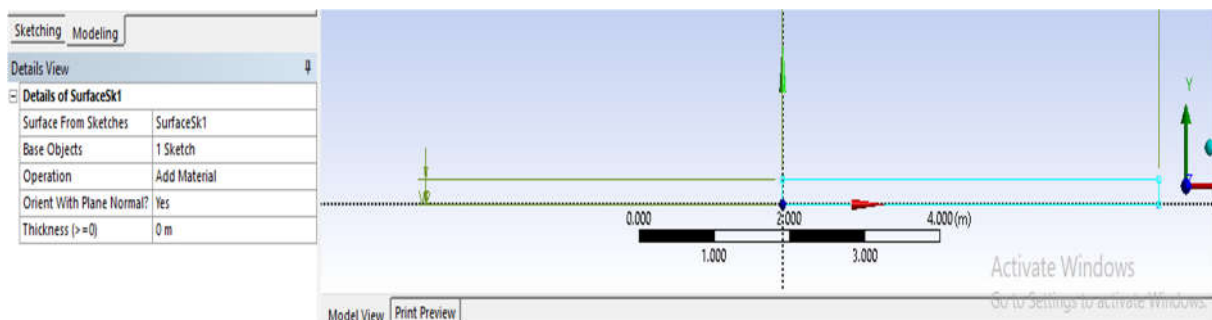


Fig. III.12 : Convertisseur la figure en air.

Nous convertissons la figure dessinée en une aire

Avec cela, nous avons terminé la première étape de la modélisation

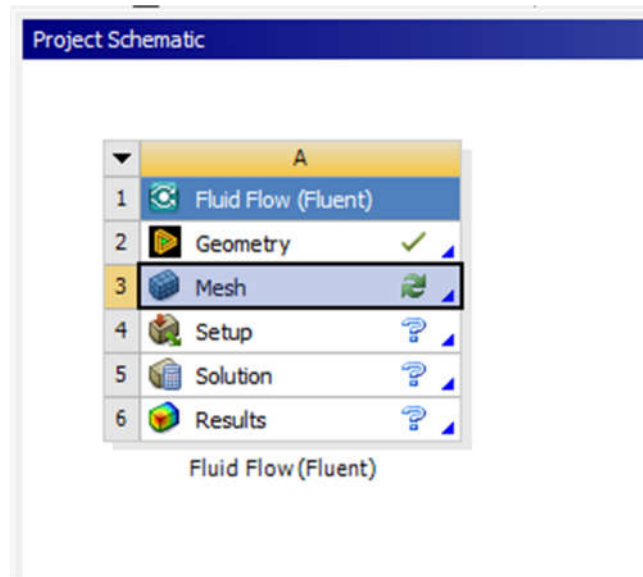


Fig.III-13 l'étape Mesh

Nous passons à l'étape de la mise en place du réseau approprié pour étudier le flux

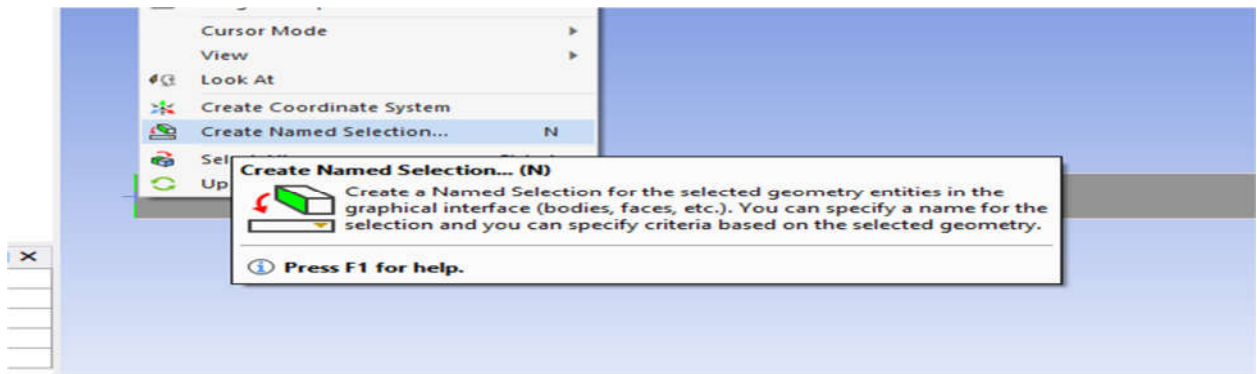


Fig.III -14 choisir les cotés du canal

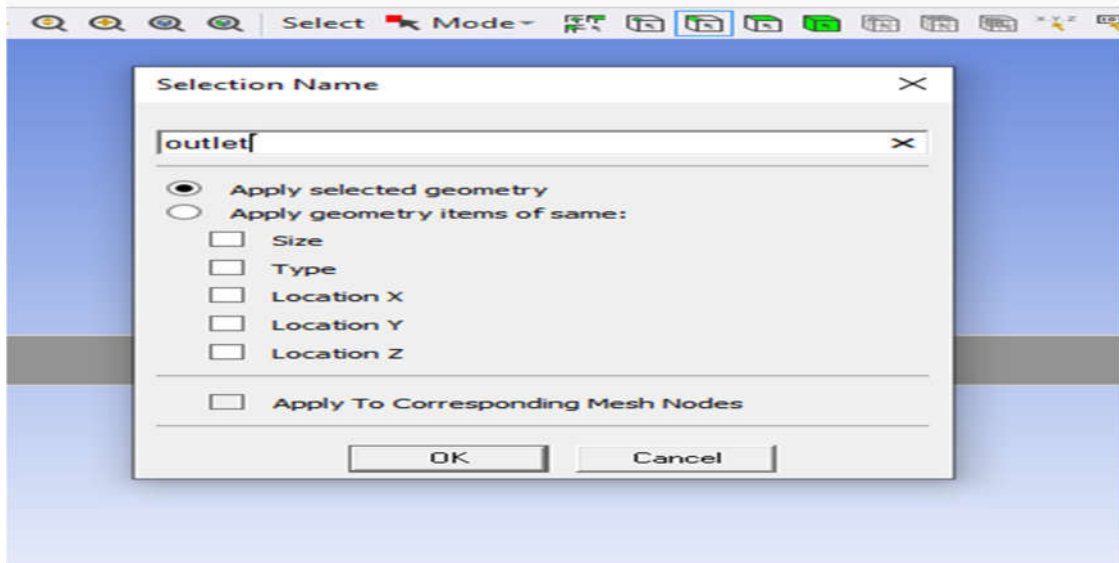


Fig.III- 15 nommer les cotés

Nous nommons les côtés du tube

Nous choisissons de diviser les sections de tuyaux et de commencer par les parties supérieure et inférieure

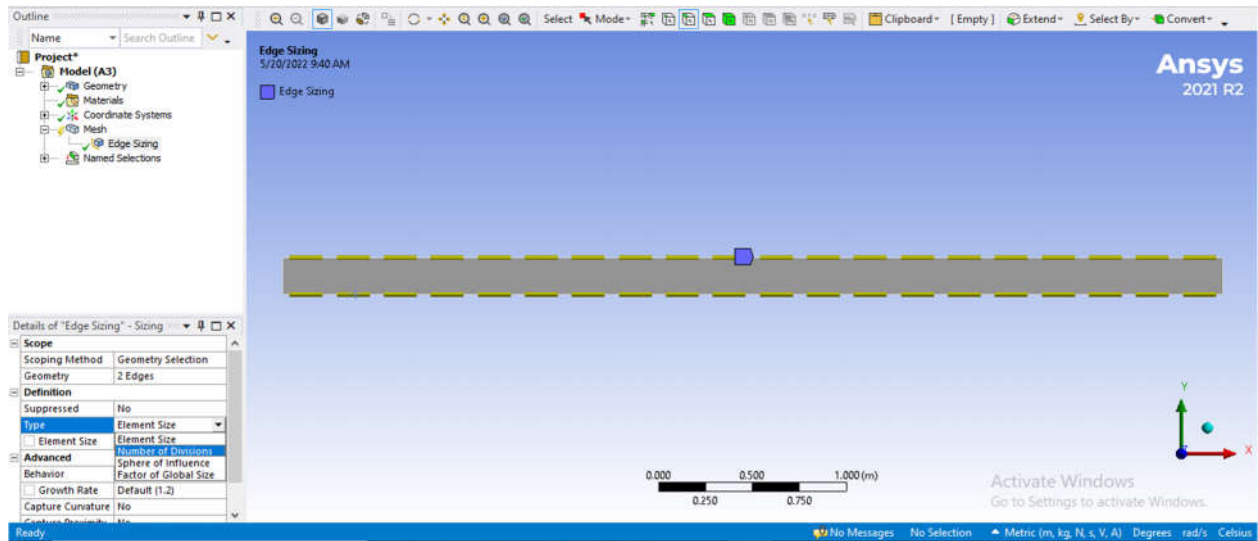


Fig. III -16 : diviser les sections supérieures et inférieures

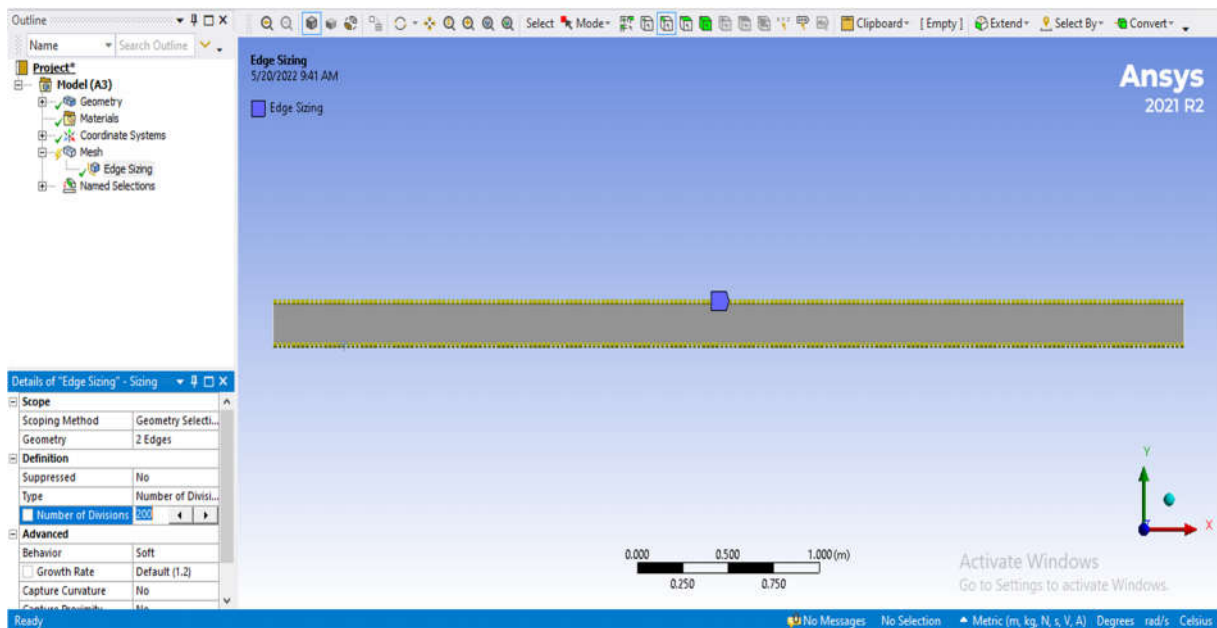


Fig. III -17 –choisir le nombre d'itération

Nous le divisons en 200 parties.

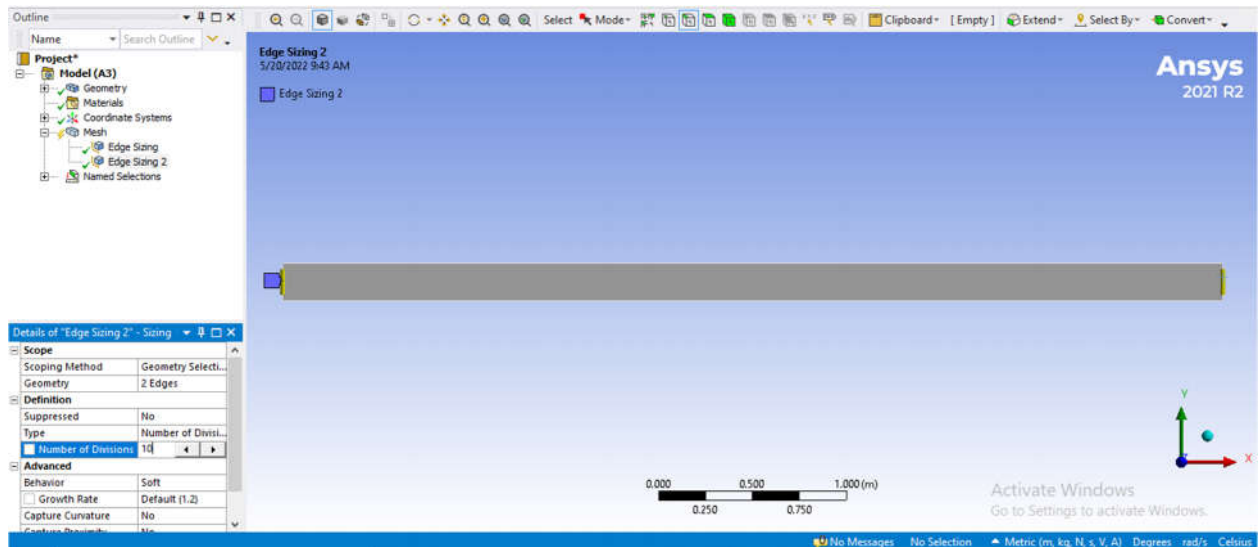


Fig. III -18 diviser les autres parties.

