

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE BLIDA 1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Master en génie mécanique Spécialité : Installation Energétique et Turbomachine

Sur le theme:

**Etude d'un écoulement entre deux plaques.  
Application aux fluides non Newtonien**

**Promoteur :**

➤ Dr. Ali Benyahia Brahim

**Présenté par:**

❖ Harrouche Oussama  
❖ Ghrib Salah Eddine Djaber

Année universitaire : 2023/2024

## ***Remercîment***

Avant tout, nous tenons a remercié Dieu pour nous avoir donné le courage et la patience de mener ce modeste travail.

Nos remerciements les plus sincères vont à tout d'abord notre encadreur Dr. ALI BEN YAHIA nous le remercions de nous avoir encadrés, orienté, aidé, et conseillé

Nous voulons aussi remercier Mr le chef de département ainsi que tout le corps enseignant du département de Génie Mécanique qui ont contribuait dans notre formation.

Nos plus sincères reconnaissances aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Sans oublier nos parents qui nous ont accompagnées depuis le premier jour de notre scolarité, nous remercions tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à la finalisation de ce projet.

## **Résumer**

Une étude numérique a été réalisée pour analyser un écoulement laminaire entre deux plaques parallèles (Poiseuille Rayleigh-Bénard) avec la plaque inférieure chauffée et la plaque supérieure refroidie. L'objectif principal est d'évaluer la qualité de l'échange de chaleur pour un fluide newtonien et un fluide non-newtonien.

Les simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel Ansys-Fluent pour des valeurs du nombre de Reynolds comprises entre 20 et 300. Le modèle de loi de puissance a été utilisé pour les fluides non-newtoniens, permettant de capturer la variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement. Les résultats obtenus incluent les nombres de Nusselt moyens, qui indiquent l'efficacité du transfert de chaleur réalisé.

## **ملخص:**

تم إجراء دراسة عددية لتحليل جريان طبقي بين لوحين متوازيين (Poiseuille Rayleigh-Bénard) حيث يتم تسخين اللوح السفلي وتبريد اللوح العلوي. الهدف الرئيسي هو تقييم جودة تبادل الحرارة لسائل نيوتوني وسائل غير نيوتوني.

تمت عمليات المحاكاة باستخدام برنامج Ansys-Fluent لقيم عدد رينولدز تتراوح بين 20 و 300. تم استخدام نموذج قانون القدرة للسوائل غير النيوتونية، مما سمح بتحديد تغير اللزوجة وفقاً لسرعة القص. تشمل النتائج التي تم الحصول عليها أعداد نسلت المتوسطة، التي تشير إلى كفاءة نقل الحرارة المحققة.

## **Abstract:**

A numerical study was conducted to analyze laminar flow between two parallel plates (Poiseuille Rayleigh-Bénard) with the bottom heated plate and the top cooled plate. The main objective is to evaluate the quality of heat exchange for a Newtonian fluid and a non-Newtonian fluid.

The simulations were carried out using Ansys-Fluent software for Reynolds number values ranging from 20 to 300. The power-law model was used for the non-Newtonian fluids, allowing the capture of viscosity variation according to the shear rate. The obtained results include average Nusselt numbers, indicating the efficiency of the heat transfer achieved.

# Table des matières

Résumer	3
Introduction Générale :	1
<b>Chapitre 1 : Généralités sur la Rhéologie</b>	<b>3</b>
1.1. Introduction :	4
1.2. Définition :	4
1.2.1. Fluide :	4
1.2.2 Rhéologie :	4
1.2.3. La contrainte de cisaillement :	5
1.3. La viscosité :	6
1.3.1. La viscosité dynamique :	6
1.3.2. La viscosité cinématique :	7
1.3.3. Comportement visqueux des fluides :	8
1.4. Fluide Newtonien :	8
1.5. Fluide non-newtonien :	9
1.6.1. Fluide rhéofluidifiant :	10
1.6.2. Les fluides rhéoépaississants :	11
1.6.3. Les fluides à seuil :	11
1.6.4. Les modèles rhéologiques pour les fluides rhéofluidifiants.....	11
1.6.4.1. Lois de puissance :	12
1.6.4.2 Le modèle de Carreau-Yasuda :	13
1.6.4.3. Lois de cross :	13
1.6.4.4. Fluide de Bingham :	14
<b>Chapitre 2 : Etude bibliographique et l'état de l'art</b>	<b>17</b>
Etat de l'art	18
2.1. Introduction :	18
2.2. Définition :	19
2.3. Ecoulements non-newtoniens dans une conduite non-circulaire :	19

2.4. Instabilité Rayleigh-Bénard :	_____	<b>20</b>
2.5. La convection :	_____	<b>21</b>
2.6. Type de convection :	_____	<b>21</b>
2.7. Convection mixte :	_____	<b>21</b>
2.8. L'écoulement de Poiseuille-Bénard :	_____	<b>22</b>
2.9. Signification de nombres adimensionnels :	_____	<b>25</b>
2.9.1. Nombre de Grashof :	.....	26
2.9.2. Nombre de Prandtl :	.....	27
2.9.3. Nombre de Rayleigh :	.....	27
2.9.4. Nombre de Nusselt :	.....	28
2.9.5. Relations entre <b>Nu</b> et <b>Ra</b> pour l'écoulement de Rayleigh-Bénard:	.....	29
2.10. Types d'écoulement :	_____	<b>30</b>
2.10.1. Ecoulement laminaire :	.....	30
2.10.2. Ecoulement turbulent :	.....	31
<b>Chapitre 3 : Formulation mathématique et Méthodes de résolutions</b>	<b>___</b>	<b>32</b>
3.1. Introduction :	_____	<b>33</b>
3.2. Description de domaine d'étude :	_____	<b>33</b>
Figure 3.1 : Géométrie de domaine étudier	_____	<b>33</b>
3.3. Hypothèses de simplifications :	_____	<b>34</b>
3.4. Les équations gouvernantes	_____	<b>35</b>
3.4.1. Équation de continuité :	.....	35
3.4.2. Équations de quantité de Mouvement :	.....	35
3.4.3. Équation de conservation de l'énergie :	.....	35
3.5 L'écoulement de Rayleigh-Bénard:	.....	38
3.5. Méthodes des différences finies :	_____	<b>41</b>
3.5.1. Méthodes des éléments finis :	.....	41
3.5.2. Méthode des volumes finis :	.....	41

<b>Chapitre 4 : Résultats et discussions</b>	<b>42</b>
4.1. Introduction :	43
4.2. Interface de logiciel Ansys-Fluent	43
4.2.1. Création de la géométrie par Ansys-Fluent :	43
4.2.2. Maillage avec Ansys simulation :	44
4.2.3. L'effet de maillage :	44
4.2.4. Lancement de Fluent :	46
4.3 Fluide non-newtonien :	47
4.3.1 la contrainte de cisaillement :	47
4.3.2 Profil de vitesse :	50
<b>4.4 Le coefficient de frottement :</b>	<b>53</b>
4.4.1 Fluide non-newtonien :	53
4.4.2 Fluide Newtonien :	56
<b>4.6 le modèle de Rayleigh-Bénard :</b>	<b>58</b>
4.6.1 l'évolution de nombre de Rayleigh avec le nombre de Nusselt :	58
4.6.2 les contours donner par Ansys:	60
<b>Conclusion Générale</b>	<b>62</b>
<b>Conclusion :</b>	<b>63</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>66</b>

## Liste des figures

Figure 1.1 : schéma explicatif sur la contrainte de cisaillement.....	06
Figure 1.2 : écoulement de couette.....	07
Figure 1.3 : Organigramme des différents types de fluides non-newtoniens.....	08
Figure 1.4 : Rhéogramme de fluide non-newtonien.....	09
Figure 1.5 : exemple des fluides non Newtonien.....	10
Figure 1.6 : Rhéogramme de modelé de puissance.....	12
Figure 1.7 : Rhéogramme des fluides de bing Ham.....	14
Figure 1.8 : Rhéogramme de Herschel-Bulkley.....	15
Figure 1.9 : Relation contrainte/déformation dans un fluide non newtonien .....	16
Figure 2.1 : le phénomène de la convection mixte.....	22
Figure 2.2 : Ecoulement de poiseuille stratifié en température.....	24
Figure 2.3 : Ecoulement de rouleaux transversaux.....	25
Figure 2.4 : Ecoulement de rouleaux longitudinaux.....	25
Figure 2.5 : schématisation d'un écoulement laminaire dans une conduite.....	30
Figure 2.6 : schématisation d'un écoulement turbulent dans une conduite.....	31
Figure 3.1 : Géométrie de domaine étudié .....	33
Figure 3.2 : Modèle de l'écoulement de Poiseuille.....	34
Figure 3.3 : Hypothèses de simplification.....	34
Figure 3.4 : Schématisation de l'écoulement dans une conduite.....	36
Figure 3.5 : Géométrie etude.....	39
Figure 4.1 : surface d'esquisse.....	44
Figure 4.2 : Maillage de domaine de calcul.....	46
Figure 4.3 : Affichage des informations de maillage.....	46

Figure 4.4 : la variation de contrainte de cisaillement par rapport au taux de cisaillement.....	48
Figure 4.5 : la variation de taux de cisaillement par rapport au contrainte de cisaillement.....	49
Figure 4.6 : Le profil de vitesse d'un fluide loi de puissance.....	50
Figure 4.7 : Teste de convergence .....	51
Figure 4.8 : contour de vitesse.....	51
Figure 4.9 : Le profil de vitesse obtenu par ansys d'un fluide loi de puissance .....	52
Figure 4.10 : la variation de coefficient de frottement en fonction de nombre de Reynolds.....	55
Figure 4.11 : la variation de Re par rapport à Cf pour le fluide newtonien.....	56
Figure 4.12 : La variation de nombre de Reynolds pour un fluide newtonien.....	57
Figure 4.13 : Le coefficient de frottement pour un fluide newtonien.....	57
Figure 4.14 : Diagramme de Nombre de Rayleigh en fonction de nombre de Nusselt.....	59
Figure 4.15 : le contour de pression de Rayleigh-Bénard.....	60
Figure 4.16 : Le contour de température.....	60

### **Liste des tableaux :**

Tableau 4.1 : les résultats analytiques de Re et Cf pour l'indice de fluide $n=0.6$ .....	53
Tableau 4.2 : les résultats analytiques de Re et Cf pour l'indice de fluide $n=0.8$ .....	53
Tableau 4.3 : les résultats analytiques de Re et Cf pour l'indice de fluide $n=1$ .....	54
Tableau 4.4 : la variation de Re & Cf pour le fluide newtonien.....	56
Tableau 4.5 : la variation de nombre de Rayleigh en fonction de nombre de Nusselt.....	58

## Nomenclature

$Bi$	Nombre de Bingham
$D$	Diamètre
$dz, dy, dx \text{ et } dr$	Variations suivant $z, y, x$ et $r$ respectivement
$E_u$	Nombre d'Euler
$f$	Facteur de perte de charge
$F$	Forces
$g$	Gravité
$Hb$	Nombre de Herschel-Bulkley
$k, k'$	Consistances du fluide
$K_l$	Coefficient de perte de charge singulière
$L, h$	Longueurs
$m$	Constante de régularisation
$M$	Moment du couple
$N$	Nombre de point
$n$	Indices de fluide
$Q$	Débit du fluide
$R, r$	Rayons
$R_1 \text{ et } R_2$	Rayons intérieur et extérieur respectivement
$rc$	Rayon critique
$Re$	Nombre de Reynolds

$S$	Surface
$t$	Temps caractéristique
$T$	Coefficient de corrélation de Teil
$Tu$	Taux de turbulences
$u$	Vitesse locale
$u'$	Fluctuation de vitesse
$U_m$	Vitesse moyenne
$V_{max}, U_{max}$	Vitesse maximale

### **Les lettres grecques**

$\tau$	Contrainte de cisaillement
$\tau_c$	Contrainte seuil
$\tau_p$	Contrainte pariétale
$\gamma$	Tenseur de déformation
$\dot{\gamma}$	Tenseur du taux de cisaillement
$\gamma\dot{p}$	Taux de cisaillement pariétal
$\rho$	Masse volumique du fluide
$\mu$	Coefficient de viscosité
$\mu_r$	Viscosité relative
$\mu_{sp}$	Viscosité spécifique
$\mu_s$	Viscosité du fluide solvant
$\mu_d$	Viscosité différentielle

$\mu_0, \mu_\infty$	Viscosités newtoniennes initial et final respectivement
$\mu_p$	Viscosité plastique
$\nu$	Viscosité cinématique
$\eta$	Viscosité apparente
$\eta_c$	Viscosité apparente de la conduite
$\Delta P$	Gradient de pression
$\omega$	Vitesse angulaire
$\alpha$	Angle
$\sigma$	Ecart type
$\theta$	Température adimensionnelle $(T-T_i) k / (qh)$
$\Delta\theta$	Différence de température entre les plaques chaudes et froides (K)

### **Abréviations et symboles**

<i>CVD</i>	Chemical vapor déposition (dépôts de vapeur chimiques)
<i>PRB</i>	Écoulement de Poiseuille-Rayleigh-Bénard
<i>2D</i>	Bidimensionnel
<i>3D</i>	Tridimensionnel

## Introduction Générale

La rhéologie est une branche fascinante de la science qui étudie le comportement déformable et fluide de la matière. Ce domaine interdisciplinaire explore comment les matériaux se déforment et coulent sous l'influence de contraintes et de forces. De la peinture et des aliments aux polymères et aux fluides complexes comme le sang, la rhéologie joue un rôle crucial dans la compréhension et la conception de nombreux produits et processus industriels.

En examinant la manière dont les matériaux se comportent lorsqu'ils sont soumis à des contraintes, la rhéologie nous permet de prédire et de contrôler leur performance dans diverses applications. En effet, elle est essentielle dans des domaines aussi variés que l'industrie pharmaceutique, l'ingénierie des matériaux, la géophysique et même la médecine.

Domaine dynamique et complexe ne se limite pas à l'étude des fluides simples ; il englobe également les matériaux viscoélastiques et non newtoniens, ainsi que les phénomènes de fluage et de rupture. Ainsi, la rhéologie offre des outils précieux pour modéliser et optimiser des processus industriels, améliorer la qualité des produits et développer de nouvelles technologies.

L'étude des écoulements de fluides non newtoniens constitue un domaine crucial de la rhéologie moderne, offrant un aperçu complexe et fascinant du comportement des fluides dans des conditions variées. Contrairement aux fluides newtoniens, tels que l'eau ou l'huile, dont la viscosité reste constante indépendamment de la contrainte appliquée, les fluides non newtoniens montrent une réponse visqueuse qui dépend de la contrainte ou de la vitesse de déformation.

Ces fluides se retrouvent dans de nombreuses applications pratiques, allant des cosmétiques et des peintures aux suspensions industrielles et aux fluides biologiques comme le sang et le mucus. Comprendre leur comportement est essentiel pour optimiser les processus de fabrication, améliorer les performances des produits et développer de nouvelles technologies.