De la même manière, nous divisons les deux parties sur les côtés en 10 parties.

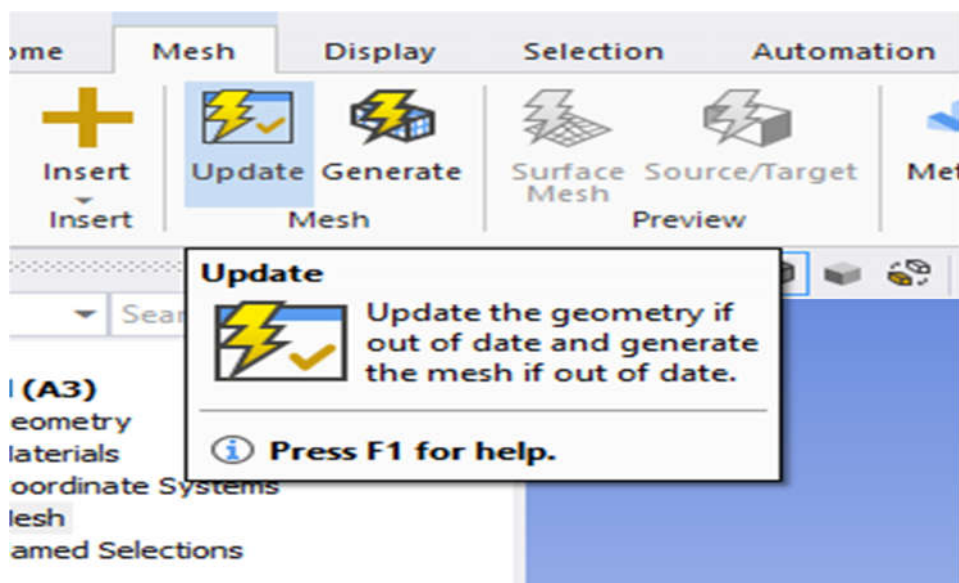


Fig. III 19: démarrer l'exécution du réseau sélectionné.

Ensuite, nous donnons la commande pour démarrer l'exécution du réseau sélectionné.

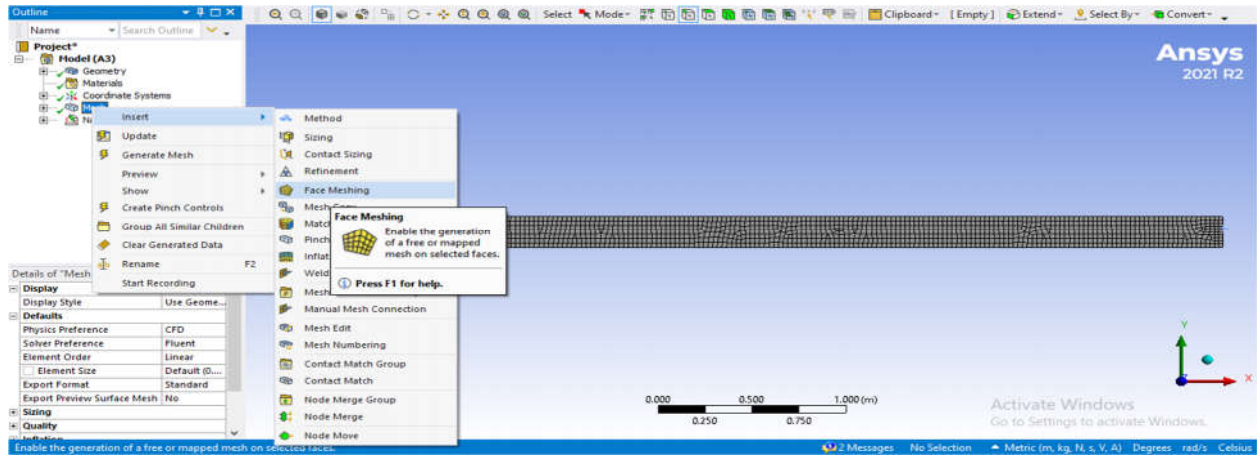


Fig. III -20 : modifier la connexion de réseau

Nous modifions la connexion réseau pour éviter l'enchaînement aléatoire des pièces, au moyen d'une icône face meshing.

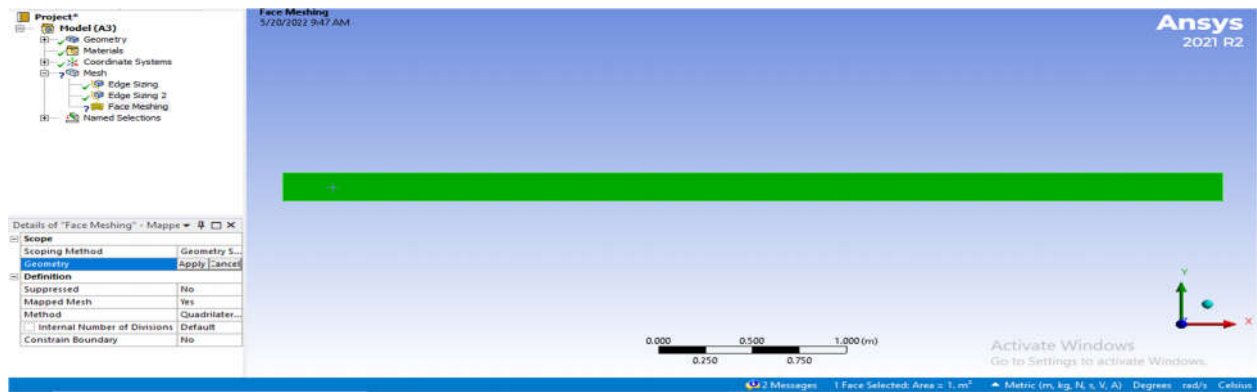


Fig. III -21 démarrer l'exécution du réseau sélectionné.

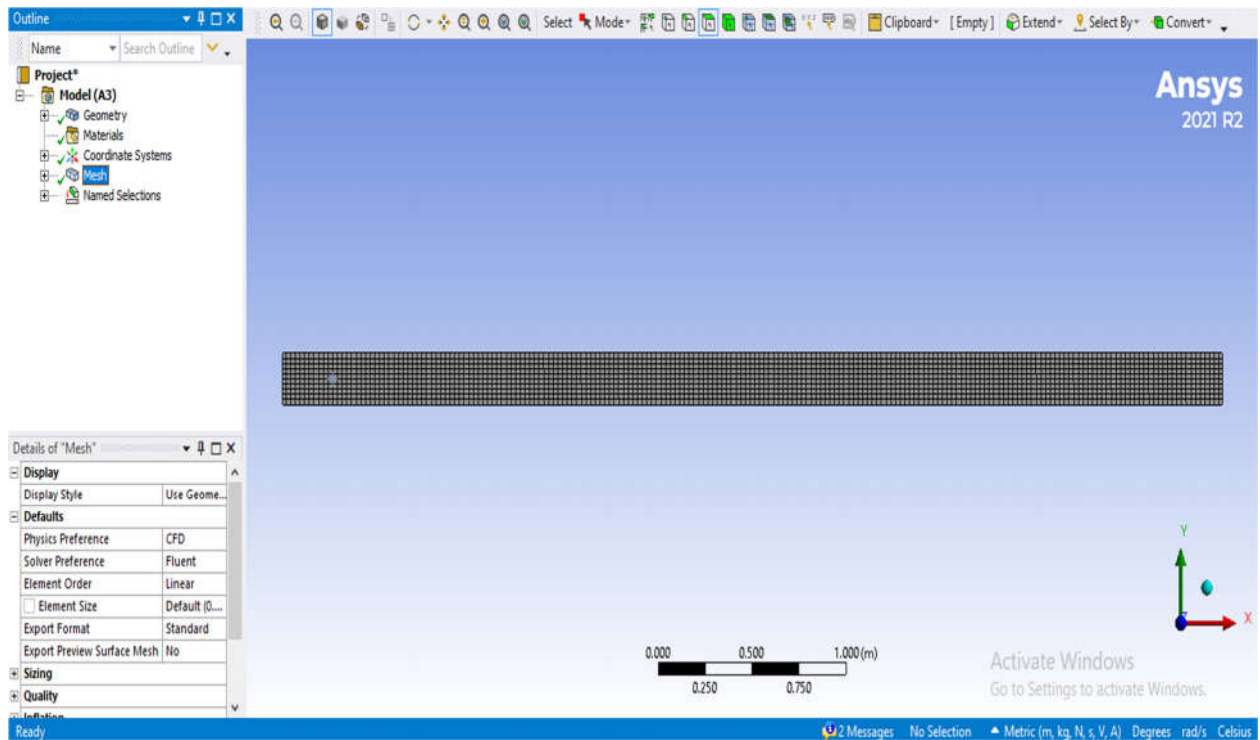


Figure III -22 terminer la deuxième étape

Ici se termine la deuxième étape de la modélisation

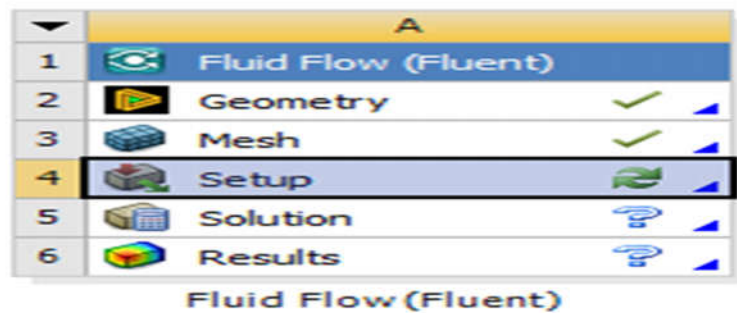


Figure III -23 l'étape Setup

On commence par la troisième étape en modélisant les caractéristiques de l'écoulement

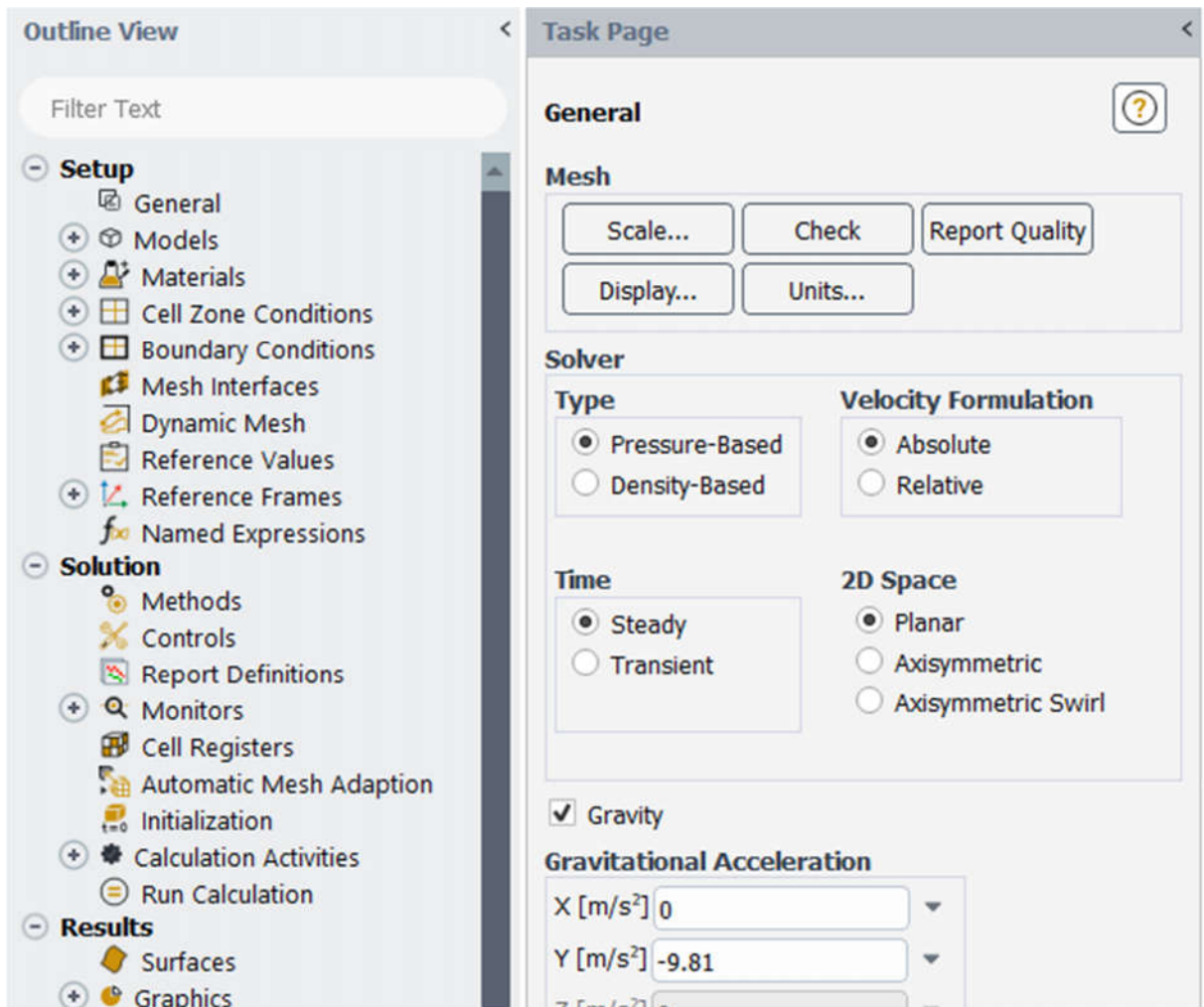


Figure III -24 modéliser les caractéristique d'écoulement

Nous déterminons les caractéristiques générales d'écoulement telles que la compressibilité, l'uniformité et autres