L'étude des écoulements de fluides non newtoniens nécessite des modèles mathématiques avancés et des techniques expérimentales sophistiquées. Elle permet de caractériser précisément des phénomènes tels que la thixotropie (variation de viscosité avec le temps), la rhéopexie (variation de viscosité avec la vitesse de cisaillement) et d'autres comportements viscoélastiques complexes.

En explorant les mécanismes qui régissent ces écoulements, les chercheurs en rhéologie contribuent à de nombreux domaines, de l'industrie et de l'ingénierie aux sciences médicales et alimentaires. Cette étude continue de repousser les frontières de la compréhension scientifique et de l'application technologique, jouant un rôle crucial dans l'innovation et le développement durable à travers le monde.

Notre travail est basé sur l'étude d'un écoulement de fluide non-newtonien entre deux plaques planes avec une plaque inférieure chauffée dans certains temps d'expérience pour aborder des résultats plus précis à propos de nombre de Nusselt et Rayleigh Bénard et la variation de nombre de Reynolds.

Notre mémoire se compose de quatre chapitres,

- Le premier chapitre aborde des généralités sur la rhéologie et quelques définitions.
- Le deuxième chapitre est basé sur l'état de l'art avec l'équation de quantité de mouvement et des équations de continuité
- Le troisième chapitre introduit des équations alternatives et les équations gouvernantes et les équations établies dans notre expérience, comme nous l'avons mentionné
- Le quatrième chapitre présente nos résultats et discussion qui contiennent des graphes et des tables de résultats.

# **Chapitre 1 : Généralités sur la Rhéologie**

## 1.1. Introduction

Les fluides complexes, ayant une structure interne à une échelle entre le niveau moléculaire et macroscopique, présentent des caractéristiques intermédiaires entre un fluide simple et un solide élastique. Leur taille microscopique confère des propriétés particulières à l'échantillon. Ces fluides sont utilisés dans divers secteurs industriels, comme l'exploitation pétrolière avec les boues de forage, l'industrie alimentaire, cosmétique et pharmaceutique, ainsi que dans la fabrication de polymères fondus et de pâtes à papier, en raison de leurs propriétés uniques.

## 1.2. Fluide et Rhéologie

### 1.2.1. Fluide

Un fluide est un ensemble de molécules non liées entre elles, sans liaisons covalentes et qui peuvent soit glisser librement les unes sur les autres, ce qui donne un fluide à l'état liquide, soit se déplacer indépendamment par rapport aux autres, ce qui donne un fluide à l'état gazeux. La complexité de ces derniers a donnée naissance à une branche très importante de la physique (La mécanique des fluides).

Il y a deux types de fluides : les fluides newtoniens et les fluides non-newtoniens.

La mécanique des fluides est quelque chose de très compliqué, et dans ce PFE nous avons décidé de parler principalement d'une branche de la mécanique des fluides, les fluides non newtoniens. Pour mieux aborder l'idée de fluides non newtoniens nous avons décidé d'expliquer tout d'abord ce qu'est un fluide newtonien pour mieux expliquer la différence entre ces derniers et les fluides non-newtoniens.

### 1.2.2 Rhéologie

L'existence des matériaux qui ont un comportement intermédiaire entre le solide élastique parfait et le fluide Newtonien rend leur étude par les deux mécaniques classiques (des solides et des fluides) erronée. Pour cela, une nouvelle discipline est née, dite la rhéologie. Le terme " rhéologie " a été proposé pour la première fois par Eugene Cook Bingham en 1928.

La rhéologie est la science de l'écoulement (rhéo= couler, logos = étude) et de la déformation des matériaux sous l'effet d'une contrainte, Elle a pour objet d'analyser les comportements mécaniques des substances et d'établir leurs lois de comportement. La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

- rhéologie expérimentale : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation).
- rhéologie structurale : explication des comportements à partir de la structure du matériau.
- rhéologie théorique : fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique.

### 1.2.3. La contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement  $\tau$  est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, elles sont appelées force de cisaillement.

En rapportant  $\tau$  par l'équation :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (1.1)$$

$\tau$  : représente une force par unité de surface, elle s'exprime en (N/m<sup>2</sup>) ou bien plus commodément en Pascal (Pa).

$dS$  : est la surface élémentaire de l'entité considérée.

$dF$  : La contrainte de cisaillement est une grandeur définie en tout point du matériau. Elle varie en général d'une couche à l'autre mais est constante en tout point de la même couche.

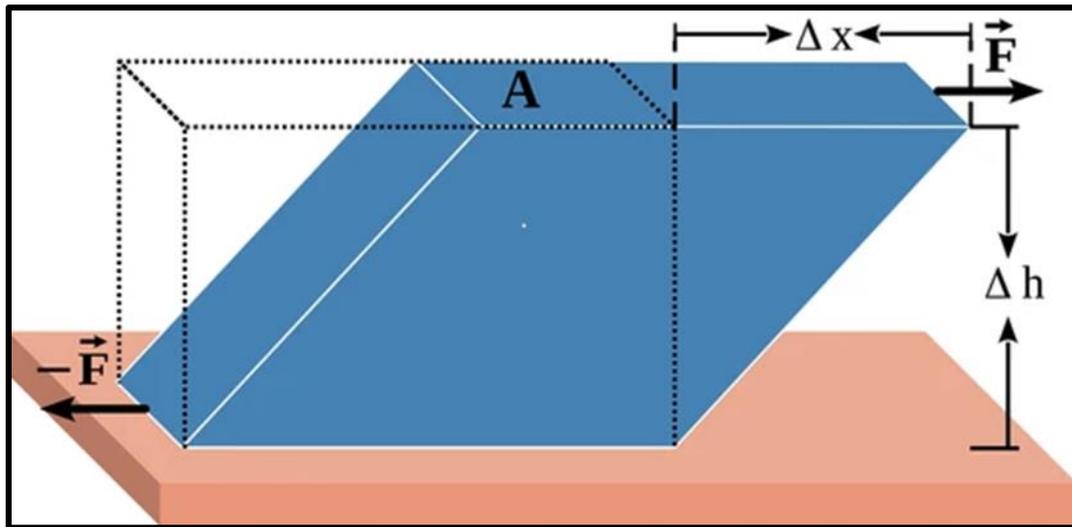


Figure 1.1 : schéma explicatif sur la contrainte de cisaillement

### 1.3. La viscosité

La viscosité permet de faire la distinction entre un fluide parfait et un fluide réel, la viscosité est définie comme la résistance à l'écoulement, elles sont dues à des frottements qui existe entre les couches de vitesses diffusées et sur la paroi. Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement, la courbe lieu des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse. Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres. Il existe deux termes de viscosité.

#### 1.3.1. La viscosité dynamique

La force de frottement  $F$  qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. La force de frottement  $\vec{F}$  qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre, elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches.

Le facteur proportionnalité est le coefficient de viscosité dynamique  $\mu$ .

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\varepsilon}} \quad (1.2)$$

$\mu$  : la viscosité dynamique.

$\tau$  : la contrainte de cisaillement.

$\dot{\varepsilon}$  : la vitesse de déformation.

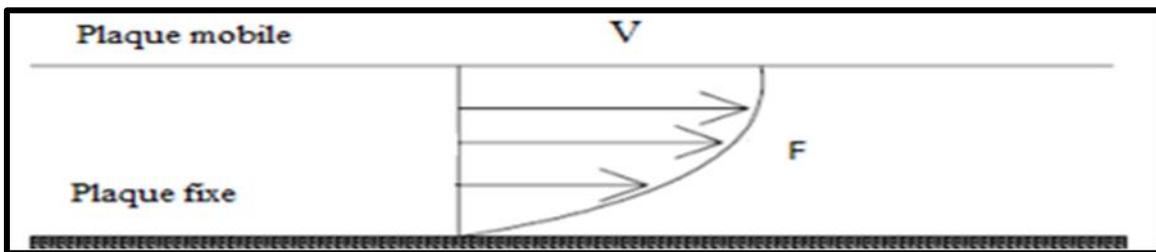


Figure 1.2 : écoulement de couette

### 1.3.2. La viscosité cinématique

C'est le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique, cette grandeur apparaît dans la mécanique de fluide dans les équations de (Navier-Stokes).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.3)$$

$\nu$  : la viscosité cinématique.

$\mu$  : la contrainte de cisaillement.

$\rho$  : la masse volumique.

### 1.3.3. Comportement visqueux des fluides

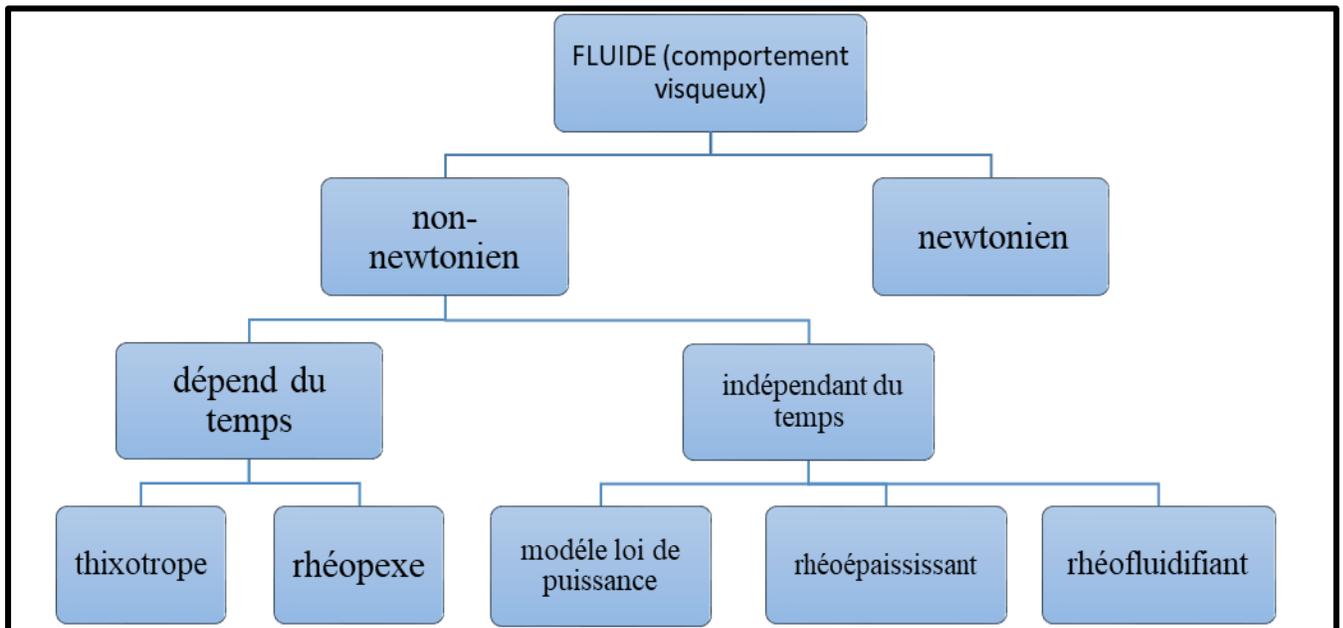


Figure 1.3 : Organigramme des différents types de fluides non-newtoniens.

### 1.4. Fluide Newtonien

Les fluides newtoniens sont des fluides qui suivent les propriétés physiques du physicien Newton. Ces propriétés disent que la viscosité (rapport contrainte de cisaillement et l'augmentation de la vitesse de déformation) est le coefficient de proportionnalité liant la contrainte de cisaillement à l'augmentation de la vitesse de déformation.

La vitesse de déformation est donc proportionnelle à la force appliquée. Lorsque que l'on fait un graphique on obtient une droite linéaire. En outre, lorsqu'un fluide est newtonien cela veut dire que le fluide continue de s'écouler indépendamment des forces qui agissent sur lui. C'est le cas de la plupart des fluides existants, comme par exemple l'eau, à l'état liquide qui peu importe la contrainte qu'on applique à celui-ci (agiter, donner un coup, ...), le comportement ne change pas, l'eau reste au même état et continuera de couler tant qu'aucun autre facteur (température, pression ...).

$$\tau = \mu * \dot{\epsilon} \quad (1.4)$$

$\tau$  : contrainte de cisaillement.

$\mu$  : la viscosité dynamique.

$\dot{\epsilon}$  : la vitesse de déformation.

### 1.5. Fluide non-newtonien

Ce sont des fluides qui ne suivent pas les propriétés physiques de Newton. C'est donc un fluide dont l'état dépend de la vitesse et de la contrainte de cisaillement en plus de la température et de la pression. Il existe deux grands types de fluides non newtoniens, ceux qui dépendent du temps, et ceux qui sont indépendants du temps. Lorsque on applique une force, les propriétés au niveau moléculaire ou microscopique de ces fluides font qu'ils changent d'état suivant la contrainte appliquée, ce qui n'est pas le cas pour les fluides newtoniens qui gardent la même composition peu importe la contrainte.

La figure 1.4 décrit le diagramme des différents fluides (ceux qui dépendent du temps & Indépendant du temps).

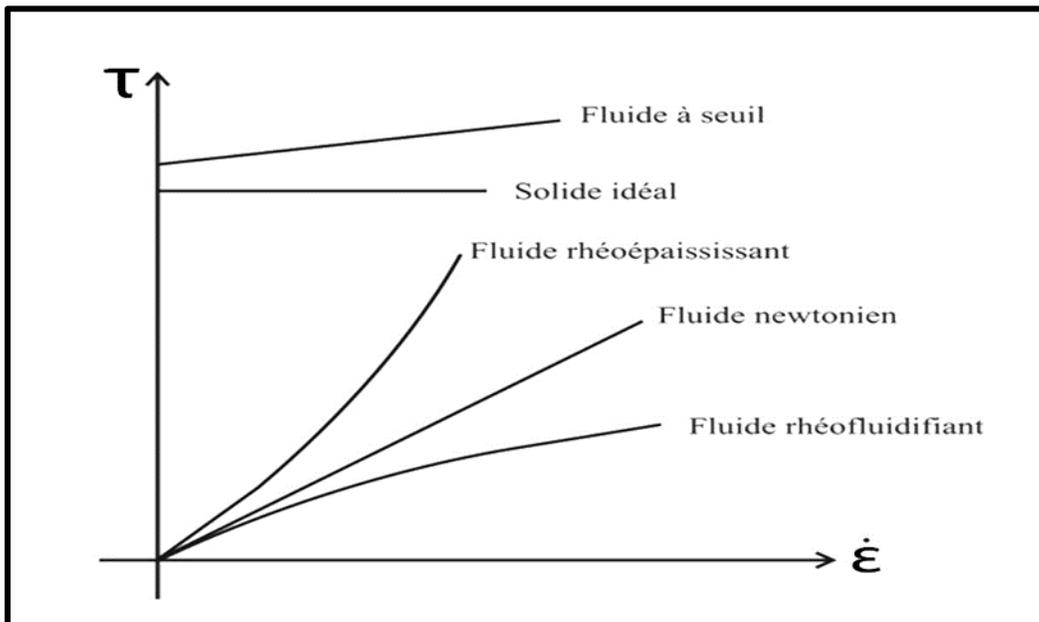


Figure 1.4 : Rhéogramme de fluide non-newtonien 1.6. Indépendant du temps

### 1.6.1. Fluide rhéofluidifiant

La rhéofluidification se produit lorsque la viscosité d'un fluide diminue à mesure que la vitesse de cisaillement augmente. Plus précisément, cela signifie que la viscosité dynamique décroît avec l'augmentation du taux de cisaillement. Plusieurs exemples de fluides rhéofluidifiants comprennent le ketchup, le sang, le miel, la peinture, ainsi que certaines solutions et polymères fondus.



Figure ( a )



Figure ( b )

Figure 1.5 : exemple des fluides non Newtonien

### 1.6.2. Les fluides rhéoépaississants

Ces fluides ont une viscosité qui varie en fonction de la contrainte de cisaillement. Contrairement aux fluides rhéofluidifiants, lorsque l'on applique une force sur ce type de fluide, il devient progressivement plus solide, comme illustré par des exemples tels que le mélange eau-maïzena. Cependant, une fois que la force est retirée, le fluide retrouve son état initial. Cette caractéristique découle de leur composition en colloïdes, un liquide mélangé à de très petites particules homogènes. Lorsqu'une force est exercée sur le fluide, ces particules se regroupent et s'organisent de manière ordonnée, créant une structure similaire à celle de l'eau solide. Mais une fois la force éliminée, les molécules d'eau réoccupent l'espace entre les particules, ramenant le fluide à son état liquide initial ou à une viscosité plus élevée.

Les fluides rhéoépaississants présentent des propriétés uniques qui les rendent très utiles dans diverses applications pratiques. Leur comportement dépend fortement du taux de cisaillement, ce qui les distingue de nombreux autres types de fluides.

### 1.6.3. Les fluides à seuil

Pour ces fluides aucun écoulement ne se produit tant que la contrainte appliquée ne dépasse pas une valeur critique appelée contrainte seuil.  $\tau_s$ , au-delà de cette valeur seuil on peut trouver les fluides newtoniens et les fluides rhéofluidifiants.

### 1.6.4. Les modèles rhéologiques pour les fluides rhéofluidifiants

Dans cette partie il existe plusieurs modèles rhéologiques :

### 1.6.4.1. Lois de puissance

Cette loi est très utilisée pour les variations de viscosité avec le taux de cisaillement elle permet aussi de modéliser facilement un fluide non-newtonien

Elle est exprimée par :

$$\tau = k \dot{\epsilon}^n \quad (1.5)$$

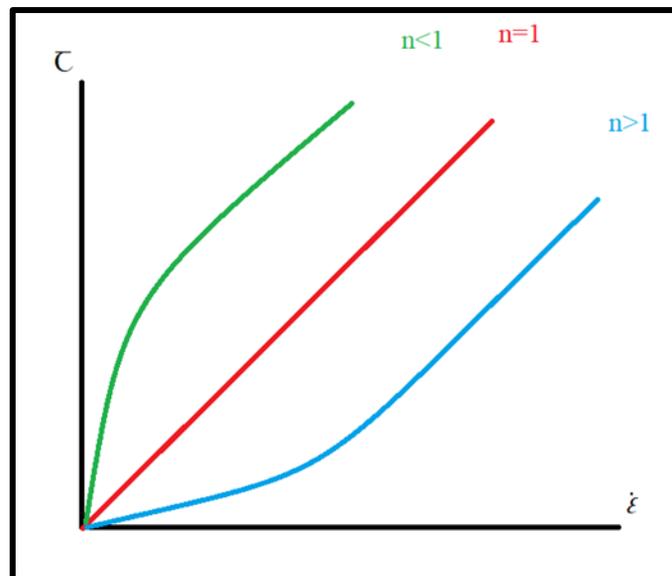
Avec :

$\tau$  : contrainte de cisaillement

k: l'indice de consistance

$\dot{\epsilon}$ : taux de cisaillement

n: indice de fluide



**Figure 1.6 : Rhéogramme de modèle de puissance**

- Si  $n=1$ :  $\tau=k*\dot{\epsilon} = \mu*\dot{\epsilon}$  c'est le cas d'un fluide newtonien.
- Si  $n<1$  : c'est le cas d'un fluide rhéofluidifiant.
- Si  $n>1$  : c'est le cas d'un fluide rhéoépaississant.

### 1.6.4.2 Le modèle de Carreau-Yasuda

La loi de Carreau-Yasuda est une loi à quatre paramètres permettant de décrire la viscosité apparente d'un fluide non-newtonien (pseudo plastique) pour toute la gamme de cisaillement. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) * [1 + (\lambda \dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (1.6)$$

$\eta_0$ : Viscosité à cisaillement nul.

$\eta_{\infty}$  : Viscosité à cisaillement infini.

$\lambda$  : Temps caractéristique.

$n$  : Indice de structure.

$a$  : Paramètre sans dimension décrivant la transition entre le premier plateau newtonien et la zone en loi de puissance.

### 1.6.4.3. Lois de cross

La loi de cross est une loi de quatre paramètres qui permet de décrire les fluides newtoniens ou les fluides pseudo plastiques selon la valeur d'un paramètre caractérisant l'un des deux fluides. Ce modèle a été proposé par Malcolm M. Cross en 1965 et s'écrit :

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + k \dot{\gamma}^n} \quad (1.7)$$

Avec :

$\eta_0 = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta$  : viscosité à cisaillement nul.

$\eta_{\infty} = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta$  : viscosité à cisaillement infini.

$n$  : indice de structure.

#### 1.6.4.4. Fluide de Bingham

Le fluide de Bingham est un type de fluide viscoélastique qui se comporte comme un fluide Newtonien lorsqu'une certaine contrainte minimale, appelée "seuil de cisaillement", est dépassée. En dessous de ce seuil, le fluide de Bingham a une résistance au cisaillement constante et ne s'écoule pas. Cependant, une fois que la contrainte de cisaillement dépasse le seuil, le fluide commence à s'écouler comme un fluide visqueux, avec une viscosité constante.

Cela le distingue des fluides newtoniens, qui s'écoulent proportionnellement à la contrainte de cisaillement, et des fluides non newtoniens, tels que les fluides rhéofluidifiants ou les fluides dilatants, dont la viscosité varie en fonction de la contrainte de cisaillement. Le fluide de Bingham est couramment utilisé dans des applications telles que l'industrie pétrolière, l'industrie alimentaire et la peinture, où des propriétés de fluage précises sont nécessaires.

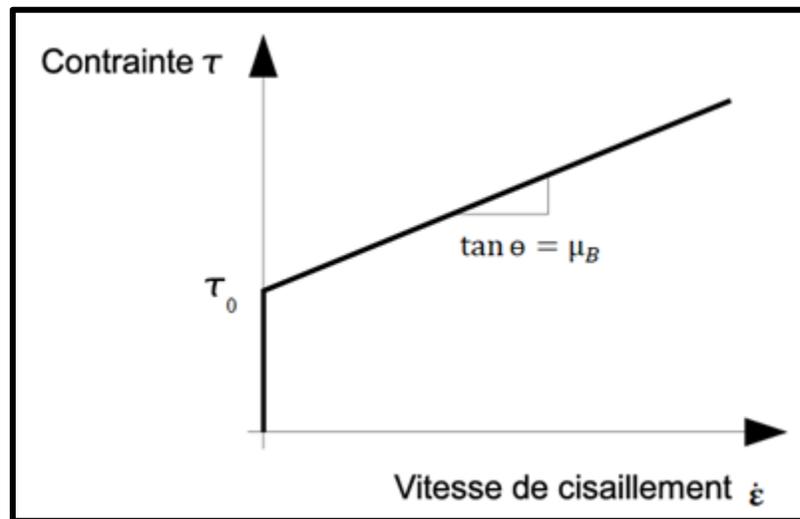


Figure 1.7 : Rhéogramme des fluides de Bingham

$$\tau = \tau_0 + \mu_B * \dot{\epsilon} \quad (1.8)$$

Avec :

$\tau$  : contrainte de cisaillement

$\tau_0$  : contrainte a seuil

$\dot{\epsilon}$  : vitesse de cisaillement

$\mu_B$  : viscosité

### 1.6.4.5. Fluide de Herschel-Bulkley

Le fluide de Herschel-Bulkley est un type de fluide non newtonien caractérisé par une relation entre contrainte de cisaillement et taux de cisaillement qui suit une loi puissance. Contrairement aux fluides newtoniens, dont la viscosité reste constante quelle que soit la contrainte de cisaillement, le fluide de Herschel-Bulkley présente une viscosité dynamique qui dépend de la contrainte de cisaillement appliquée.

Sa relation de cisaillement est généralement décrite par l'équation de Herschel-Bulkley :

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\epsilon}^n \quad (1.9)$$

Où  $\tau$  représente la contrainte de cisaillement,  $\tau_0$  est la contrainte seuil,  $k$  est un coefficient de cisaillement et  $\dot{\epsilon}$  est le taux de cisaillement. Le paramètre  $n$  est l'indice rhéologique, qui caractérise le comportement du fluide ( $n > 1$  pour un comportement pseudo plastique,  $n = 1$  pour un comportement newtonien, et  $n < 1$  pour un comportement dilatant).

Ce type de fluide est utilisé dans diverses applications industrielles, notamment dans l'industrie pétrolière, l'industrie alimentaire et la fabrication de cosmétiques, où des propriétés de viscosité ajustables sont nécessaires.

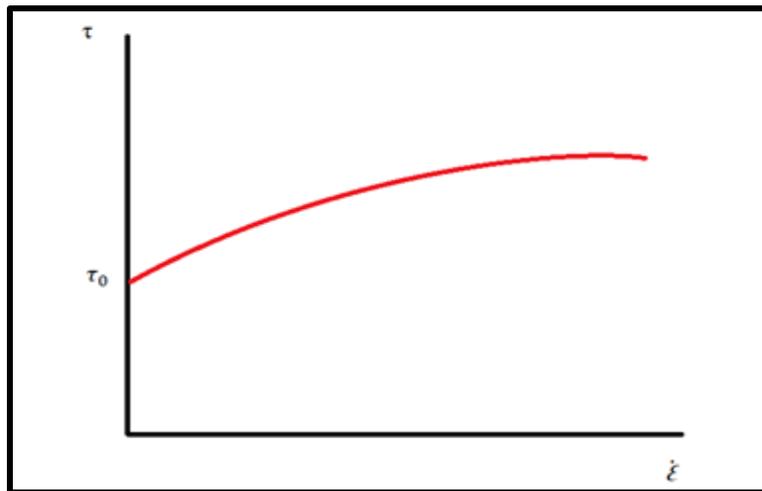


Figure 1.8 : Rhéogramme de Herschel-Bulkley

### 1.7. Le fluide utiliser dans l'étude

L'eau est souvent considéré comme un fluide non newtonien rhéofluidifiant avec seuil, ce qui signifie qu'il nécessite une contrainte pour s'écouler. Expérimentalement, il présente un comportement de fluide visqueux sous cisaillement, mais sa fonction de cisaillement  $\tau(\dot{\gamma})$  n'est pas nulle à l'origine, ce qui indique une discontinuité de la fonction de cisaillement. Cette discontinuité implique l'existence d'un seuil de contrainte, nécessitant l'application d'une contrainte de cisaillement minimale pour initier l'écoulement.

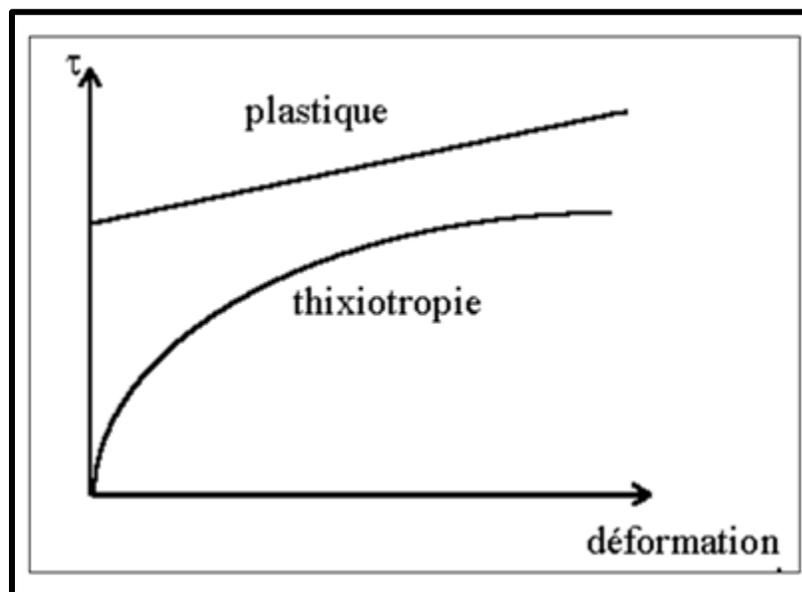


Figure 1.9 : Relation contrainte/déformation dans un fluide non newtonien

**Chapitre 2 :**  
**Etude**  
**bibliographique et**  
**l'état de l'art**

## Etat de l'art

### 2.1. Introduction

Depuis les travaux initiaux d'Idrac en 1920, de nombreuses recherches ont été menées pour analyser et modéliser les phénomènes observés dans les écoulements de Poiseuille-Bénard. Ce chapitre offre une vue d'ensemble des principaux axes de recherche et des contributeurs qui ont marqué ce domaine au fil du temps. Il revêt une dimension historique en traçant l'évolution des connaissances depuis les premières études jusqu'à récemment.

L'analyse bibliographique a permis de distinguer deux grandes périodes dans cette évolution, qui constituent les deux parties du chapitre :

De 1920 à 1951 : Cette période est celle des pionniers de la convection. Les travaux se concentrent principalement sur des expériences de visualisation permettant une compréhension qualitative des structures thermo-convectives principales . Bien que ces expériences aient été menées avant 1938, Sir David Brunt résume leurs résultats en 1951.

De 1962 à 1984 : Après une période peu productive due à la Seconde Guerre mondiale, la recherche sur ce sujet reprend vers 1960. Les analyses de stabilité linéaire sont principalement effectuées, complétées par des expériences confirmant les résultats des modèles théoriques. Certains travaux se concentrent sur l'étude des écoulements thermo-convectifs établis, tandis que d'autres se penchent sur la "zone d'entrée thermique", marquant le début de la zone chauffée où les rouleaux convectifs se développent. Cette période culmine avec la thèse de Luijkx (1983) sur la stabilité linéaire des écoulements de Poiseuille-Bénard soumis à des perturbations 3D dans des conduites 3D, ainsi qu'avec le livre plus général de Platten et Legros (1984) offrant une synthèse sur "la convection dans les liquides".