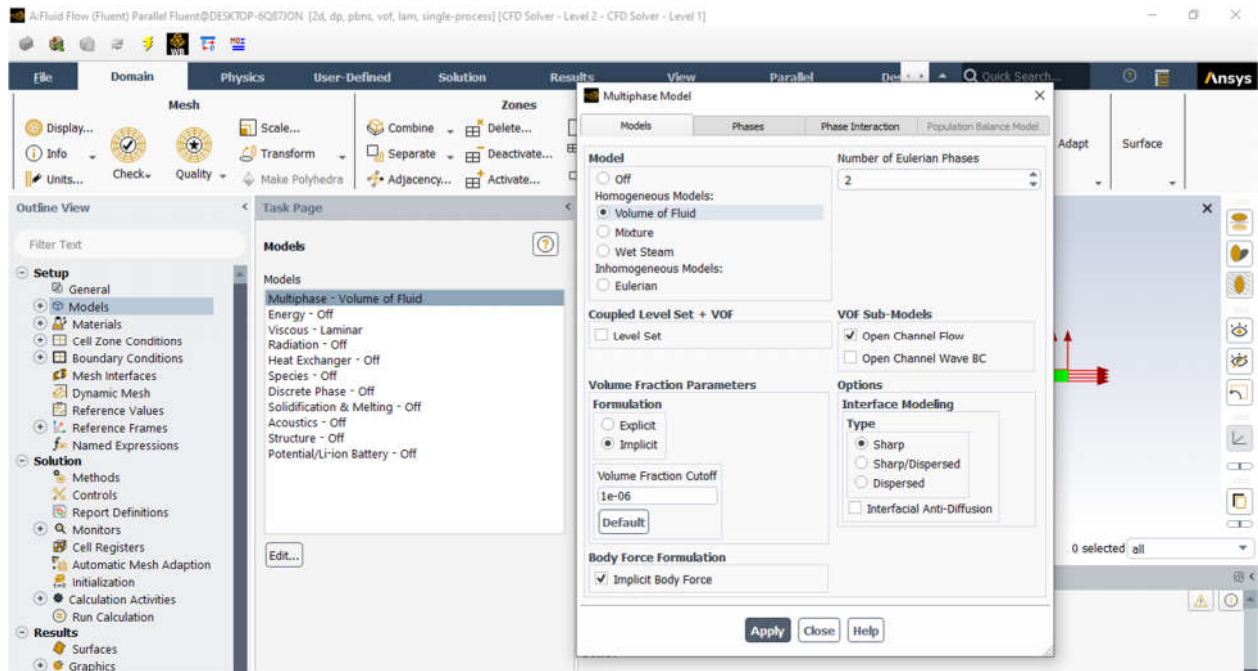


Figure III -25 sélectionner le volume de fluide

Nous ouvrons la fenêtre du modèle, sélectionnons le volume de fluide, puis spécifions les caractéristiques d'écoulement étudiées

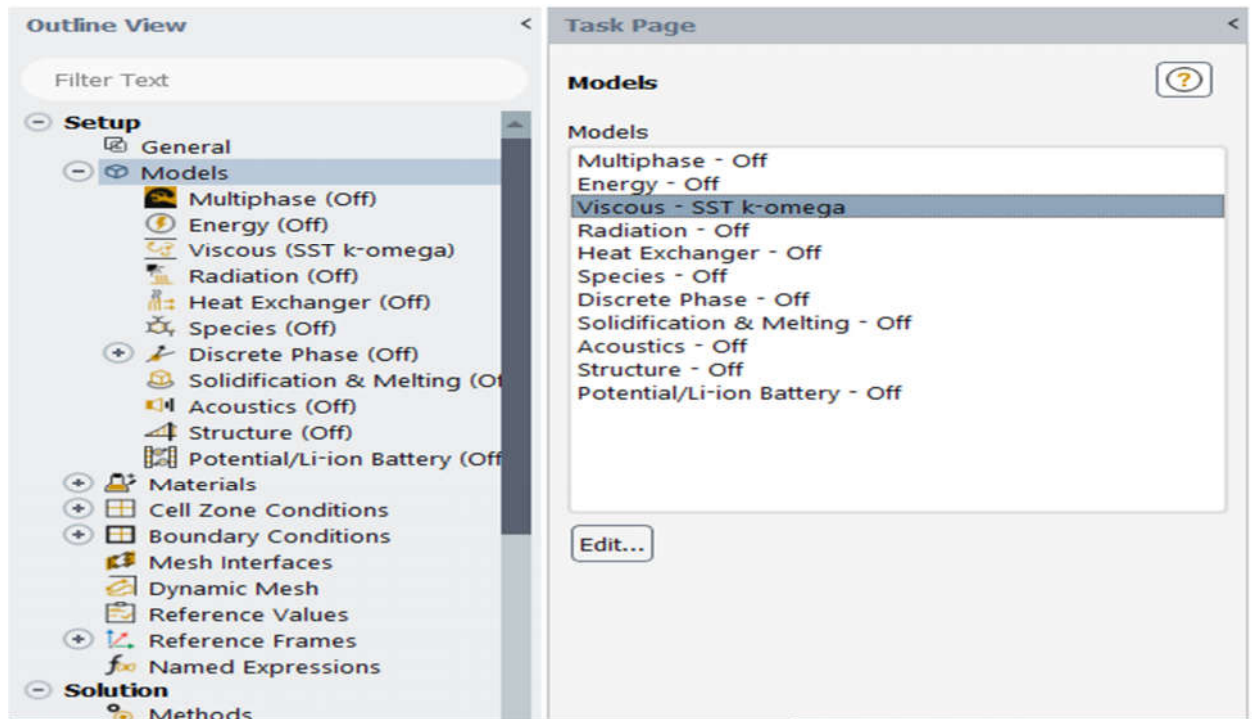


Figure III -26 modèles physiques.

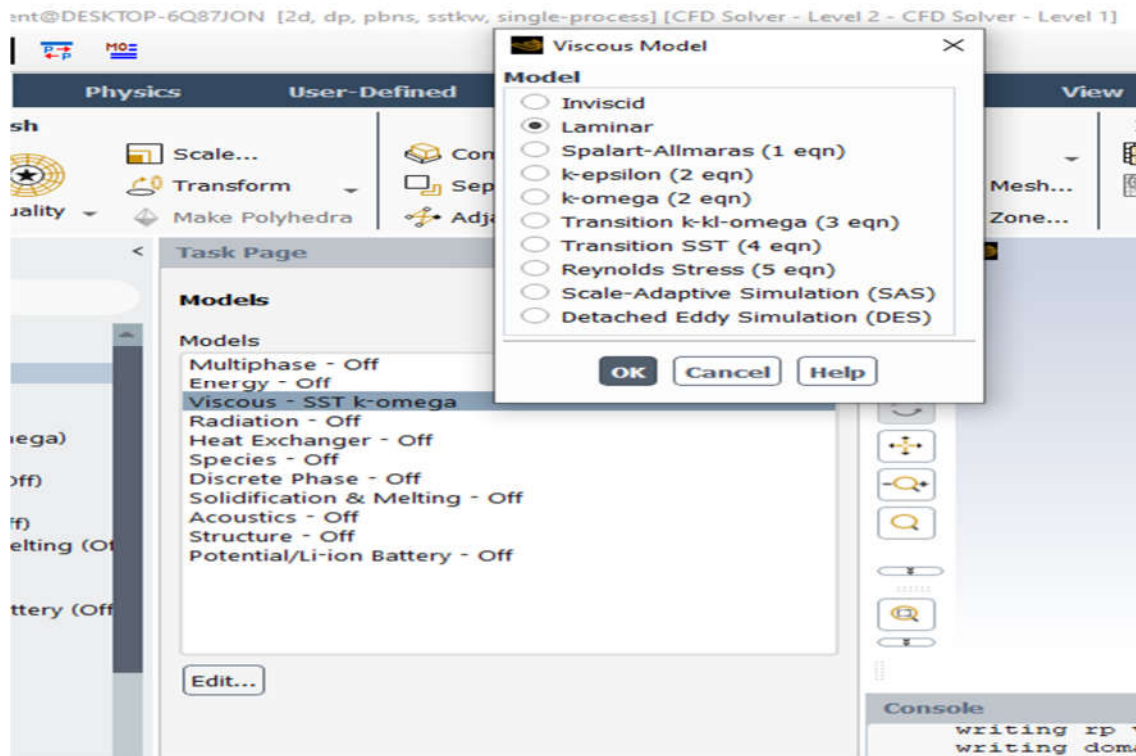


Figure III -27 viscous models "laminar"

Nous définissons le modèle de flux et ses propriétés

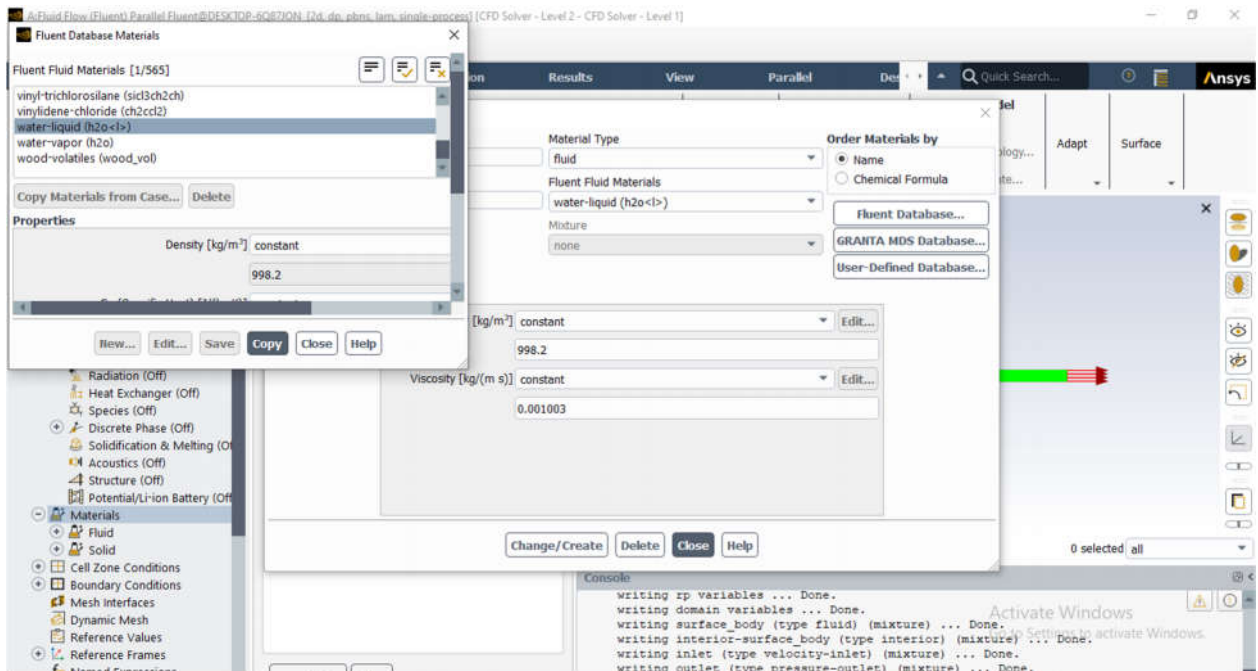


Figure III -28 le modèle de flux

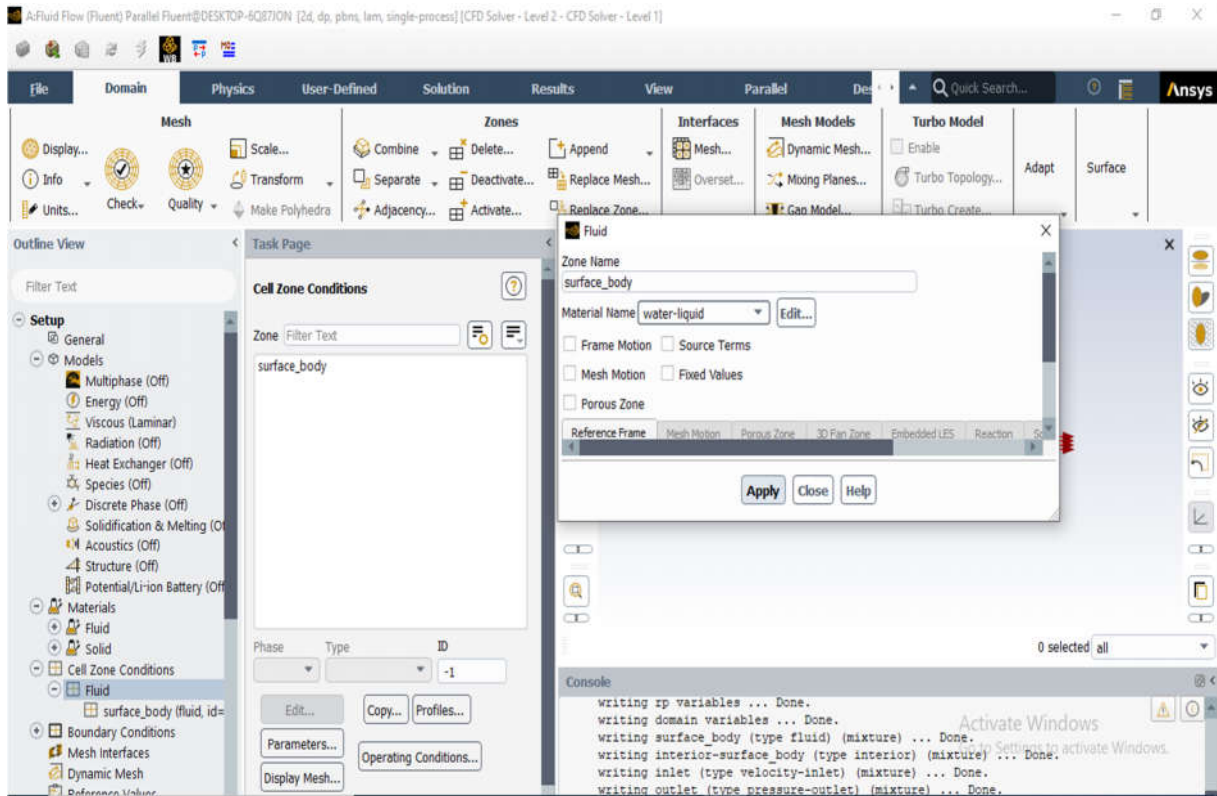


Figure III -29 les propriétés de modèle de flux

On choisit le fluide qu'on veut étudier dans cet écoulement

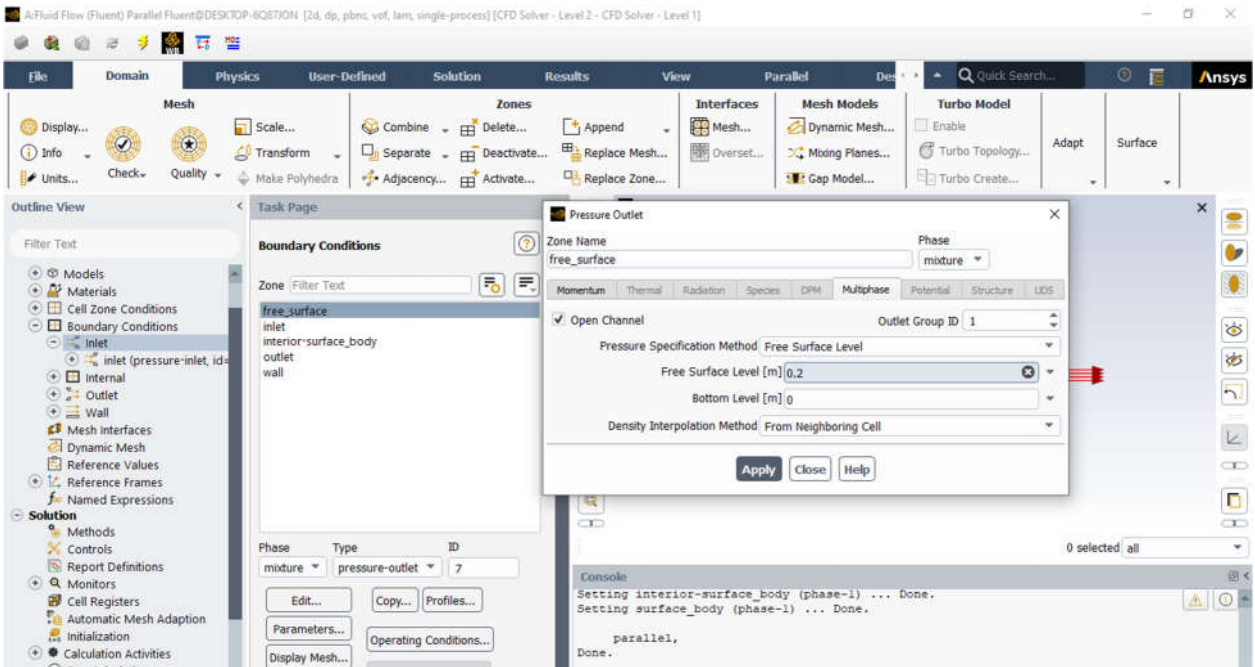


Figure III -30 choix de fluide

Nous définissons les conditions aux limites, commençons par la zone ouverte et

déterminons les niveaux de fluide les plus élevés et les plus bas dans le canal

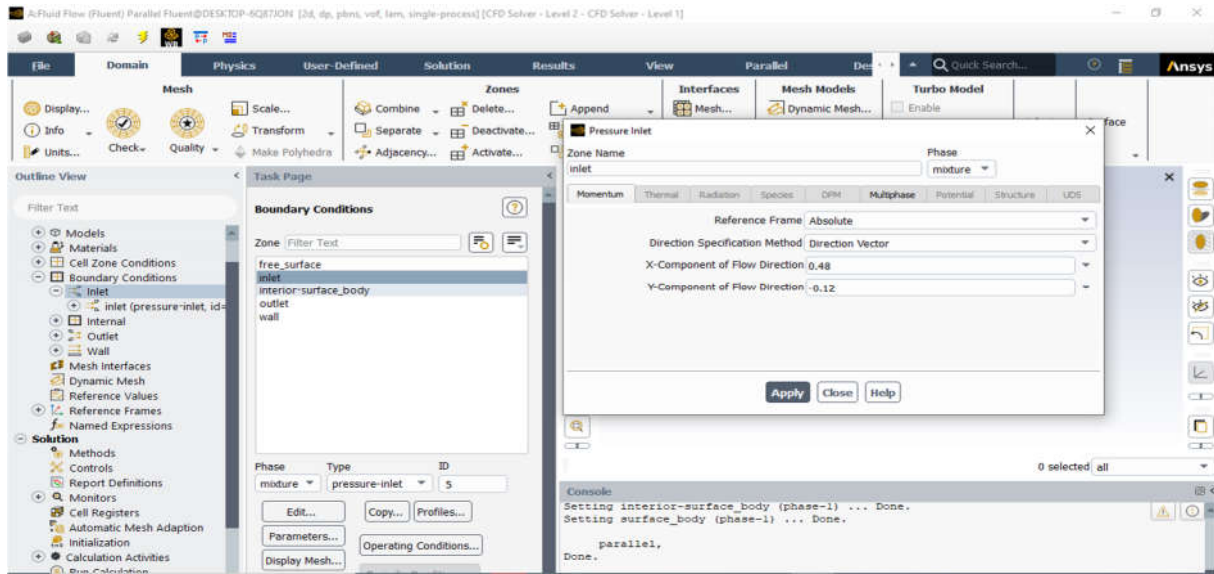


Figure III -31 –condition aux limites

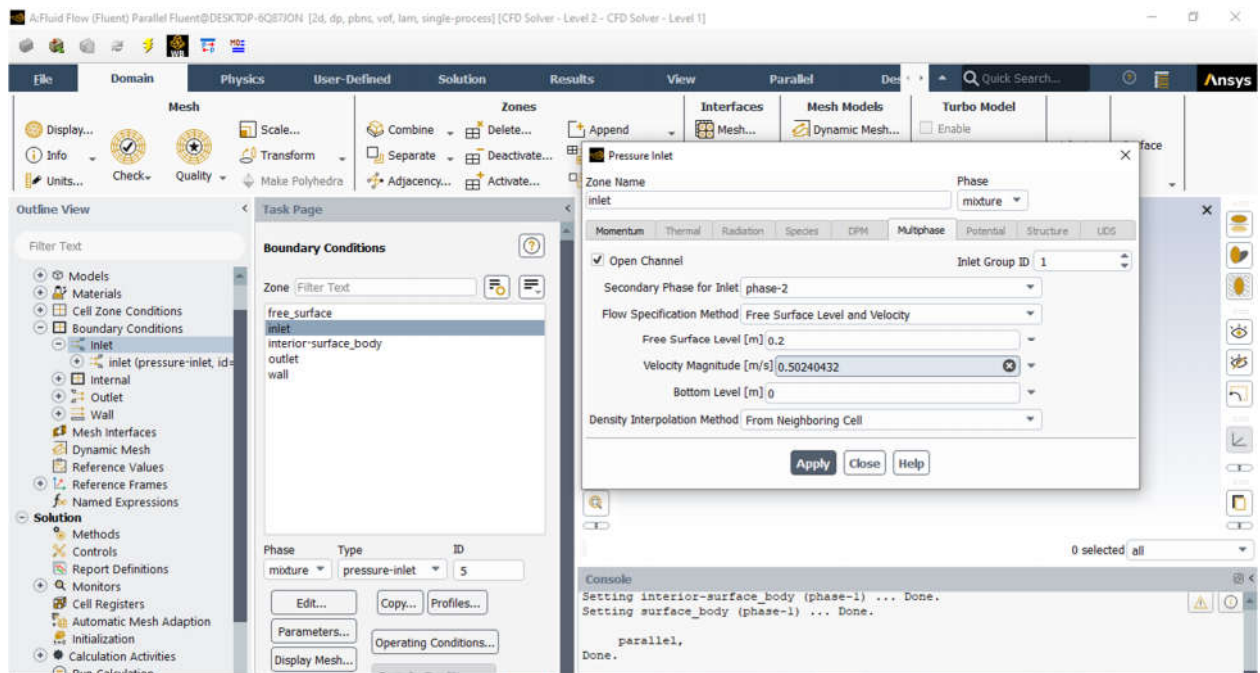


Figure III -32 –les valeur à la paroi

Ensuite on détermine les conditions aux limites à l'entrée du canal et on connaît la valeur de la vitesse par les coordonnées sur les axes x et y ( $U_x \cos \alpha$  et  $U_y \sin \alpha$ ), puis on donne la valeur de la vitesse réelle de l'écoulement