## 2.2. Définition

Il convient de souligner que les couches limites de convection naturelle ne restent pas nécessairement dans un régime d'écoulement laminaire. Tout comme dans le cas de la convection forcée, des instabilités hydrodynamiques peuvent se produire. En d'autres termes, les perturbations dans le flux peuvent être amplifiées, entraînant la transition d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent. Pour une plaque plate verticale, le flux devient turbulent au-delà d'une certaine valeur critique :

$$\mathbf{Ra}(\mathbf{x}) = \mathbf{Gr}(\mathbf{x}) * \mathbf{Pr} > 10^9 \quad (2.1)$$

Tout comme dans le cas de la convection forcée, les caractéristiques microscopiques des corrélations entre l'écoulement et la convection varient considérablement entre les régions laminaires et turbulentes.

## 2.3. Ecoulements non-newtoniens dans une conduite non-circulaire

Les écoulements non-newtoniens dans des conduites de forme non circulaire présentent des caractéristiques distinctes par rapport aux écoulements dans des conduites circulaires. Dans ce contexte, les propriétés rhéologiques des fluides jouent un rôle crucial. Contrairement aux fluides newtoniens dont la viscosité reste constante, les fluides non-newtoniens peuvent présenter des comportements variés tels que la viscosité dépendante du taux de cisaillement ou de la contrainte de cisaillement.

Dans une conduite non circulaire, les profils de vitesse et de contrainte de cisaillement peuvent être altérés par la géométrie spécifique de la conduite. Les changements dans la section transversale de la conduite peuvent induire des gradients de vitesse et de contrainte non uniformes le long de la section de la conduite.

L'analyse des écoulements non-newtoniens dans des conduites non circulaires nécessite souvent des modèles mathématiques et des simulations numériques avancées pour prendre en compte les effets de la géométrie et des propriétés rhéologiques du fluide.

Ces études sont importantes dans de nombreux domaines, notamment l'ingénierie des procédés, la conception des réseaux de distribution de fluides, et la biomécanique.

De nombreuses recherches ont été menées pour obtenir des solutions numériques approximatives pour les écoulements dans des géométries spécifiques telles que les conduites rectangulaires et triangulaires. Parallèlement, des tentatives semi-empiriques ont été faites pour développer des méthodes permettant de prédire les pertes de pression pour les fluides non newtoniens purement visqueux dans des conduits de section non circulaire.

Une analyse systématique et réussie du facteur de frottement a été proposée par Kozickiet et autres (1966, 1971). En observant la similitude entre l'écoulement des fluides non newtoniens purement visqueux dans des conduites circulaires et celui entre deux plans parallèles, ils ont suggéré que cela pourrait être étendu aux conduites ayant une section constante de forme arbitraire.<sup>1</sup>

#### **2.4. Instabilité Rayleigh-Bénard**

L'instabilité de Rayleigh-Bénard est un phénomène hydrodynamique observé dans les systèmes de convection thermique, où un fluide est chauffé par le bas et refroidi par le haut dans une configuration en cellule. Cette instabilité se manifeste par l'apparition de motifs de circulation convective, généralement sous forme de rouleaux ou de cellules hexagonales, dans le fluide. Ces structures se forment lorsque la différence de température entre le bas et le haut du système dépasse un certain seuil critique, appelé le nombre de Rayleigh critique.<sup>2</sup>

Ce phénomène est couramment étudié dans des expériences en laboratoire et est pertinent dans de nombreux contextes naturels et industriels, tels que la météorologie, l'océanographie, la géologie et les procédés de fabrication. La compréhension de l'instabilité de Rayleigh-Bénard est essentielle pour prédire et contrôler les modèles de convection thermique dans une variété de systèmes.

---

<sup>1</sup> J. Koszkuł and J. Nabialek, "Viscosity models in simulation of the filling stage of the injection molding process," *Materials Processing Technology*, vol. 157-158, pp. 183187, décembre 2004.

<sup>2</sup> Xavier Nicolas. Simulation numérique et stabilité des écoulements de convection mixte en conduite rectangulaire chauffée par le bas. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université Paul Sabatier Toulouse III, 1997. Français. Tel-00812211.

## 2.5. La convection

La convection est un processus de transfert d'énergie qui résulte de l'interaction entre la conduction thermique, l'accumulation d'énergie et le mouvement du milieu. C'est le principal mécanisme de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz.

Le transfert d'énergie par convection d'une surface plus chaude vers un fluide environnant plus froid se déroule en plusieurs étapes. Tout d'abord, la chaleur se propage par conduction de la surface vers les particules fluides adjacentes, augmentant ainsi leur température et leur énergie interne.

Ensuite, ces particules se mêlent à d'autres particules situées dans des régions plus froides et transfèrent une partie de leur énergie. Cette énergie est maintenant emmagasinée dans les particules fluides et est transportée grâce à leur mouvement.

## 2.6. Type de convection

En fait, il est plus précis de distinguer deux principaux types de convection, mais si l'on souhaite ajouter une troisième catégorie, on peut parler de convection mixte. Voici donc les trois types de convection :

- Convection naturelle.
- Convection forcée.
- Convection mixte.

Le transfert de chaleur par convection est catégorisé en fonction du type de mouvement du fluide : convection naturelle et convection forcée. Lorsque des courants se développent dans le fluide uniquement en raison des différences de densité résultant des gradients de température, on parle de convection naturelle ou libre. En revanche, lorsque le mouvement du fluide est induit par une force externe telle qu'une pompe ou un ventilateur, on parle de convection forcée. Si les deux mécanismes coexistent simultanément, sans qu'aucun ne prédomine, on parle de convection mixte.

## 2.7. Convection mixte

La convection mixte est un type de transfert de chaleur qui résulte de la combinaison des mécanismes de convection naturelle et forcée dans un même système. Dans ce cas, à la fois les

différences de densité dues aux gradients de température (convection naturelle) et une force externe, comme une pompe ou un ventilateur (convection forcée), contribuent au mouvement du fluide et au transfert de chaleur.

Un exemple courant de convection mixte est celui d'un système de chauffage central, où la circulation naturelle de l'air chaud est renforcée par l'utilisation d'un ventilateur pour distribuer plus efficacement la chaleur dans la pièce. Dans ce scénario, à la fois la convection naturelle due à la différence de densité entre l'air chaud et froid et la convection forcée induite par le ventilateur sont présentes.

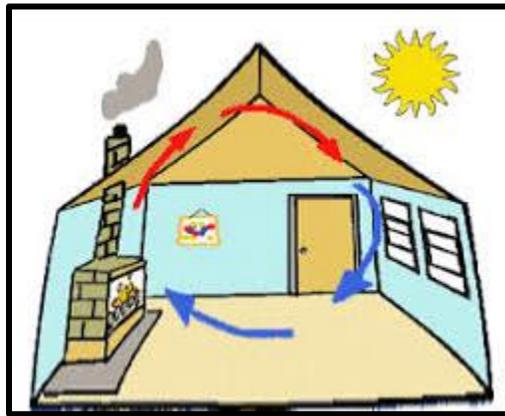


Figure 2.1 : le phénomène de la convection mixte.

## 2.8. L'écoulement de Poiseuille-Bénard

L'écoulement de Poiseuille-Bénard est un phénomène de convection thermique dans les fluides se produisant dans des conduites ou canaux. Il tire son nom des physiciens Jean Léonard Marie Poiseuille et Henri Bénard. Caractérisé par la formation de

cellules de convection régulières, il se produit généralement entre deux plaques parallèles chauffées différemment, créant un gradient thermique. Ces cellules, observées sous forme hexagonale ou carrée, se déplacent et transfèrent la chaleur de manière convective. Il est étudié dans divers domaines scientifiques et d'ingénierie, notamment en géophysique, météorologie, ingénierie des fluides et physique des plasmas.

De la même manière que l'écoulement de Rayleigh-Bénard est caractérisé par le nombre de Rayleigh, l'écoulement de Poiseuille est caractérisé par le nombre de Reynolds  $Re$ . Celui-ci représente le rapport d'intensité entre les forces d'inertie et la dissipation visqueuse (ou diffusion de la quantité de mouvement) au sein du fluide:

$$Re = \frac{\text{la force d'inertie}}{\text{la force de dissipation visqueuse}} \quad (2.2)$$

Dans le cas de l'écoulement de Poiseuille-Bénard entre deux plaques infinies, on sait que la présence de l'écoulement forcé laminaire oblige les structures convectives à s'aligner dans le sens de l'écoulement.

L'écoulement de base dont il étudie la stabilité est l'écoulement de Poiseuille stratifié linéairement en température (Figure ...). Il montre que cet écoulement reste stable tant que le nombre de Rayleigh ne dépasse pas une valeur critique  $* Ra$  ; au-delà, il devient instable et deux sortes de structures thermo convectives peuvent apparaître. Comme dans les boîtes parallélépipédiques, il peut y avoir des rouleaux d'axes transversaux à l'axe de la conduite et formant une chaîne de cylindres contrarotatifs. Cependant, dans le cas de l'écoulement de Poiseuille-Bénard, ces rouleaux sont emportés par le courant moyen dans la conduite, dans la direction de l'écoulement de base.

Une représentation schématique de ces rouleaux, ainsi que des photos obtenues en faisant des plans de lumière dans des écoulements d'air avec de la fumée sont présentées ( figure ...)

On notera que ces structures sont quasi bidimensionnelles: la composante transversale de la vitesse est nulle, excepté près des bords latéraux. Dorénavant, dans tout ce document, on appellera cette configuration thermo convective les "rouleaux transversaux".

L'autre configuration qui peut apparaître quand  $Ra < Ra^*$  est celle observée par Idrac [figure ...] et qui est décrite plus haut. Ce sont des rouleaux hélicoïdaux, contrarotatifs, stationnaires et d'axes parallèles à celui de la conduite. Ils sont présentés (Figure...). Ici, les trois composantes de vitesse sont non nulles. Dans toute la suite, on appellera cette configuration les "rouleaux longitudinaux".

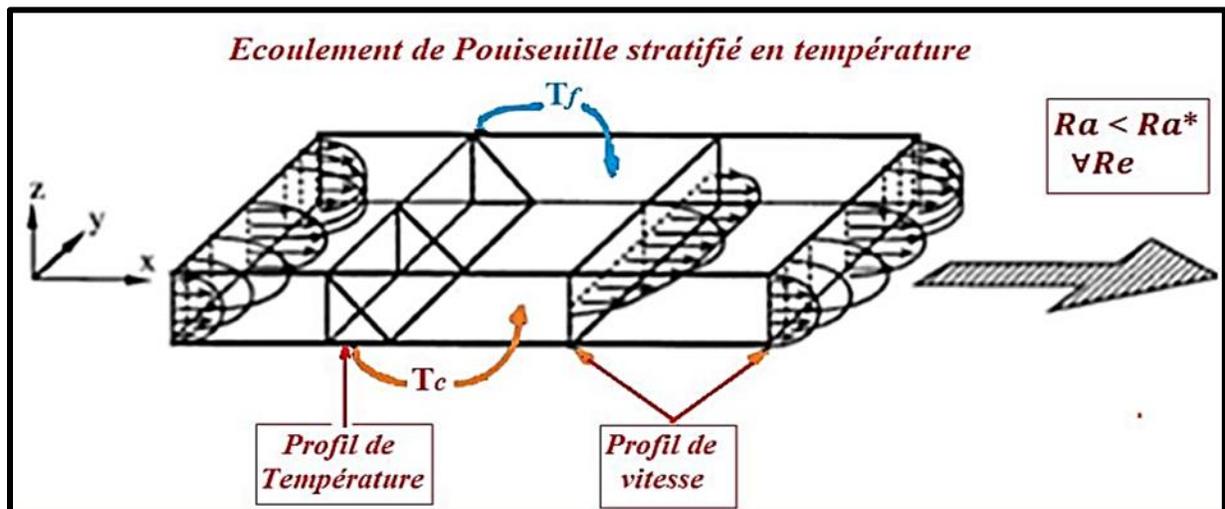


Figure 2.2 : Ecoulement de poiseuille stratifié en température.

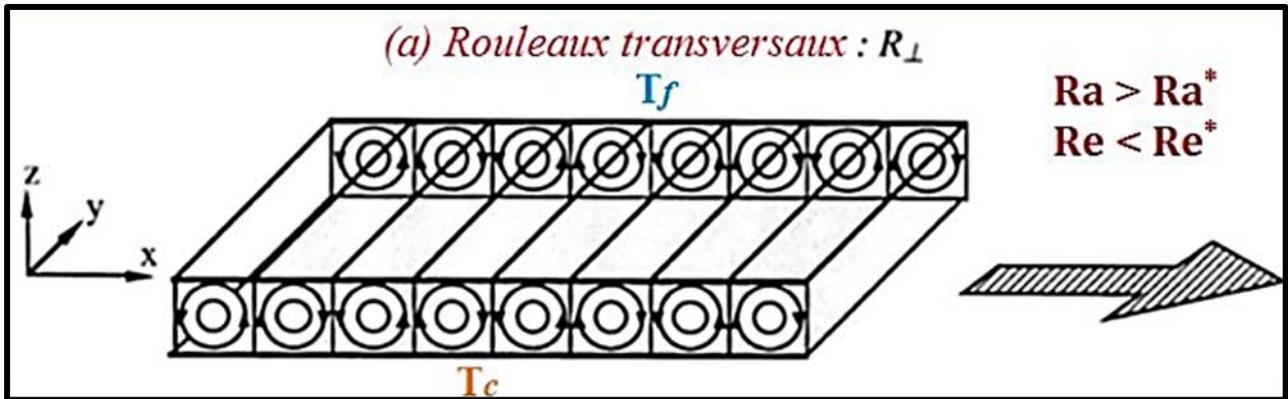


Figure 2.3 : Ecoulement de rouleaux transversaux

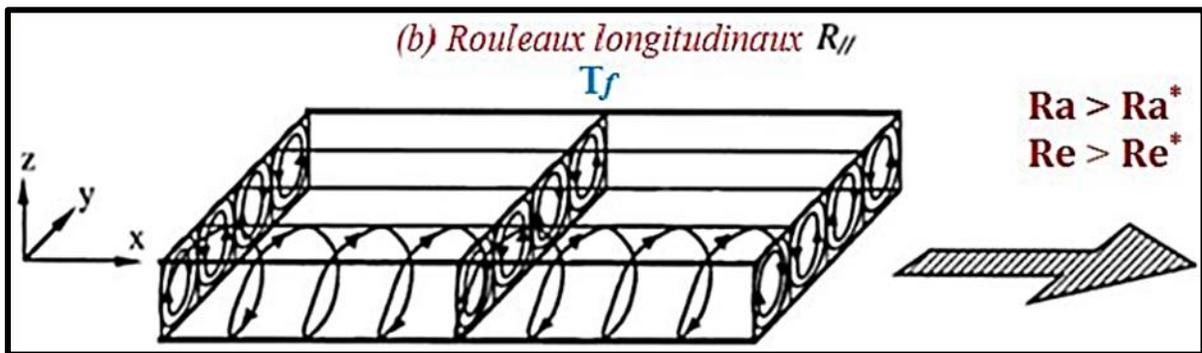


Figure 2.4 : Ecoulement de rouleaux longitudinaux

## 2.9. Signification de nombres adimensionnels

L'étude des transferts convectifs repose en partie sur les valeurs des paramètres de contrôle qui les décrivent. Les nombres adimensionnels nous renseignent sur les conditions opératoires dans lesquelles l'étude a été menée, ils présentent l'avantage d'être indépendants du système choisi, des dimensions et des propriétés thermo physiques utilisées. Nous allons, dans ce qui suit, présenter les expressions et la signification physique de certains groupements adimensionnels qui seront utilisés le long de ce travail.

### 2.9.1. Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof caractérise le rapport des effets thermiques de convection naturelle aux effets visqueux.<sup>34</sup>

$$\text{Gr} = \frac{F_{\text{flottabilité}}}{F_{\text{visqueuses}}} \quad (2.3)$$

$$\text{Gr} = \frac{g \beta \Delta T H^3}{\nu^2} \quad (2.4)$$

Avec :

**g** : accélération de pesanteur.

**ν** : La viscosité cinématique.

**H** : la dimension caractéristique de la géométrie étudiée.

**ΔT=(T-Tref)** : Ecart entre la température de la paroi, et la température de fluide à une distance éloignée de la paroi.

**β**: Coefficient de dilatation thermique à pression constante, définie par :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \rho \quad (2.5)$$

Et pour un gaz parfait  $\beta = 1/T$

Ce nombre indique la nature du régime d'écoulement en convection naturelle, qu'il soit laminaire ou turbulent. On définit souvent une valeur critique caractéristique définissant ainsi la limite de chaque régime.

- Si :  $\text{Gr} < \text{Gr}_c$  le régime est dit laminaire.
- Si :  $\text{Gr} > \text{Gr}_c$  le régime est dit turbulent.

<sup>3</sup> De Langre, E. (2000). Analyse dimensionnelle en interaction fluide-structure. La Houille Blanche, (3-4), 14-18

### 2.9.2. Nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl caractérise l'importance relative de deux mécanismes qui pilotent la convection du fluide qui sont : la diffusion de quantité de mouvement (viscosité Cinématique,  $\nu$ ) et la diffusion de chaleur (thermique,  $\alpha$ ).

$$\text{Pr} = \frac{\text{la diffusivité de la matière}}{\text{la diffusivité thermique}} \quad (2.6)$$

Les valeurs du nombre de Prandtl nous renseignent sur les caractéristiques thermo-physiques du fluide choisi.

### 2.9.3. Nombre de Rayleigh

Le nombre de Rayleigh (Ra) est un dimensionnel nombre qui caractérise le comportement de la convection naturelle, défini comme :

$$\text{Ra} = \frac{g\beta(T_{\text{haut}} - T_{\text{bas}})d^3}{\nu\alpha} \quad (2.7)$$

Où

- $g$  Est l'accélération due à la gravité.
- $\beta$  Est le coefficient de dilatation thermique.
- $T_{\text{bas}}$  Est la température de la plaque inférieure.
- $T_{\text{haut}}$  est la température de la plaque supérieure.
- $d$  Est la distance entre les plaques.
- $\nu$  Est la viscosité cinématique.
- $\alpha$  Est la diffusivité thermique.

### 2.9.4. Nombre de Nusselt

Est un nombre adimensionnel utilisé dans les opérations de transfert thermique. Il représente le rapport entre le transfert thermique total et le transfert par conduction.

L'échange thermique entre les parois chaudes et froides est représenté par le nombre de Nusselt local :

$$\mathbf{Nu} = \frac{hLc}{\lambda} \quad (2.8)$$

Avec :

$h$  : coefficient de transfert thermique ou coefficient de convection ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) en un point particulier de la surface.

$Lc$  : longueur caractéristique (m) elle est la même que celle utilisée pour le nombre de Reynolds.

$\lambda$  : conductivité thermique du fluide ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

### Nombre de Nusselt Globale

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}}{\lambda} * Lc \quad (2.9)$$

### 2.9.5. Relations entre $Nu$ et $Ra$ pour l'écoulement de Rayleigh-Bénard

Dans le cas de la convection de Rayleigh-Bénard, des relations empiriques et semi-empiriques ont été développées pour relier  $Nu$  et  $Ra$ . Voici quelques-unes des relations couramment utilisées :

Pour les faibles nombres de Rayleigh (convection laminaire) :

$$Nu = 1 + CRa^n \quad (2.10)$$

où  $C$  et  $n$  sont des constantes déterminées empiriquement. Par exemple, pour un nombre de Prandtl ( $Pr$ ) de l'ordre de 1 (comme l'eau à température ambiante), les valeurs typiques pourraient être  $C = 0.54$  et  $n = 1/4$ .

Pour les nombres de Rayleigh modérés à élevés (convection turbulente) :

$$Nu = CRa^n Pr^m \quad (2.11)$$

où  $C$ ,  $n$  et  $m$  sont des constantes déterminées empiriquement. Par exemple, une relation courante pour des fluides avec  $Pr \approx 1$  est:

$$Nu = 0.15Ra^{\frac{1}{3}} \quad (2.12)$$

Où :

$$Nu = 0.27Ra^{\frac{1}{4}} \text{ (Pour un régime de transition) } \quad (2.13)$$

Ces relations montrent comment le transfert de chaleur par convection augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, ce qui est attendu car des nombres de Rayleigh plus élevés correspondent à des gradients de température plus importants et donc à une convection plus vigoureuse.

## 2.10. Types d'écoulement

Les transferts convectifs sont étroitement associés à l'écoulement du fluide, il est donc primordial de s'intéresser de près aux différents régimes d'écoulement caractérisant le mouvement du fluide. Le fluide en écoulement peut évoluer soit en régime laminaire ou en régime turbulent, la transition du régime laminaire vers le régime turbulent est caractérisée par le régime dit transitoire.

### 2.10.1. Ecoulement laminaire

Est un régime pour lequel le fluide s'écoule le long de la paroi sous forme de filets qui restent parallèles. Ceci a lieu pour des faibles vitesses du fluide.



Figure 2.5 : schématisation d'un écoulement laminaire dans une conduite.

### 2.10.2. Écoulement turbulent

Est un régime pour lequel la vitesse moyenne du fluide est beaucoup plus importante.

Il y a un véritable mélange des particules fluide. Dans un tel écoulement le mécanisme de conduction est favorisé par d'innombrables tourbillons qui transportent la masse de fluide à travers ses filets.

Ces petits volumes de fluide en se mélangeant avec d'autres volumes jouent le rôle de porteuses d'énergie. Par conséquent, un accroissement de la turbulence amène une augmentation de la quantité de chaleur s'écoulant par convection.

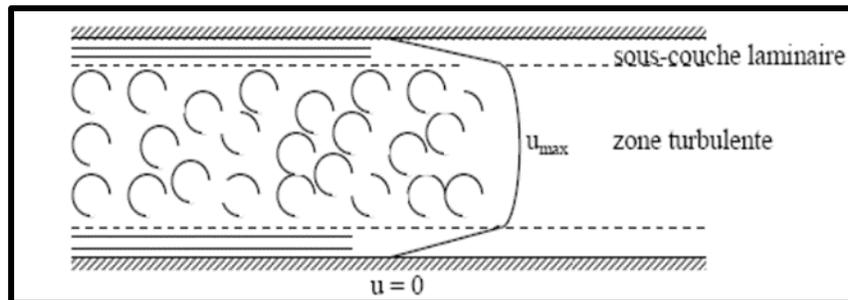


Figure 2.6 : schématisation d'un écoulement turbulent dans une conduite.

**Chapitre 3 :**  
**Formulation**  
**mathématique et**  
**Méthodes de**  
**résolutions**

### 3.1. Introduction

Diverses expériences et simulations numériques ont été menées afin d'explorer la convection mixte dans des canaux horizontaux avec un chauffage uniforme depuis le bas à un débit constant. Notre étude se concentre sur l'identification des mécanismes de convection, y compris les structures hybrides de convection et les aspects thermiques, ainsi que sur la compréhension du transfert de chaleur associé.

Nous présentons des équations qui d'écrivent le problème étudié, englobant la conservation de la masse (ou la continuité), la conservation de la quantité de mouvement (les équations de Navier-Stokes), l'énergie, et les conditions aux limites correspondantes.

### 3.2. Description de domaine d'étude

#### Fluide rhéofluidifiant

Notre étude est faite sur une partie d'une conduite, elle est sous forme rectangulaire qui se caractérise avec une longueur de 3m (3000 mm) et une largeur de 0.1m (100 mm) la géométrie est présentée dans la figure (3.1). Pour l'étude de l'écoulement de poiseuille, le fluide s'écoule avec une vitesse initiale uniforme on traverse une certaine longueur nome par (la longueur d'établissement) comme montre sur la figure (3.2)

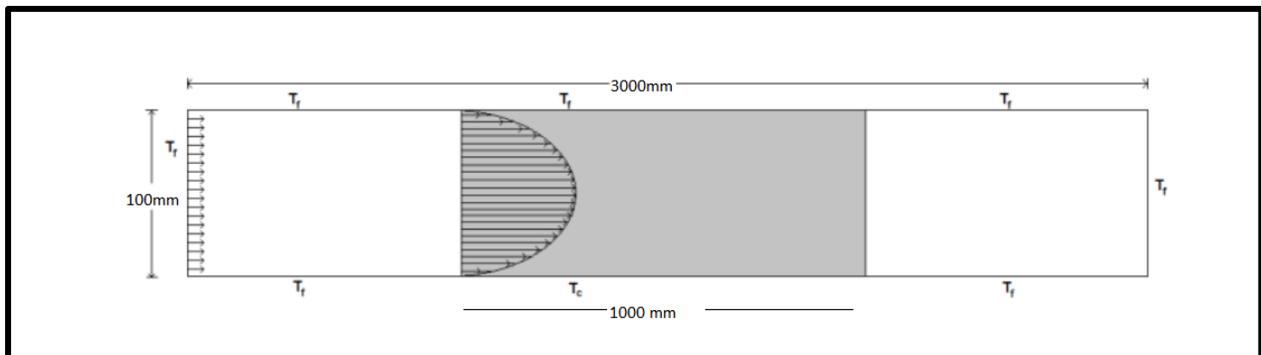


Figure 3.1 : Géométrie de domaine étudié

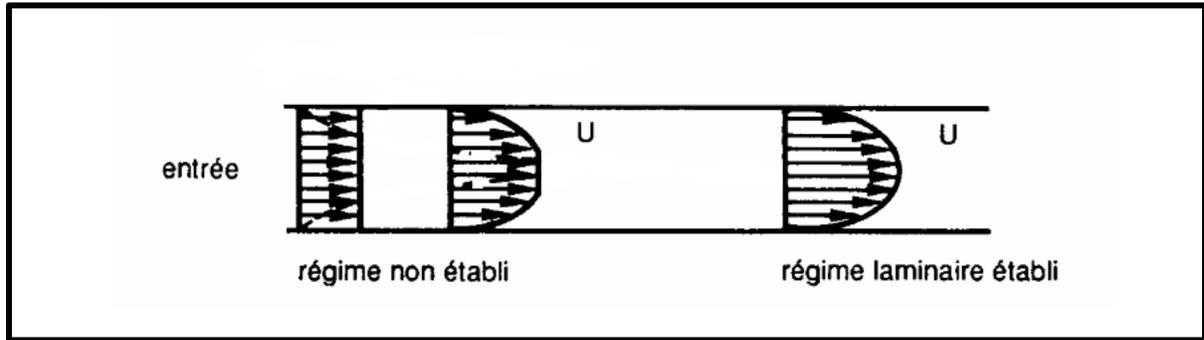


Figure 3.2 : Modèle de l'écoulement de Poiseuille

### 3.3. Hypothèses de simplifications

Pour pouvoir résoudre les équations régissant l'écoulement de convection mixte dans une cavité, il est nécessaire de vérifier si les hypothèses simplificatrices sont illustrées dans la figure ci-dessous.

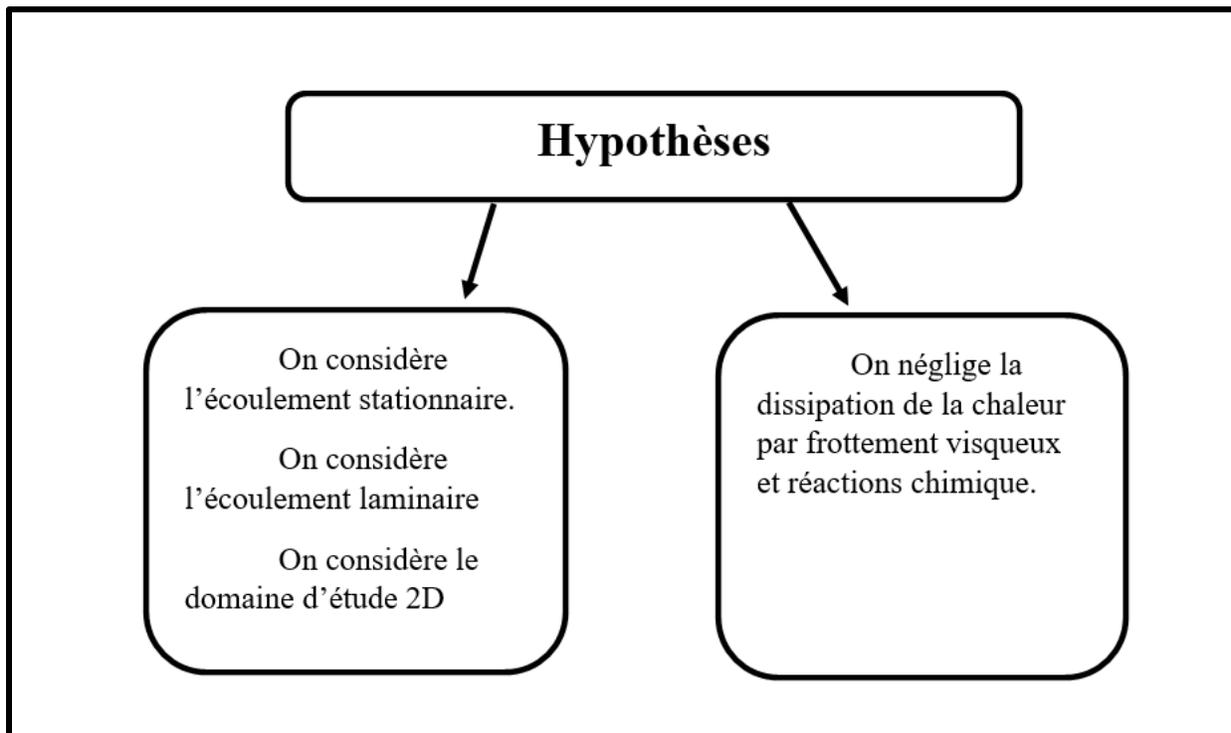


Figure3.3 : Hypothèses de simplification

### 3.4. Les équations gouvernantes

Après avoir pris en compte les hypothèses de simplification mentionnées, les équations générales régissant l'écoulement de convection sont alors formulées.