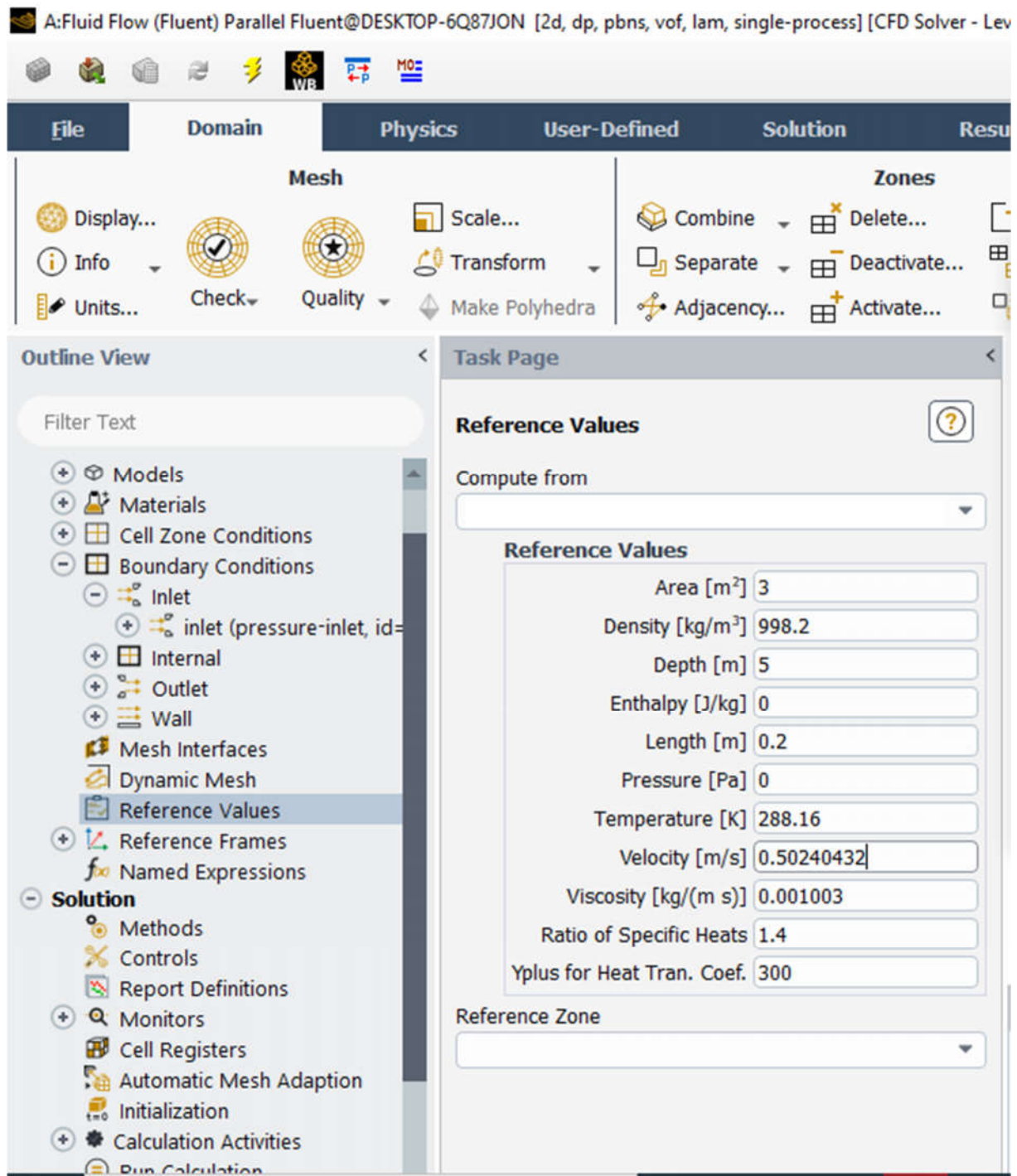


Figure III -33 – condition aux limites à l'entrée de canal

Valeurs de référence

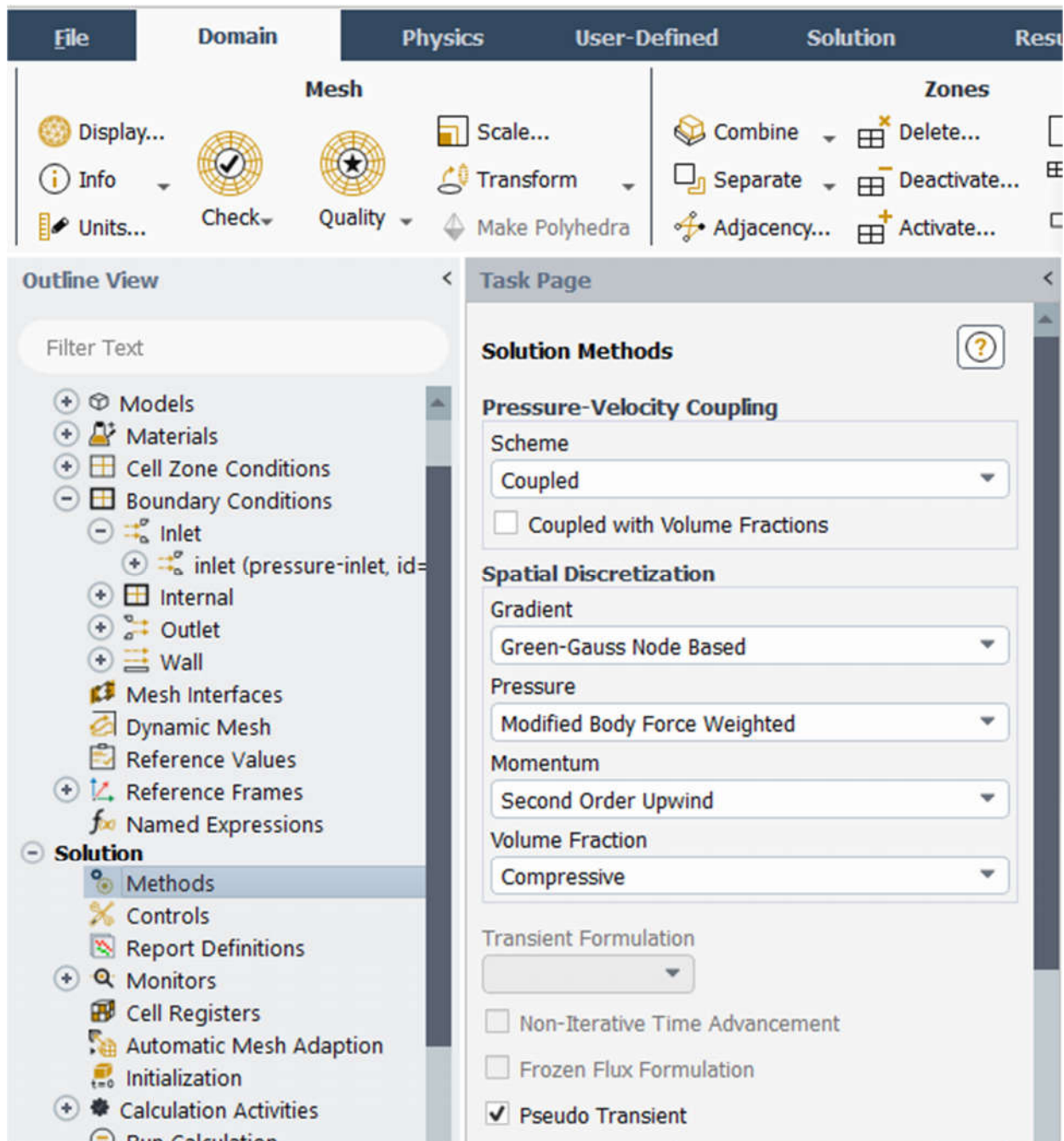


Figure III -34 valeur de référence

Nous définissons la méthode de résolution

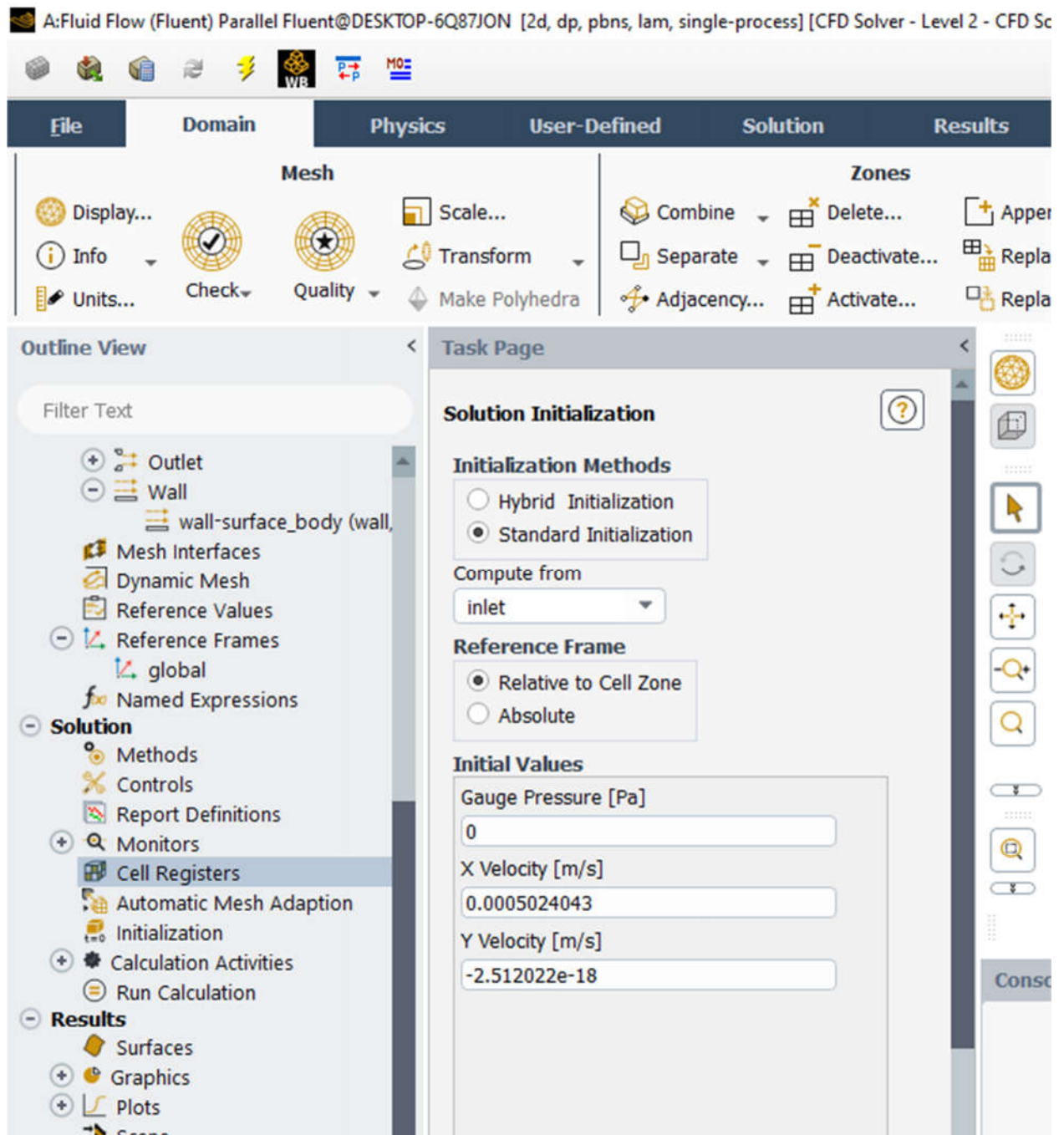


Figure III -35– définir la méthode de résolution

Nous définissons comment analyser la solution et la zone initiale

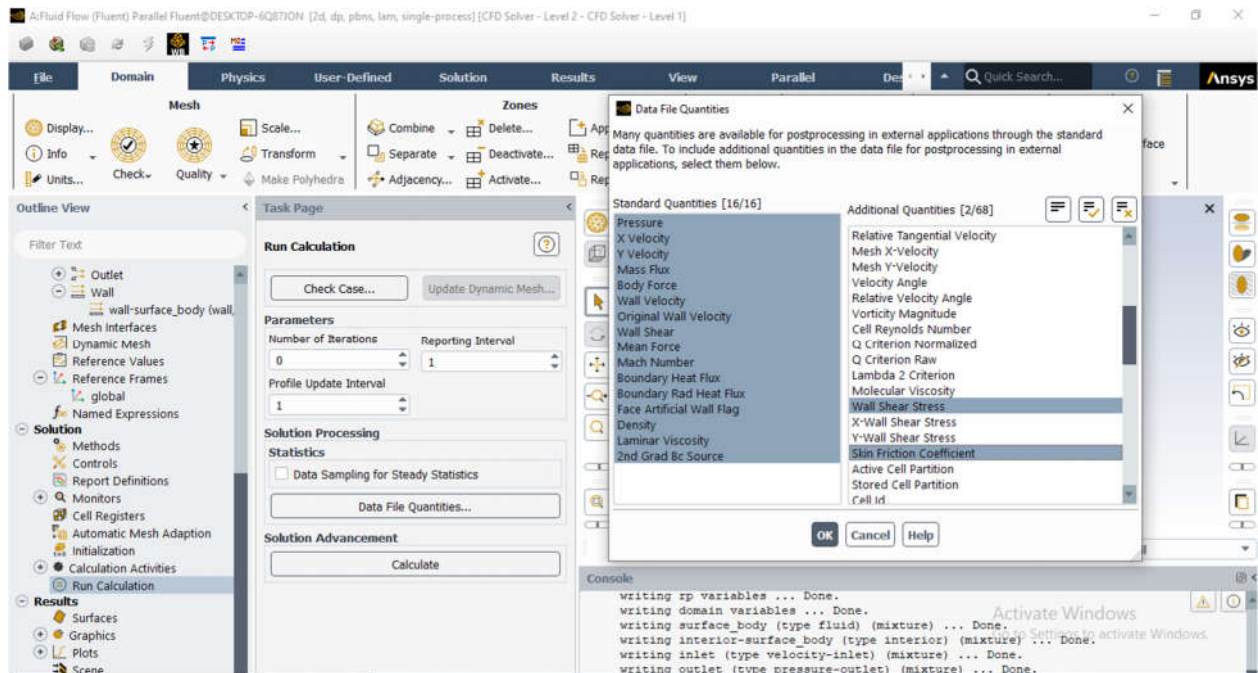


Figure III -36 –définir comment analyser la solution et la zone initial

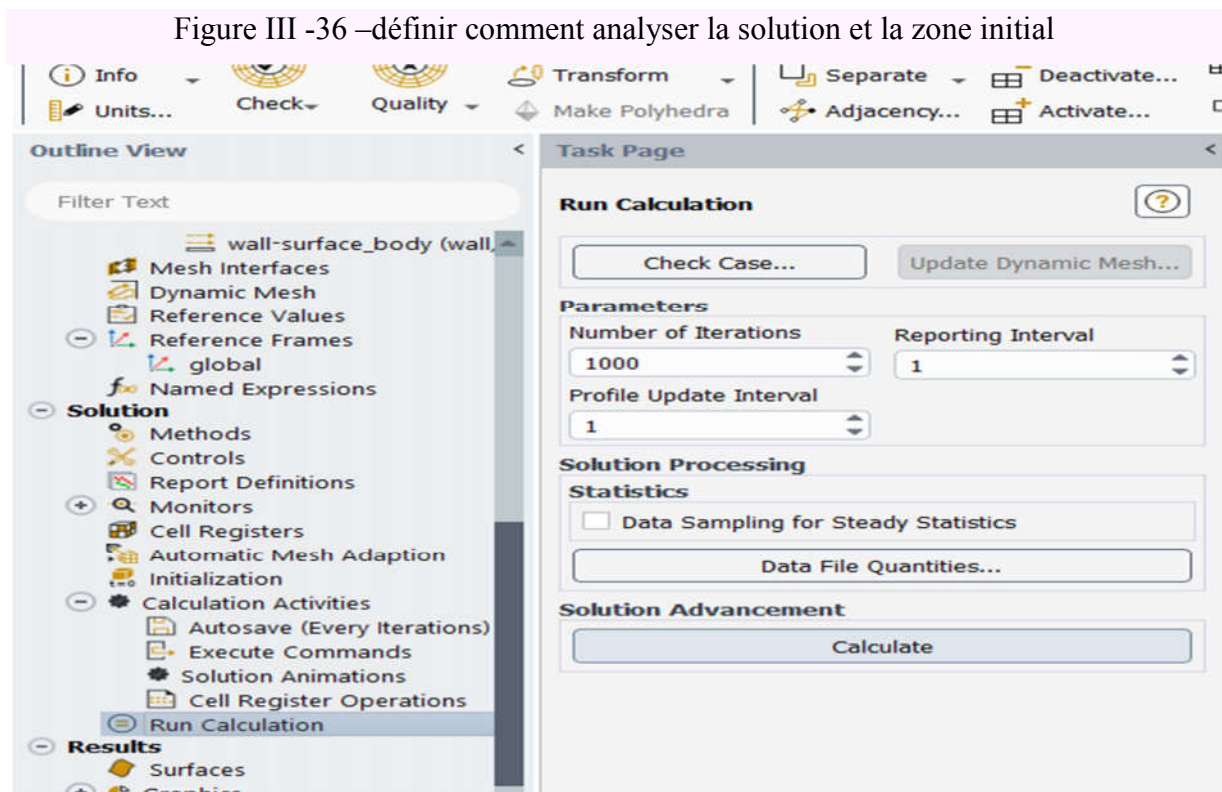


Figure III -37 run calculation

Nous donnons un ordre pour représenter le flux avec les caractéristiques que nous avons définies précédemment avec l'ajout de nouveaux types de résultats à utiliser dans notre étude

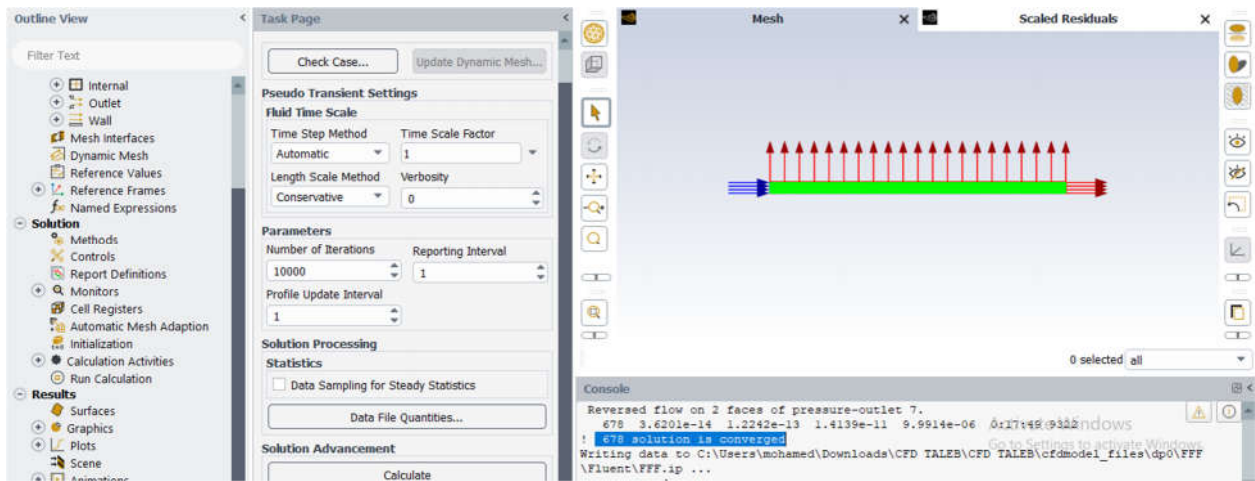
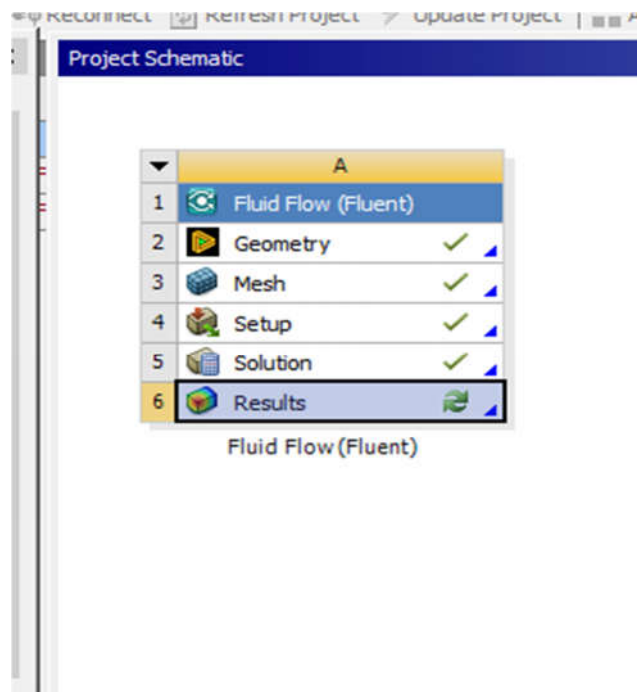


Figure III -38 représenter le flux

Ainsi, nous terminons la troisième étape de la modélisation

Dans la dernière étape ,Nous présentons et étudions les résultats

Figure III -39 l'étape "results"



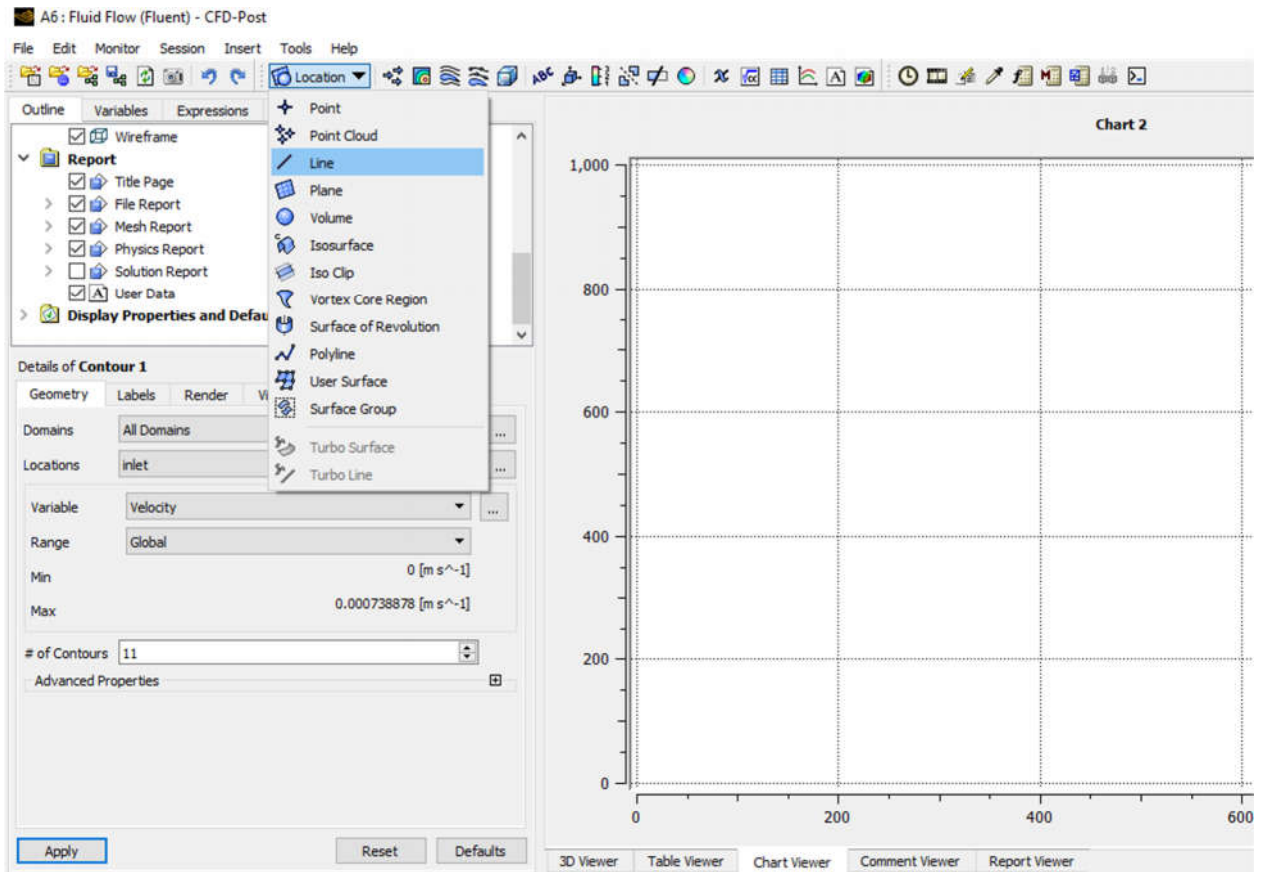


Figure III -40 assigne une ligne pour étudier les coordonnées

On assigne une ligne à étudier en précisant ses coordonnées

Ensuite, nous utilisons l'icône du graphique pour obtenir les courbes des valeurs que nous voulons étudier

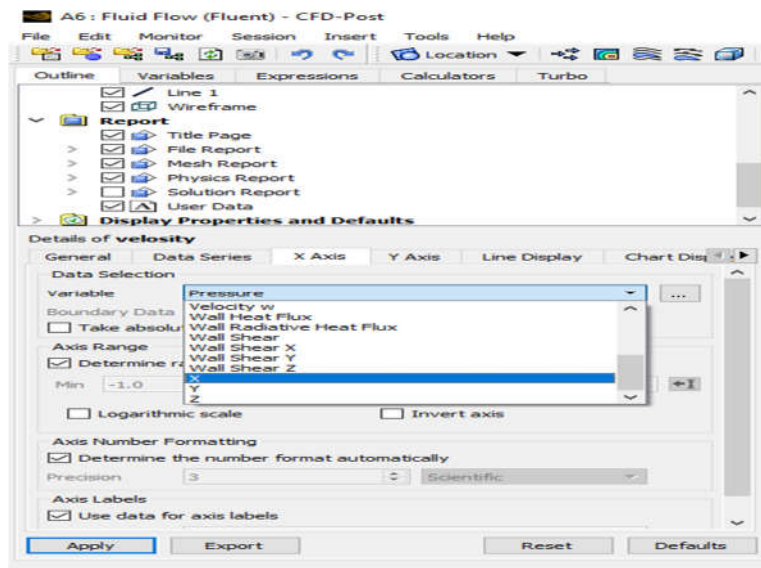


Figure III -41- choisir l'axe de entretoises

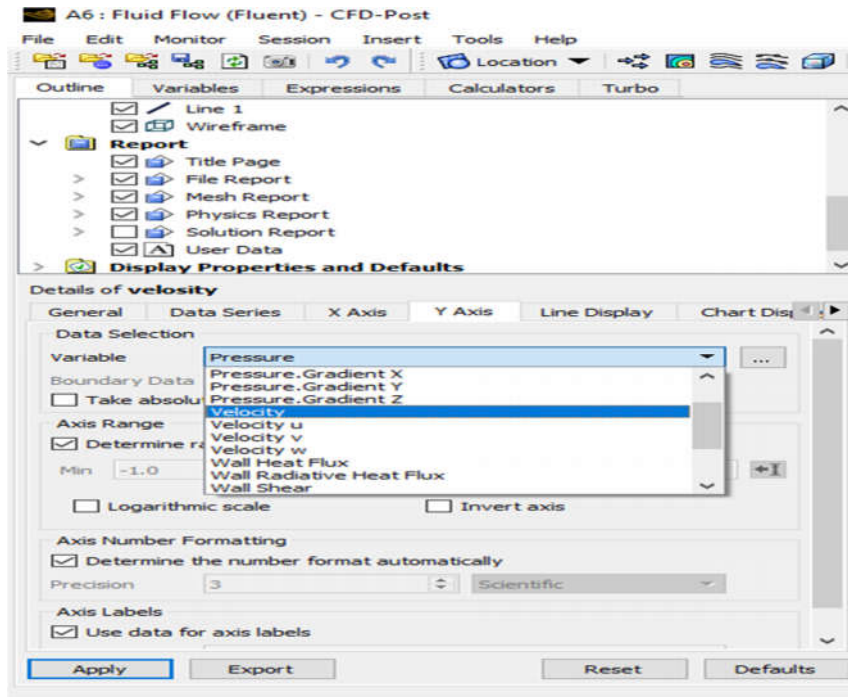


Figure III -42 choisir l'axe de disposition

Ensuite, nous déterminons les variables sur les axes x et y et commençons à étudier le changement de vitesse dans le tube