Ainsi que L'expression mathématique de l'écoulement permet d'évaluer comment l'équation d'état rhéologique du fluide affecte la répartition des vitesses et, par conséquent, des temps de séjour. La perte de charge dans les canalisations peut être évaluée en se basant sur l'équation du débit volumique.

#### 3.4.1. Équation de continuité

$$\frac{\partial u^{\square}}{\partial x^{\square}} + \frac{\partial v^{\square}}{\partial y^{\square}} = 0 \quad (3.1)$$

#### 3.4.2. Équations de quantité de Mouvement

Equation suivant Ox :

$$u^{\square} \frac{\partial u^{\square}}{\partial x^{\square}} + v^{\square} \frac{\partial v^{\square}}{\partial y^{\square}} = -\frac{\partial p^{\square}}{\partial x^{\square}} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u^{\square}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^{\square}}{\partial y^2} \right) \quad (3.2)$$

Equation suivant Oy :

$$u^{\square} \frac{\partial u^{\square}}{\partial x^{\square}} + v^{\square} \frac{\partial v^{\square}}{\partial y^{\square}} = -\frac{\partial p^{\square}}{\partial x^{\square}} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v^{\square}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^{\square}}{\partial y^2} \right) + RTi^{\square} \quad (3.3)$$

#### 3.4.3. Équation de conservation de l'énergie

$$u^{\square} \frac{\partial T^{\square}}{\partial x^{\square}} + v^{\square} \frac{\partial T^{\square}}{\partial y^{\square}} = \frac{1}{RePr} \left( \frac{\partial^2 T^{\square}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^{\square}}{\partial y^2} \right) \quad (3.4)$$

Conditions aux limites sous forme adimensionnelle

A la paroi chaude  $-\frac{\partial T^{\square}}{\partial x^{\square}} = 1$  ;  $u^{\square} = v^{\square} = 0$

Aux parois adiabatiques  $-\frac{\partial T^{\square}}{\partial x^{\square}} = 0$  ;  $u^{\square} = v^{\square} = 0$  (3.5)

Aux chicanes  $-\frac{\partial T^{\square}}{\partial x^{\square}} = 0$  ;  $u^{\square} = v^{\square} = 0$

A l'entrée de la cavité  $T^{\square} = 0$  ;  $u^{\square} = 1$  ;  $v^{\square} = 0$

Schéma explicatif

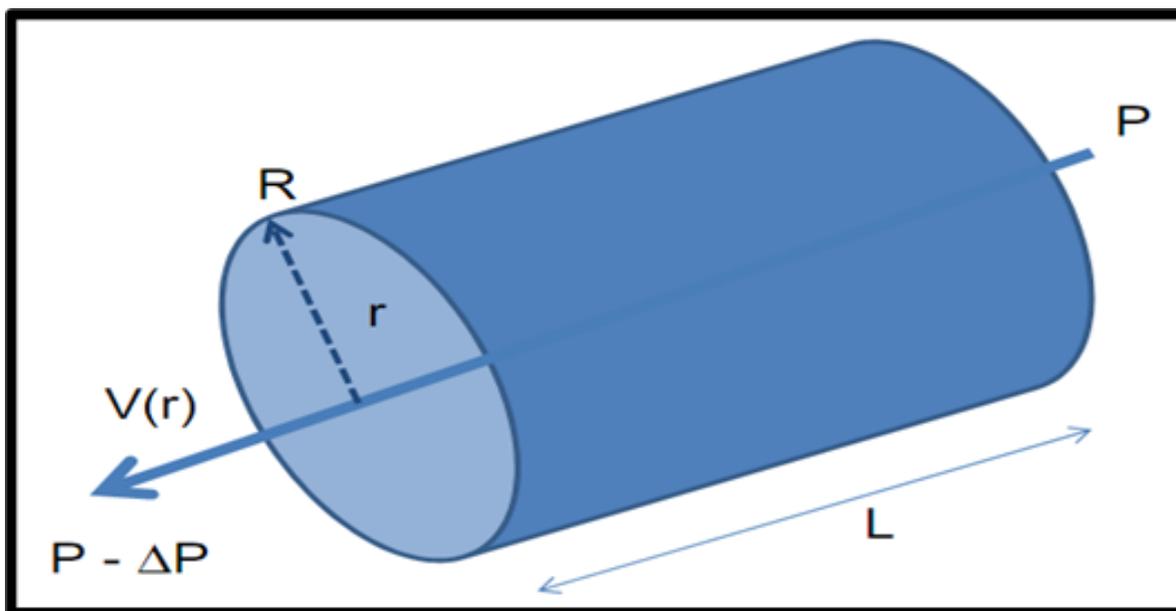


Figure 3.4 : Schématisation de l'écoulement dans une conduite.

**Bilan de forces**  $F_{Frottements} = F_{Presion}$  (3.6)

Ce qui donne:  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \tau = \Delta P \cdot \pi \cdot r^2$   $\tau(r) = \frac{r}{2} \cdot \frac{\Delta P}{L}$  (3.7)

L'expression (3.7) est valable quel que soit le type de fluide.

Le débit volumique par définition est donné par

$Q = \frac{V}{t} = \int dQ = \int_0^R v(r) dS \Rightarrow Q = 2\pi \int_0^R r v(r) dr$  (3.8)

Avec :  $\frac{r}{R} = \frac{\tau}{\tau_p}$  (3.9)

$\tau_p$  : la contrainte de cisaillement a la paroi

Par définition, nous avons : 
$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = -\frac{dv}{dr} \quad (3.10)$$

$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$  : taux de cisaillement

Après l'intégration par partie, on remplace l'équation (3.10) dans (3.8) l'expression de débit volumique devient :

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_p^3} \cdot \int_0^{\tau_p} \tau^2 \cdot \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}(\tau) \cdot d\tau \quad (3.11)$$

L'équation (3.11) est appelée l'équation de Rabinovitch-Mooney.

- **Pour un fluide Newtonien**

Pour un fluide Newtonien, l'équation rhéologique et du débit volumique sont données respectivement par les équations suivantes :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{\tau}{\mu} \quad (3.12)$$

Après l'intégration par partie on remplace l'équation (3.12) dans l'équation (3.11) le débit volumique devient

$$Q = \frac{\pi R^3}{\mu \tau_p^3} \cdot \int_0^{\tau_p} \tau^3 \cdot d\tau \quad (3.13)$$

Après l'intégrale, l'équation (3.11) s'écrit sous la forme suivante :

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} = \frac{\pi D^4}{128\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (3.14)$$

Pour le profil de vitesse, nous obtenons :

$$\tau = \frac{r}{2} \cdot \frac{\Delta P}{L} = -\mu \cdot \frac{dv}{dr} \quad \Longrightarrow \quad v(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} R^2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (3.15)$$

C'est le profil de vitesse pour un fluide Newtonien.

- **Pour les fluides rhéofluidifiants / rhéoépaississants (loi puissance)**

Pour un fluide rhéofluidifiants ou rhéoépaississants, l'équation rhéologique est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \left( \frac{\boldsymbol{\tau}}{K} \right)^{1/n} \quad (3.16)$$

On remplace l'équation (3.16) dans l'équation de Rabinovitch-Mooney (3.11) et après l'intégration, l'expression de débit volumique devient:

$$Q = \frac{n}{3n+1} \cdot \pi R^3 \left( \frac{R \Delta P}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.17)$$

Pour le profil de vitesse, nous obtenons :

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}) = \frac{3n+1}{n+1} \mathbf{v}_m \left[ \mathbf{1} - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (3.18)$$

$\mathbf{v}_m$  : vitesse moyenne ; n : indice de fluide ; K : consistance de fluide.

### 3.5 L'écoulement de Rayleigh-Bénard

L'écoulement de Rayleigh-Bénard est un phénomène de convection thermique observé dans un fluide chauffé par en dessous et refroidi par au-dessus. Lorsque la différence de température entre le bas et le haut du fluide dépasse un certain seuil critique, un mouvement de convection se met en place. L'équation (3.19) décrit ce phénomène :

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial x} + (\mathbf{u} \times \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla \rho + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + g \beta (T - T_0) \quad (3.19)$$

La 2eme géométrie et la même que le premier, sauf que pour cette expérience nous étudions les deux parois sous l'effet de phénomène de Rayleigh Bénard.

La parois inferieure est chauffée avec une température de «380k » ainsi que les autres parois sont à « 300 k ». On laisse l'effet de cette convection contrôle l'écoulement sans vitesse initiale .la géométrie ainsi que les condition limite sont montre dans la figure 3.5.

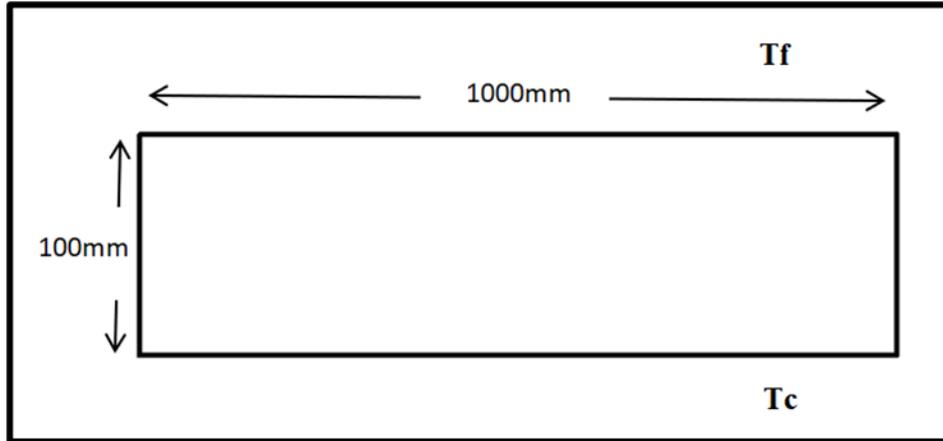


Figure 3.5 : Géométrie etude

Equation de continuité pour un fluide incompressible

$$\nabla \times \mathbf{u} = \mathbf{0} \tag{3.20}$$

Équation de la chaleur (ou équation de l'énergie thermique)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T \tag{3.21}$$

Où :

$u$  : Vecteur vitesse de fluide

$t$  : Temps

$\rho$  : Densité du fluide

$P$  : Pression

$\mu$ : Viscosite cinématique

$g$  : accélération due à la gravité

$\beta$  : coefficient de dilatation thermique

$T$  : Température

$T_0$  : Température de référence

$\alpha$  : Diffusivité thermique

**Condition aux limites**

Pour un système de Rayleigh-Bénard typique

1. Plaque inférieure (chauffée)  $T=T_{Bas}$
2. Plaque supérieure (refroidie)  $T=T_{Haut}$

### 3.5. Méthodes des différences finies

Il s'agit de la méthode la plus ancienne, dont le principe fondamental réside dans la subdivision du domaine d'étude en nœuds de densité suffisante pour représenter approximativement les contours du domaine. Ensuite, en effectuant des développements dans chaque nœud du maillage, on obtient un ensemble d'équations algébriques égal au nombre d'incertitudes des grandeurs analysées.

#### 3.5.1. Méthodes des éléments finis

La méthode implique de diviser l'espace en petites zones dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Ce maillage peut être composé de triangles ou de rectangles, où l'on estime les valeurs inconnues aux sommets en supposant une variation linéaire selon les coordonnées dans ces zones. Cette approche nécessite de mailler l'ensemble de l'espace étudié, ce qui entraîne une utilisation importante de la mémoire des calculateurs et des temps de calcul prolongés, souvent nécessitant des stations de travail pour résoudre les problèmes industriels.

#### 3.5.2. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une approche numérique utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles décrivant divers phénomènes physiques dans des domaines continus comme la mécanique des fluides, la thermodynamique et la propagation de la chaleur. Elle consiste à subdiviser le domaine en petits volumes, ou cellules, et à appliquer les principes de conservation locale et d'approximation de flux. Ces principes permettent de discrétiser les équations physiques en un système d'équations algébriques, qui est ensuite résolu numériquement pour obtenir une solution approchée. La méthode est flexible, précise et peut prendre en compte des géométries complexes et des conditions aux limites variées.

# **Chapitre 4 : Résultats et discussions**

## 4.1. Introduction

Dans cette étude et comme en le savais pour étudier l'écoulement d'un fluide Newtonien (Air) ou non newtonien ( Eau) entre deux plaques planes qui est déjà basé à des paramètres y'a qui sont fixe et y a qui varie tout dépend de la vitesse et de la température et la viscosité ,on a réalisé ses résultats à l'aide de logiciel Ansys-fluent La simulation numérique de la convection mixte laminaire est réalisée dans une cavité bidimensionnelle, la paroi horizontale inférieure chauffée et les autres parois sont adiabatiques. Les principaux résultats obtenus reflétant la qualité de l'écoulement entre les deux plaques, sont exposés dans ce chapitre.

## 4.2. Interface de logiciel Ansys-Fluent

### 4.2.1. Création de la géométrie par Ansys-Fluent

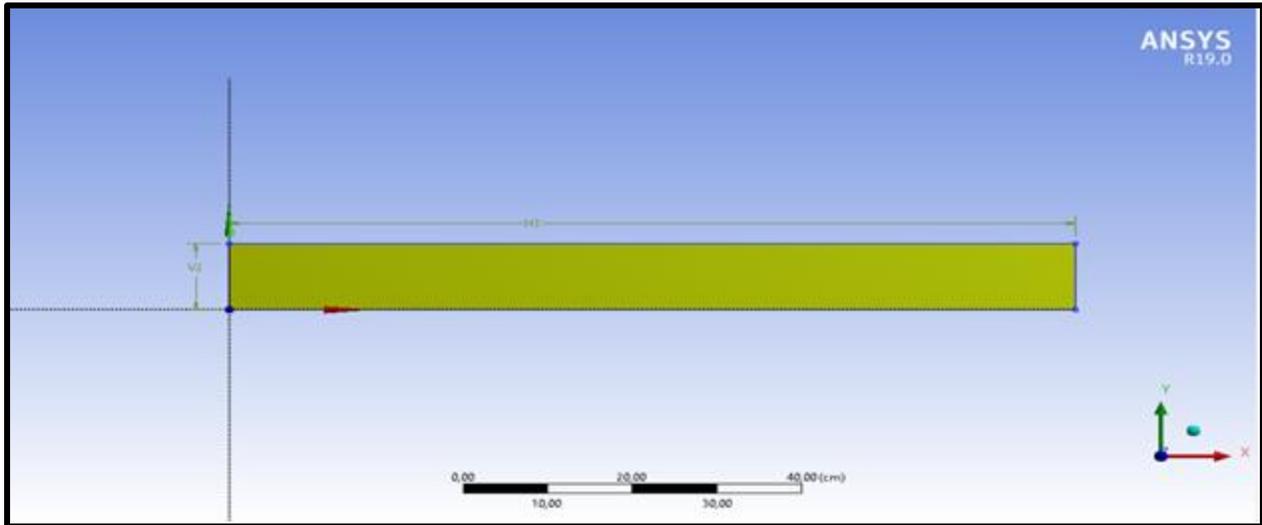
ANSYS Workbench est un moyen pratique de gérer vos projets de simulation. Workbench est utilisé pour lancer les composants logiciels individuels et utilisé pour transférer des données entre eux.

Workbench facilite également la réalisation d'analyses paramétriques (sans l'utilisateur doit lancer manuellement chaque application à tour de rôle), et facilite la simuler des scénarios multi-physiques comme l'interaction fluide-structure.

Pour créer la géométrie on suit les étapes suivantes:

- 1)- Workbench 19.0
- 2)- Systèmes d'analyse  $\Rightarrow$  mécanique des fluide (fluent).
- 3)- Géométrie  $\Rightarrow$  propriétés de schéma  $\Rightarrow$  type d'analyse  $\Rightarrow$  2D.
- 4)- Edit géométrie  $\Rightarrow$  plan XY  $\Rightarrow$  Esquisse  $\Rightarrow$  Dessiner  $\Rightarrow$  Rectangle.
- 5)- Dimension  $\Rightarrow$  Générale  $\Rightarrow$  Définir H1 et V2.
- 6)- Unités  $\Rightarrow$  Centimètre.
- 7)- Concept  $\Rightarrow$  surfaces à partir d'esquisses  $\Rightarrow$  objets de base  $\Rightarrow$  Appliquer.
- 8)- Clique sur générer pour achever la fonction surfacer à partir d'esquisses.

9)-Clique sur 1 part 1 objet  $\Rightarrow$  Sélectionner (fluide).



**Figure 4.1 : surface d'esquisse**

#### **4.2.2. Maillage avec Ansys simulation**

Le processus de génération du maillage peut être automatique ou manuel. Le maillage basé sur les lois de la physique est l'approche par défaut, qui définit le maillage en fonction de l'étude de simulation et de la géométrie. Cette méthode fait en sorte que le processus génère un maillage optimal avec un nombre restreint de paramètres. Chaque fois que vous exécutez une étude, le processus de génération du maillage est automatiquement exécuté par le solveur, avant l'exécution de l'étude. Vous pouvez également exécuter la génération du maillage manuellement si vous souhaitez étudier le maillage avant l'exécution de l'étude.

#### **4.2.3. L'effet de maillage**

L'effet de maillage dans ANSYS Fluent 19.0 fait référence à la manière dont la qualité et la densité du maillage affectent la précision et la convergence des simulations. Un maillage bien construit est crucial pour obtenir des résultats précis et fiables. Voici quelques points importants sur cet effet :

**1. Qualité du maillage :** Un maillage de haute qualité garantit des résultats précis. Cela implique d'avoir des éléments de maillage de forme régulière et d'éviter les distorsions excessives.

**2. Densité du maillage :** La densité du maillage joue un rôle crucial dans la résolution des phénomènes locaux. Une densité de maillage adaptée aux caractéristiques de l'écoulement (zones de fort gradient, zones de séparation, etc.) est nécessaire pour capturer correctement les phénomènes physiques.

**3. Convergence :** Un maillage inadapté peut entraîner des problèmes de convergence lors de la résolution numérique. Un maillage grossier peut conduire à des résultats non convergents ou peu fiables, tandis qu'un maillage trop fin peut entraîner des temps de calcul excessifs.

**4. Adaptation de maillage :** ANSYS Fluent propose des techniques d'adaptation de maillage qui permettent d'ajuster automatiquement la densité du maillage en fonction des besoins locaux de la simulation. Cela peut améliorer l'efficacité des calculs en concentrant les ressources là où elles sont le plus nécessaires.

**5. Validation du maillage :** Avant de lancer une simulation, il est important de valider le maillage en effectuant des études de sensibilité et en comparant les résultats avec des données expérimentales ou des solutions analytiques si disponibles.

En résumé, l'effet de maillage dans ANSYS Fluent 19.0 est essentiel pour garantir des simulations précises, convergentes et efficaces. La qualité, la densité et l'adaptation du maillage sont des aspects clés à prendre en compte lors de la préparation et de l'exécution de simulations numériques.

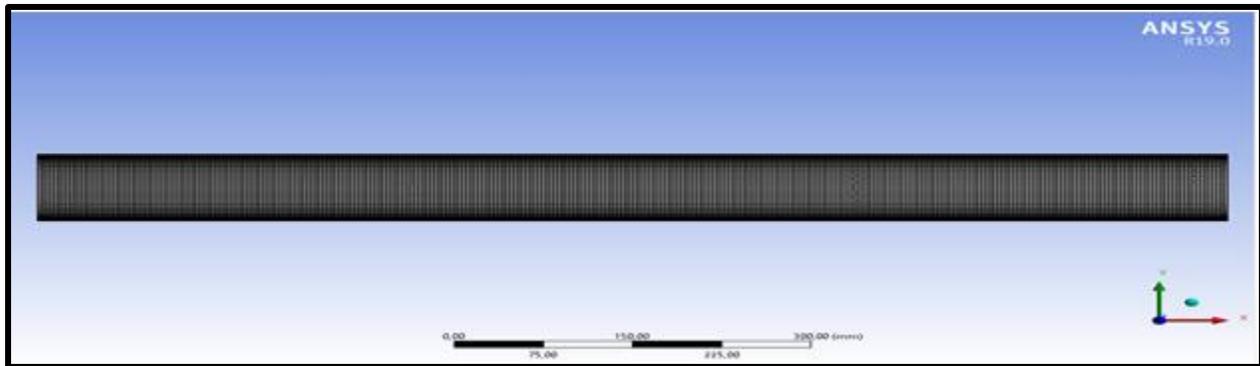


Figure 4.2 : Maillage de domaine de calcul

#### 4.2.4. Lancement de Fluent

Tout d'abord on vérifie la qualité du maillage et qu'il est bon :

```
Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 1.000000e+00
  y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 1.000000e-01
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 5.035656e-07
  maximum volume (m3): 1.467504e-05
  total volume (m3): 1.000000e-01
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 3.053053e-04
  maximum face area (m2): 4.547140e-03
Checking mesh.....
Done.

Mesh Size

Level   Cells   Faces   Nodes   Partitions
  0     19800   38160   18361     1

1 cell zone, 4 face zones.
```

Figure 4.3 : Affichage des informations de maillage

**Définissez les propriétés du solveur**

- a) Générale  $\Rightarrow$  Type pression basée  $\Rightarrow$  Formule de vitesse absolue  $\Rightarrow$  Temps constant  $\Rightarrow$  Espace 2D plane  $\Rightarrow$  Cliquez Ok.
- b) Modèle  $\Rightarrow$  Visqueuse Laminaire  $\Rightarrow$  Cliquez Ok.
- c) Matérielle  $\Rightarrow$  Fluide  $\Rightarrow$  Air et on clique sur Ok.
- d) Conditions de frontières  $\Rightarrow$  entrée avec une vitesse de 0.01(m/s) avec une pression constante au durant de cet écoulement.

**Lancement des calculs**

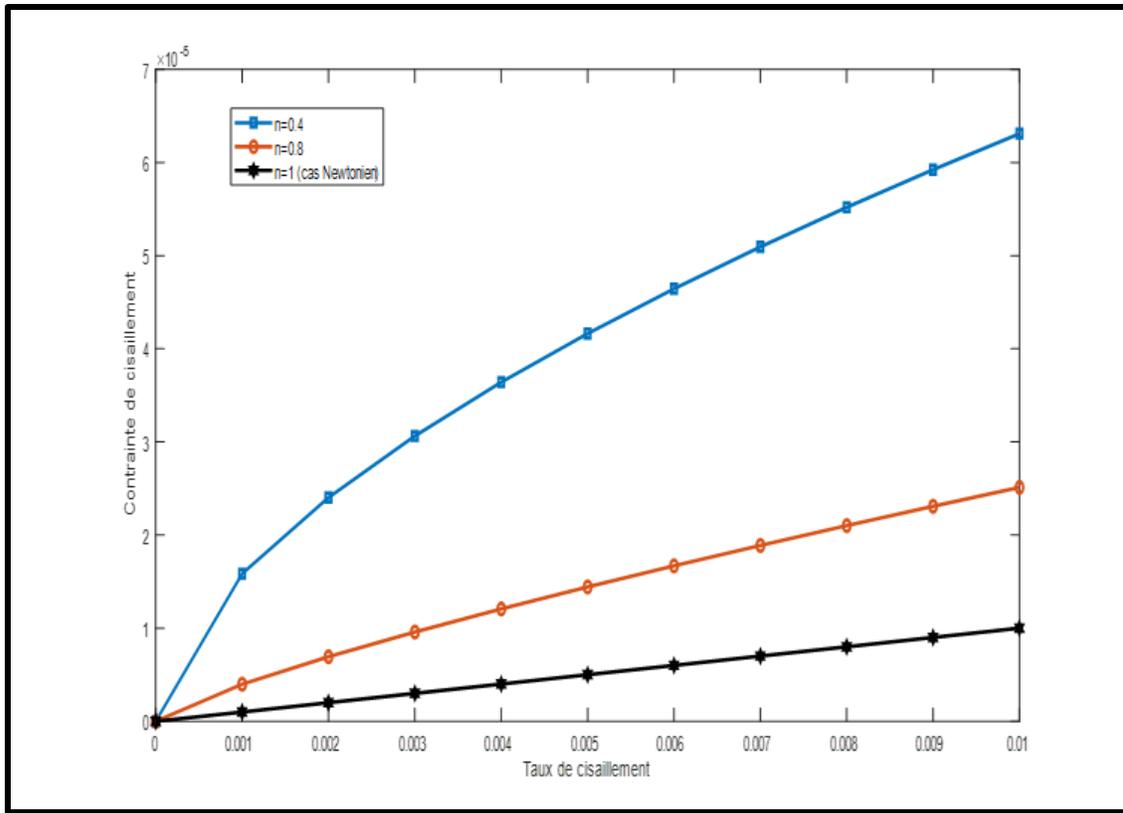
- e) Initialisation de système avec une hybride initialisation.
- f) Etablir les calculs avec un nombre de mille (1000) itérations.

**4.3 Fluide non-newtonien**

Pour un fluide rhéofluidifiant lorsque la contrainte de cisaillement augmente la viscosité diminue en fonction de vitesse de déformation.

**4.3.1 la contrainte de cisaillement**

Pour les fluides, la contrainte de cisaillement est liée au gradient de vitesse (ou taux de déformation) dans le fluide. La loi de viscosité de Newton pour un fluide newtonien est exprimée comme dans la figure 4.4

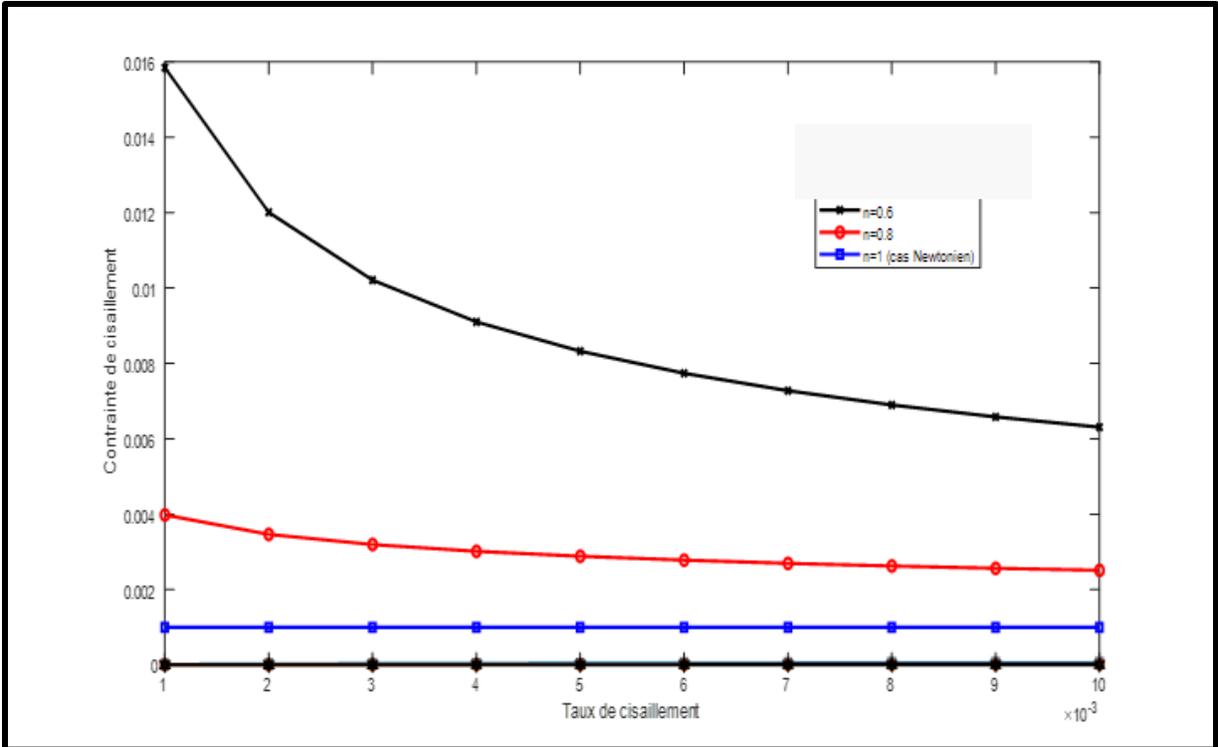


**Figure 4.4 : la variation de contrainte de cisaillement par rapport au taux de cisaillement**

On observe que lorsque la contrainte de cisaillement augmente le taux de cisaillement diminue (modèle loi de puissance), lorsque l'indice de fluide  $n=0.4$  et  $n=0.8$  la contrainte de cisaillement augmente progressivement par rapport le taux de cisaillement qu'il diminue alors on a dans le cas de loi de puissance.

Pour ce modèle de fluide :

- Si  $n < 1$  : c'est le cas d'un fluide rhéofluidifiant.