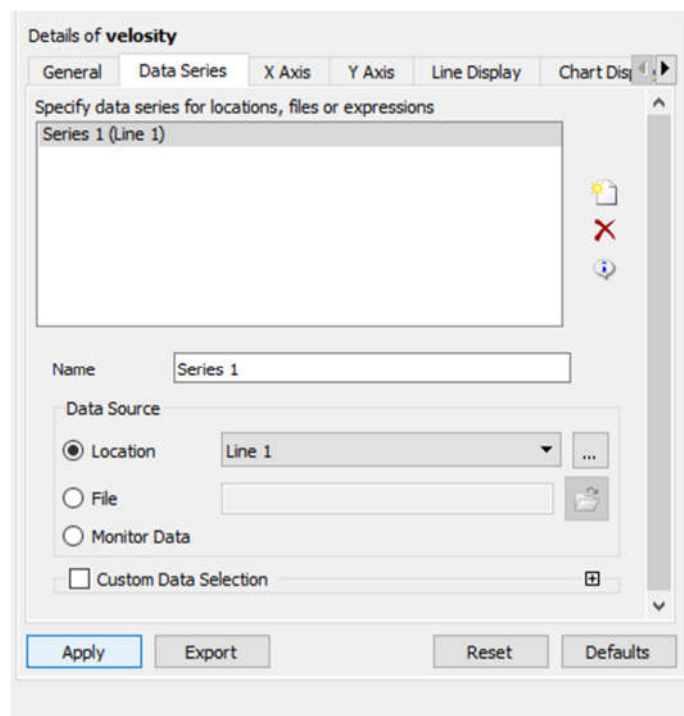


Figure III -43 –les détail de vitesse

Nous définissons la zone d'étude

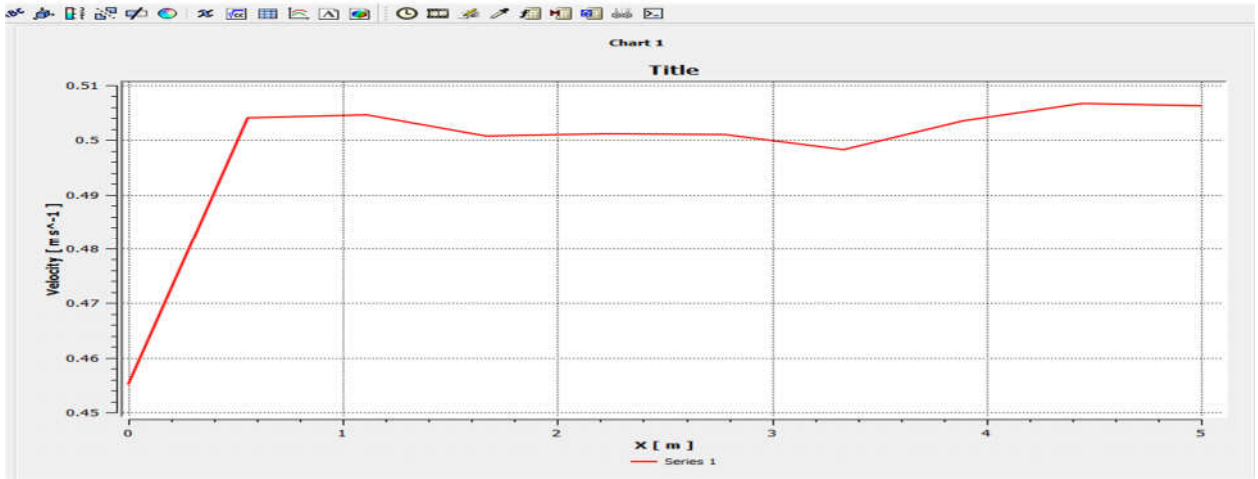


Figure III -44 le courbe de vitesse

Nous affichons la courbe

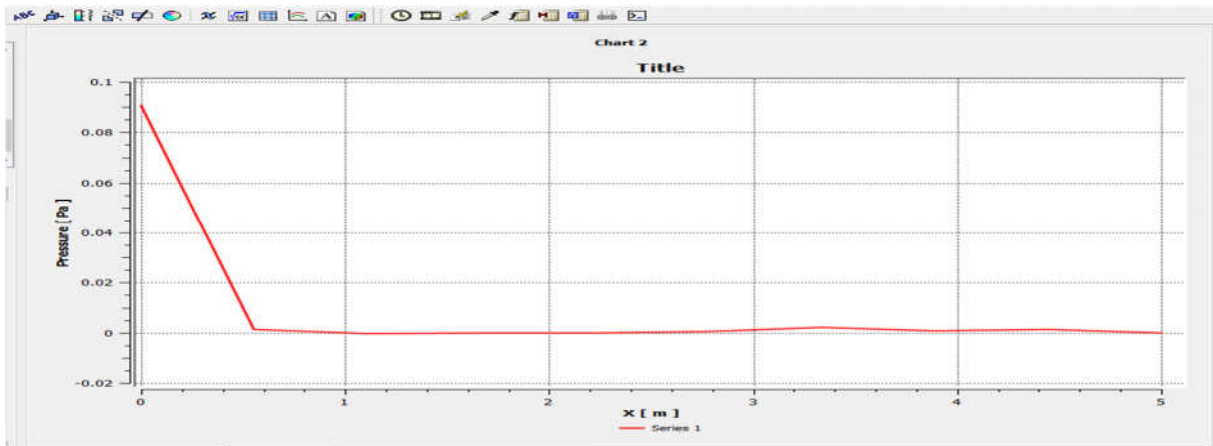


Figure III -45 le courbe de pression

De la même manière, on affiche la courbe de changement de pression dans le tube

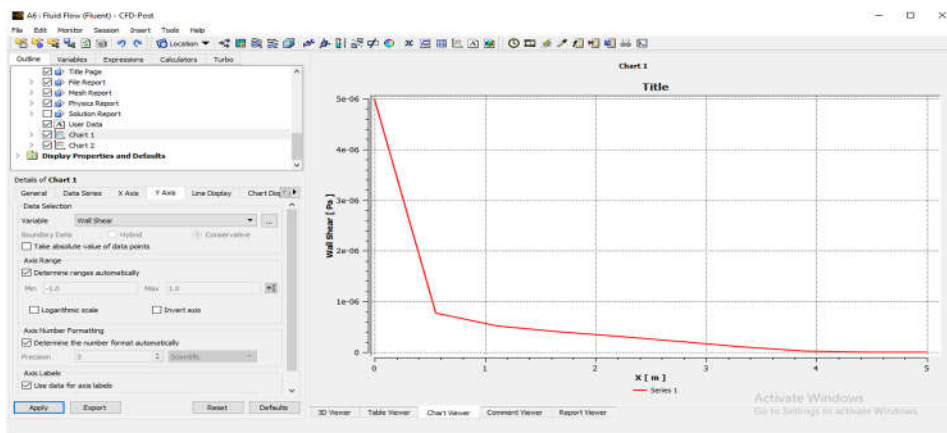


Figure III -46 le courbe de taux de cisaillement

De la même manière, nous affichons la courbe de changement de cisaillement de paroi dans le tube.

Les résultats obtenus :

Aux conditions aux limites :

a) Modification de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  :

	Vitesse (m/S)	Pression( $10^5 pa$ )
$\alpha = 15^\circ$	0.453	1.09
$\alpha = 30^\circ$	0.424	1.13
$\alpha = 45^\circ$	0	1.142

b) Changement du nombre de Reynolds :

	Vitesse (m/s)	Pression( $10^5 pa$ )
Re = 100000	0	1.13
Re= 200000	0	1.6

c) Changer le type de fluide :

	Vitesse (m/S)	Pression( $10^5 pa$ )
L'eau	0	1.6
L'air	0	121

2) Au milieu de canal :

a) Modification de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  :

	Vitesse (m/S)	Pression( $10^5 pa$ )
$\alpha = 15^\circ$	0.505	1
$\alpha = 30^\circ$	0.502	1
$\alpha = 45^\circ$	0.47	1

b) Changer le nombre de Reynolds :

	Vitesse (m/s)	Pression( $10^5 pa$ )
Re = 100000	0.47	1
Re= 200000	0.85	1

c) Changer le type de fluide :

	Vitesse (m/S)	Pression( $10^5 pa$ )
L'eau	0.47	1
L'air	11.9	1

# *Chapitre* IV

---

*Résultats et discussions*

---

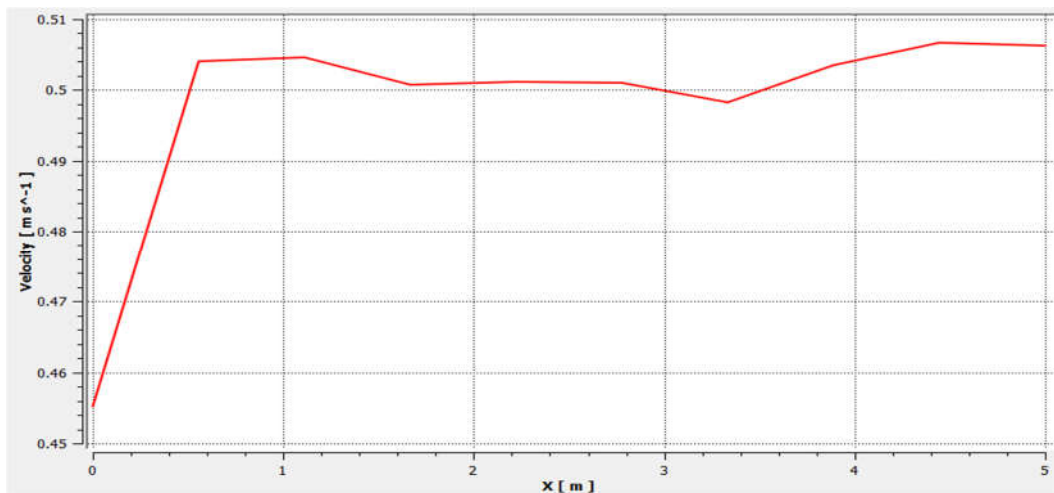


# Chapitre IV : Résultats et discussions

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les résultats de simulation effectuée par ANSYS Fluent. Dans un premier temps, on va valider nos résultats avec ceux de Chun et al. Ensuite, une étude paramétrique tenant compte de l'effet du nombre de Reynolds, de l'angle d'inclinaison et de l'effet du type de fluide sera établie et présentée.

## IV.2. Convergence "ANSYS FLUENT "



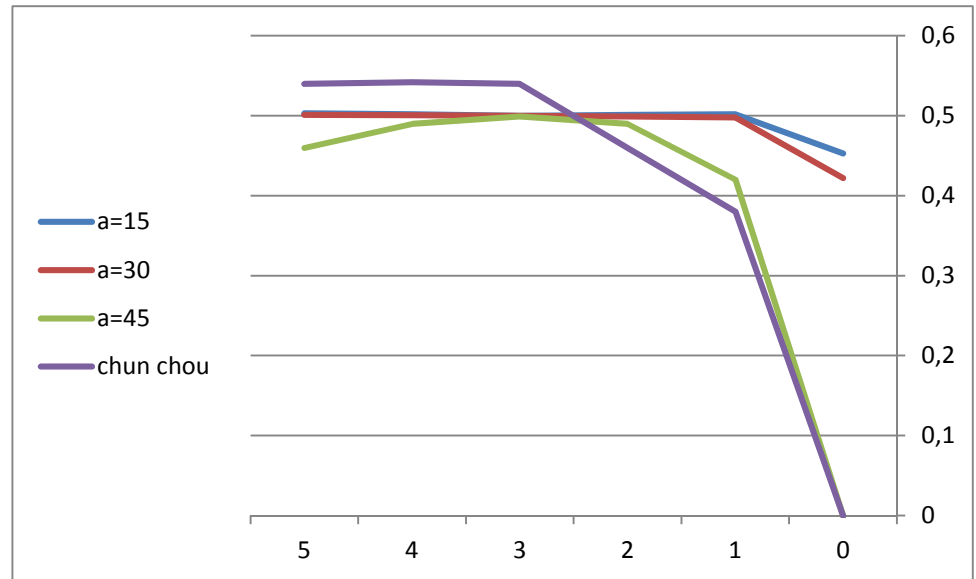
**Figure IV.1:** Distribution de vitesse en fonction de distance x

À un moment donné, la réponse du système converge vers une solution. Raffiner les mailles (ajouter des éléments supplémentaires) a peu ou pas d'effet sur la solution donc, le maillage est convergé.

## IV.3. Résultats, validation et discussion

Afin de valider les résultats de simulation, nous avons tracé de nos résultats avec les résultats de l'auteur ChuenYan Chow dans son livre 'an introduction to computational fluid mechanics' nous obtenons :

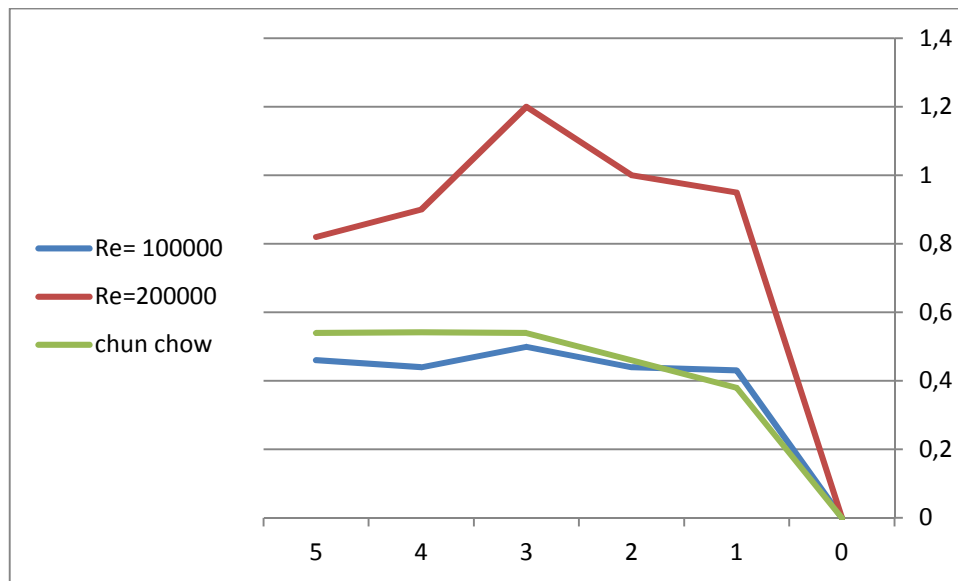
### IV.3.1. Effet de l'angle d'inclinaison $\alpha$ et validation des résultats:



**Figure IV.2:** Validation des résultats avec ceux de Chun et comparaison à différent angles d'inclinaison.

Nous remarquons sur les courbes que lorsque l'angle d'inclinaison était de  $45^\circ$ , la valeur de la vitesse était presque nulle, et lorsque la valeur de l'angle était de  $30^\circ$ , la valeur de la vitesse était de 0,4, et lorsque sa valeur était de  $15^\circ$ , sa valeur était de 0,4. Dans toutes les courbes, la vitesse augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur maximale alors qu'elle est au centre du canal car l'effet de la tension de cisaillement perd son effet lorsque la valeur de l'angle  $45^\circ$  atteint 0,47 et lorsque la valeur de l'angle était de  $30^\circ$ , il a atteint 0,50 et lorsque la valeur de l'angle  $15^\circ$ , a atteint 0,50 alors que Chuen yan chow l'a trouvé 0,54. Nos résultats de calcul sont en bons accords avec les résultats de la littérature. Ce qui donne une certaine fiabilité de la présente étude.

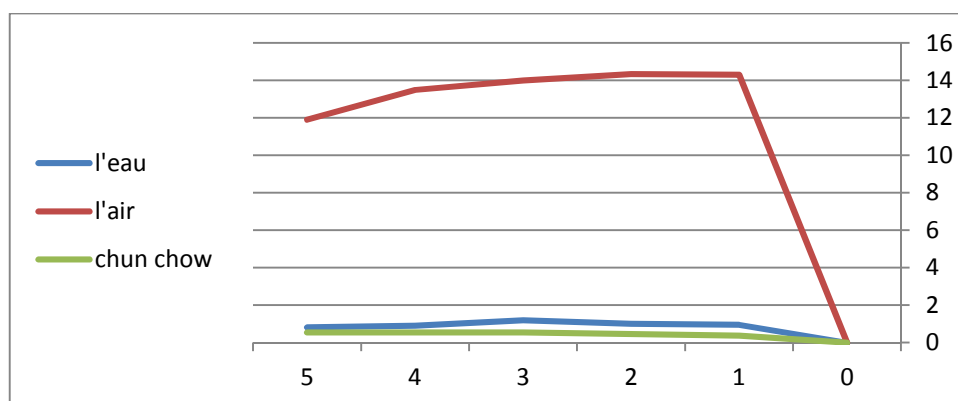
### IV.3.2. Effet de nombre de Reynolds



**Figure IV.3:** Comparaison de nos résultats avec ceux de Chun et comparaison à différents nombres de Reynolds.

A partir des résultats présentés à la figure ci-dessus, nous remarquons sur les courbes qu'au début toutes les vitesses étaient égales à zéro et ont commencé à augmenter progressivement jusqu'à atteindre leur valeur maximale. Lorsque le nombre de Reynolds était égal à 100 000, la valeur de la vitesse atteignait 0,46, et lorsque le nombre de Reynolds était de 200 000, la vitesse atteignit 0,82, tandis que Chun chow la trouva égale à 0,54, d'où le nombre de Reynolds choisi par Chun chow supérieur à 100 000 et inférieur à 200 000.

### IV.3.3. Effet de type de fluide



**Figure IV.4:** Comparaison de nos résultats avec ceux de Chun : effet de type de fluide.

A partir la figure IV.4, on peut voir que nos résultats avec les résultats de l'expérience de Chun chow pour l'eau sont en bon accord.

On voit sur toutes les courbes que toutes les vitesses au départ étaient nulles et cela est toujours dû à l'effet de la contrainte de cisaillement, mais au milieu du canal quand le fluide était de l'eau, la valeur maximale atteignait 0,82 et en l'expérience de Chun Chow atteignait 0,54 mais lorsque le fluide était de l'air, la valeur de la vitesse atteignait environ 12 et cela est dû au fait que la valeur de viscosité de l'air est très faible par rapport à l'eau, et c'est ce qui a conduit à cette grande différence dans les résultats

#### **IV.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, une étude paramétrique tient compte l'effet de nombre de Reynolds, l'effet de l'angle de l'inclinaison, et l'effet de fluide a été mise en place. Afin de valider les résultats numériques obtenus par le logiciel, des comparaisons avec les résultats disponibles dans la littérature ont été effectuées. D'une manière générale, nos résultats étaient en bons accords avec les résultats issus de la littérature.



*Conclusion générale*

## Conclusion générale

L'écoulement à surface libre occupe une place importante dans de nombreuses applications de la mécanique des fluides. Beaucoup de travaux de recherches expérimentales et numériques ont été réalisés afin de fournir le maximum d'informations sur les caractéristiques de cet écoulement. Une large gamme de méthodes a été développées pour résoudre mathématiquement ce phénomène.

Dans ce contexte, ce travail s'intéresse à étudier numériquement les caractéristiques de d'un écoulement à surface libre dans une canalisation ouverte inclinée d'un angle  $\alpha$ quelque. L'objectif principal est d'identifier l'effet de cette inclinaison sur les caractéristiques de l'écoulement. Pour ce faire, l'écoulement en question a été simulé numériquement en utilisant un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics), ANSYS-Fluent.

Une étude paramétrique tient compte l'effet de nombre de Reynolds, l'effet de l'angle de l'inclinaison, et l'effet de fluide a été mise en place. Afin de valider les résultats numériques obtenus par le logiciel, des comparaisons avec les résultats disponibles dans la littérature ont été effectuées. D'une manière générale, nos résultats étaient en bons accords avec les résultats issus de la littérature.

Comme perspectives liées à ce travail, il est recommandé d'effectuer une étude numérique plus avancée en utilisant des modèles de turbulence et des conditions plus réalistes afin d'éloigner de la théorie et rapprocher à la pratique et aussi pour mieux comprendre le champ dynamique de l'écoulement à surface libre il est suggéré d'effectuer une simulation transitoire.

---

## Références

- [1] A. Bouhelal, *Contribution à l'étude de l'écoulement autour d'un obstacle mince dans un intervalle de nombre de Mach:  $0 < M < 3$* , Mémoire de Master, Université de Biskra, 2014.
- [2] Y.A. Cengel, J.M. Cimbala, *Mécanique des fluides: fondements et applications*, De Boeck Supérieur 2017.
- [3] M. Ghodbane, B. Boumeddane, S. Largot, H. Berkane, *Etude numérique et validation des caractéristiques aérodynamiques d'écoulement autour des obstacles ovales en fonction des paramètres géométriques*, Revue des Energies Renouvelables 18(3) (2015) 493-502.
- [4] A. Bouhelal, A. Brima, C. Derfouf, N. Moumami, *Contribution à l'étude numérique de l'écoulement subsonique et transsonique autour d'un profil d'aile mince type NACA 0006*, LARHYSS Journal ISSN 1112-3680 (21) (2015) 217-232.
- [5] H. Schlichting, K. Gersten, E. Krause, *Boundary layer theory*, Third edition, Springer 1955.
- [6] H. Berkane, *Influence de l'effet thermique sur les caractéristiques de la couche limite laminaire sur une paroi lisse*, Mémoire de Magistère. Université de Biskra. 2005.
- [7] R. Ben Hamouda, *Notions de mécanique des fluides*, Centre de Publication Universitaire, Tunis 2008.
- [8] B. Raymod, *Manuel du Mécanicien et du Thermicien*, Editions Techip, Paris, 1977.
- [9] J. Gosse, *Mécanique des fluides*, Rapport technique: Technique de l'ingénieur-1995.
- [10] A. Fortin, *Analyse numérique pour ingénieurs*, Presses inter Polytechnique 2011.
- [11] G. Colomb, *Chapitre 1 : Convection forcée externe*, l'idée fixe du savant Cosinus, A. Colin 1965.
- [12] C.Y. CHUEN, *An introduction to computational fluid mechanics*. Séminome Publishing Company Boulder, Colorado, 1983

## Résumé :

Dans le présent travail une simulation numérique d'un écoulement laminaire bidimensionnel incompressibles d'un fluide traversant un canal incliné à section carrée. En utilisant un code de calcul ANSYS FLUENT qui modélise les caractéristiques de l'écoulement des fluides dans des géométries complexes et ont utilisé des mailles structurées.

La structure générale de l'écoulement a été obtenue pour la géométrie considérée.

L'étude confirme l'existence la force de gravité impacte sur le canal.

L'analyse des résultats obtenus a permis la compréhension le comportement de l'écoulement et les différents phénomènes dans le canal.

**Mots clé:** Flux laminaire 2D - Section carrée - Programme ANSYS FLUENT - Fluid Flow

## ABSTRACT:

In the present work a numerical simulation of incompressible two-dimensional laminar flow of a fluid passing through an inclined channel with a square section. using an ANSYS FLUENT calculation code which models the characteristics of fluid flow in complex geometries and using structured meshes

The general structure of the flow has been obtained for the geometry considered.

The study confirms the existence the force of gravity impacts on the channel.

The analysis of the results obtained allowed the understanding of the behavior of the flow and the different phenomena in the channel.

**Key works:** 2D Laminar Flow - Square Section - ANSYS FLUENT Program - Fluid Flow

## ملخص :

في هذا البحث، محاكاة عددية لتدفق رقائقي ثنائي الأبعاد غير قابل للانضغاط لسائل يمر عبر قناة مائلة

ذات مقطع مربع. باستخدام برنامج ANSYS FLUENT الذي يصوغ خصائص تدفق السوائل في

الأشكال الهندسية المعقدة واستخدام الشبكات المهيكلة، تم الحصول على الهيكل العام للتدفق من أجل الهندسة

التي تم النظر فيها، أكدت الدراسة وجود تأثيرات قوة الجاذبية على القناة، سمح تحليل النتائج التي تم الحصول عليها

بفهم سلوك التدفق والظواهر المختلفة في القناة.

الكلمات المفتاحية: تدفق رقائقي ثنائي الأبعاد - مقطع مربع - برنامج ANSYS FLUENT - تدفق السوائل