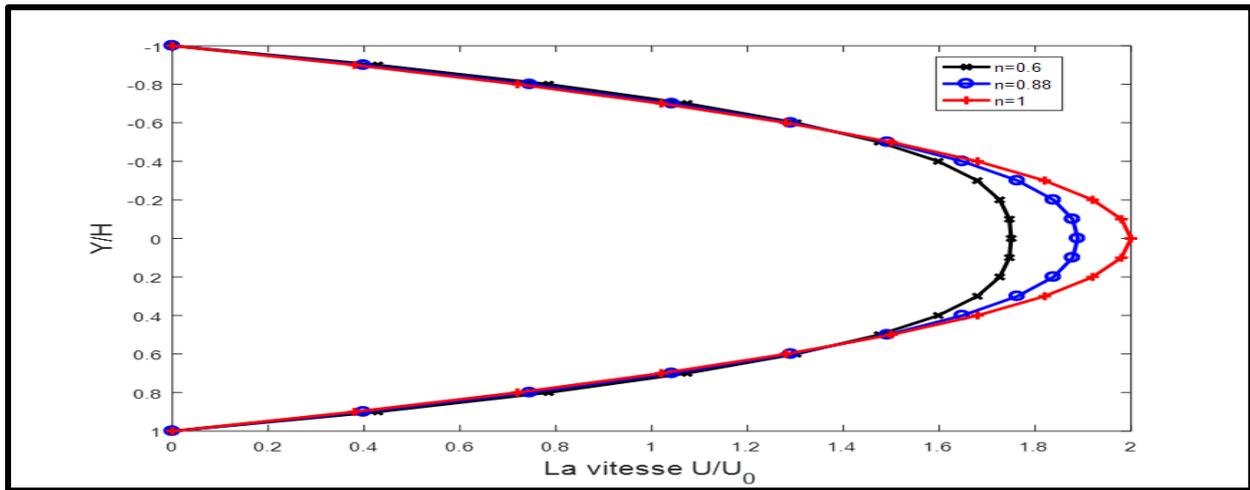
**Figure 4.5 : la variation de taux de cisaillement par rapport au contrainte de cisaillement**

La figure 4.5 représente la variation de contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement, on observe que le taux de cisaillement diminue progressivement avec la valeur de contrainte de cisaillement lorsque  $n=0.6$  et  $n=0.8$ , et pour le cas où l'indice  $n=1$  la variation de taux de cisaillement est stable tout le temps dans la valeurs de 0.001.

### 4.3.2 Profil de vitesse

Pour écoulement de loi de puissance le profil de vitesse est établi par l'équation (4.1).

$$v(r) = \frac{3n+1}{n+1} v_m \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (4.1)$$

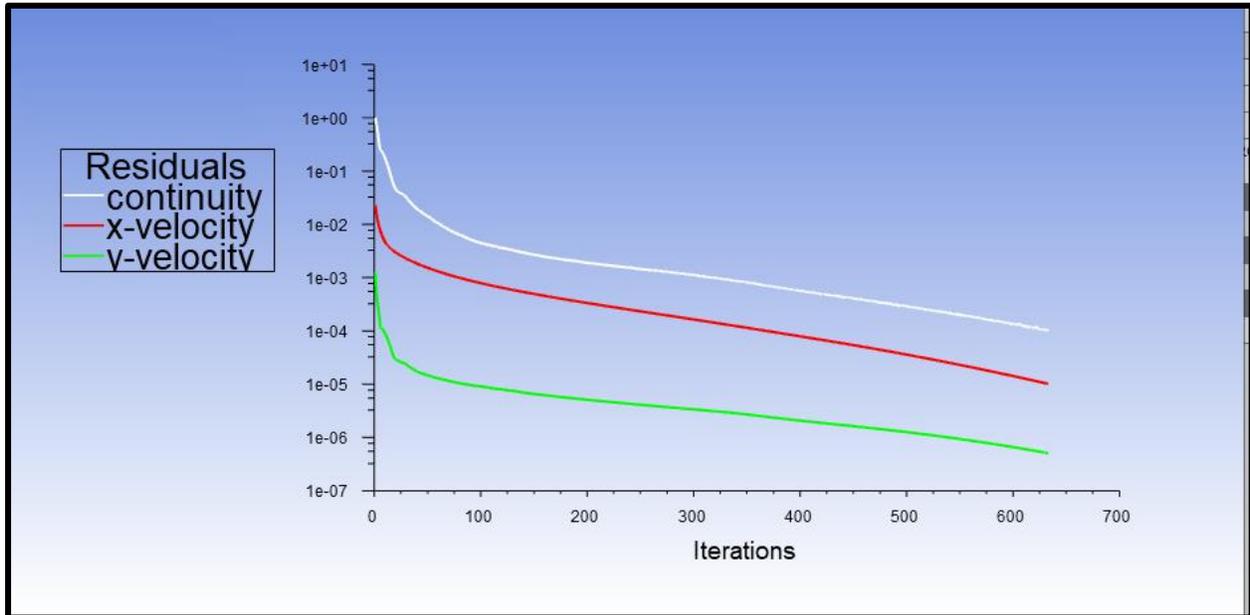


**Figure 4.6 : Le profil de vitesse d'un fluide loi de puissance**

La figure 4.6 représente le profil de vitesse pour un fluide loi de puissance dans différentes position (40cm ; 60cm ; 80cm).

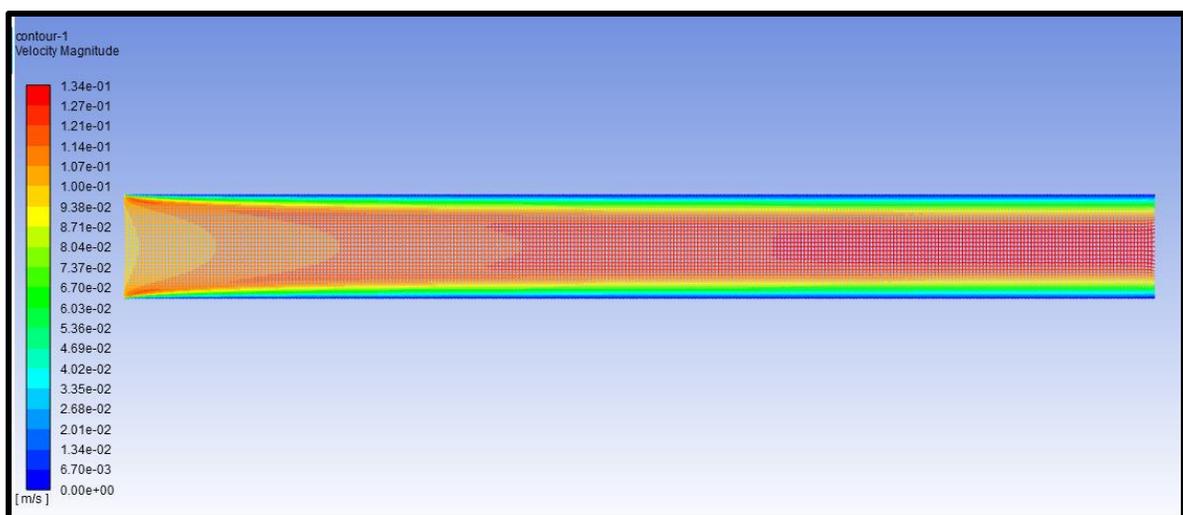
**Par simulation on obtient**

Après le lancement de système on obtient les diagrammes de critère de convergences ainsi que les contours de vitesses.



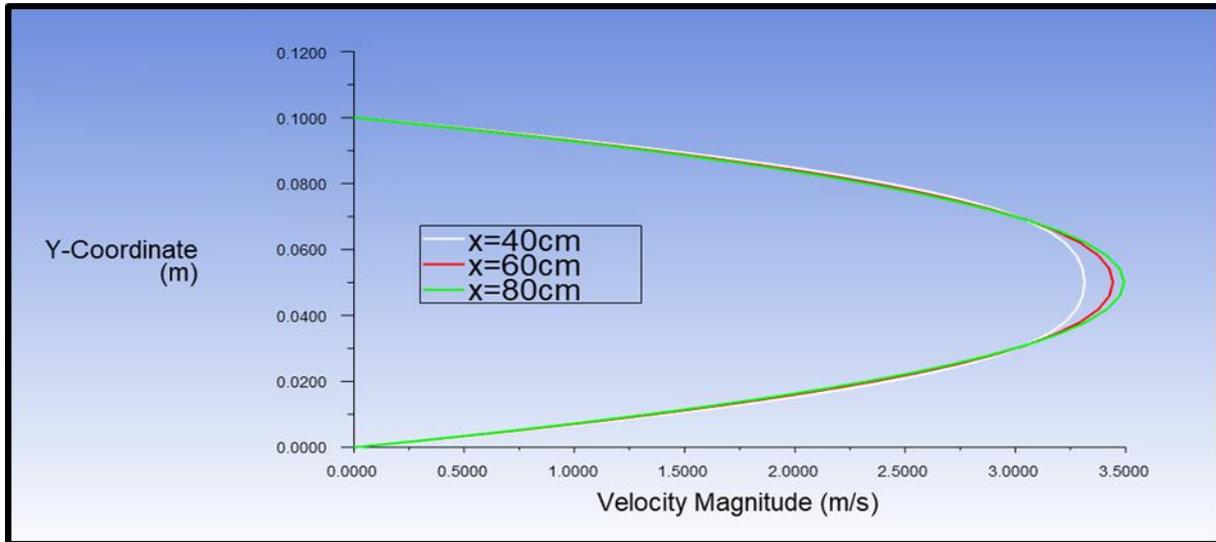
**Figure 4.7 : Teste de convergence**

La figure 4.7 représente le critère de convergente obtenus par logiciel Ansys-fluent après un essai de 1000 itérations.



**Figure 4.8 : contour de vitesse**

La figure 4.8 représente le contour de vitesse obtenu par Ansys-fluent pour un fluide de loi de puissance .



**Figure 4.9 : Le profil de vitesse obtenu par ansys d'un fluide loi de puissance**

La figure 4.9 représente le profil de vitesse obtenu de logicielle Ansys\_fluent du même fluide étudié on compare avec le profil de vitesse de la figure 4.6 on remarque qu'il y a une l'aigaire différence entre les deux profils, cette différence revient a que pour la figure 4.6 on a tracer le profile analytiquement par contre que pour le profile de la figure 4.8 logiciel a tracer les profile en utilisant la méthode numérique

## 4.4 Le coefficient de frottement

### 4.4.1 Fluide non-newtonien

Le coefficient de frottement est une valeur sans dimension qui décrit la force de frottement entre deux surfaces en contact. Pour cette étude on calcule le nombre de Reynolds ainsi que le coefficient de frottement analytiquement à des différentes vitesses (1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 m/s) d'entre ainsi que pour de différents indices de fluide ( $n=0.6$  ;  $n=0.8$  ;  $n=1$ ) les résultats de cette étude sont représentés dans les tables ((4.1) ; (4.2) ; (4.3))

**Pour  $n = 0.6$  :**

V	Re	Cf
1	29	0.0014
2	59	0.0028
3	87	0.0044
4	114	0.006
5	149	0.008

**Tableau 4.1 : les résultats analytiques de Re et Cf pour l'indice de fluide  $n=0.6$**

**Pour  $n = 0.8$**

V	Re	Cf
1	32	0.0028
2	66	0.0063
3	101	0.01
4	136	0.015
5	172	0.019

**Tableau 4.2 : les résultats analytiques de Re et Cf pour l'indice de fluide  $n=0.8$**

Pour  $n = 1$

V	Re	Cf
1	30	0.005
2	60	0.01
3	89	0.022
4	118	0.032
5	147	0.044

**Tableau 4.3 : les résultats analytiques de Re et Cf pour l'indice de fluide  $n=1$**

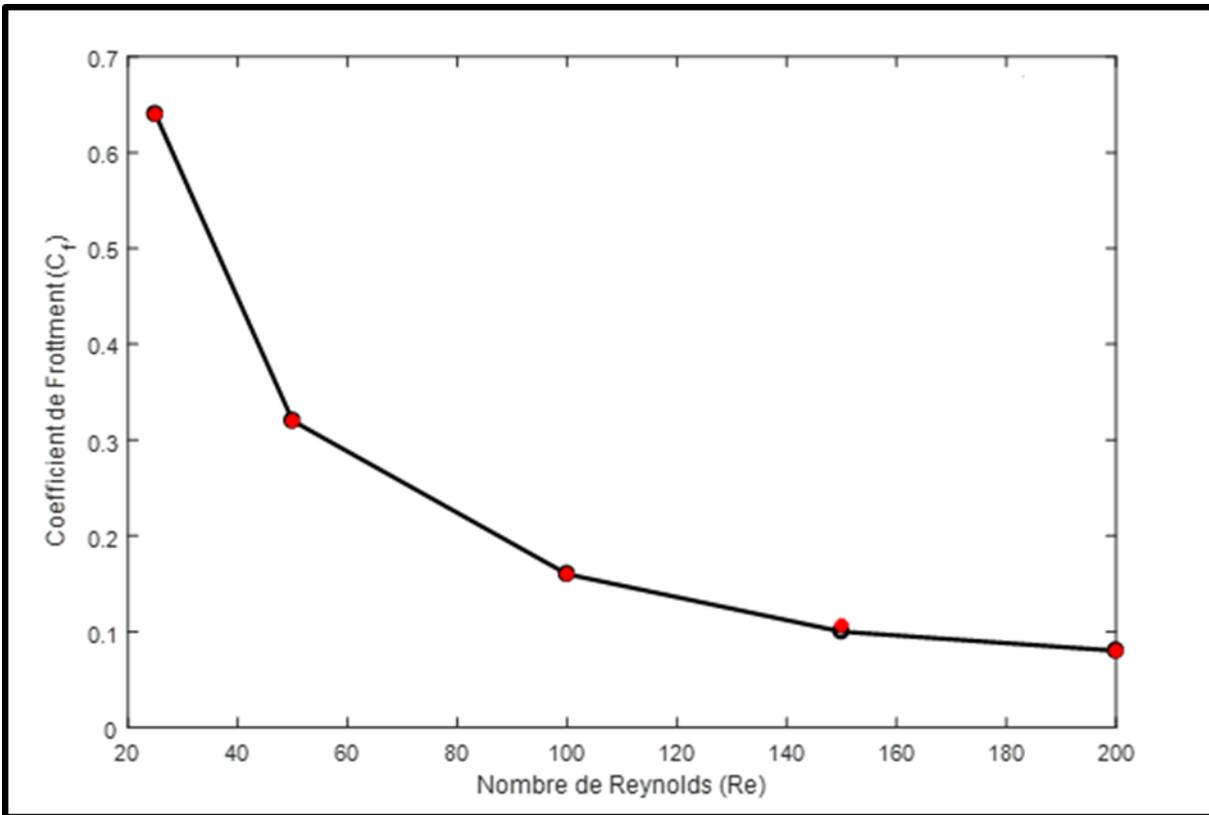
Pour les tableaux (4.1) ;(4.2) ; (4.3) on a calculé le coefficient de frottement ou le number de Reynolds généralisé est donner par l'équation (4.2).

$$Re_g = \frac{\rho u_m^{2-n} D_H^n}{8^{n-1} k (b + \frac{a}{n})^n} \quad (4.2)$$

Après de voir calculer le nombre de Re on pu calculer le coefficient frottement on utilisons l'équation (4.3).

$$Cf = \frac{K}{Re_g} \quad (4.3)$$

Pour savoir le comportement de fluide non newtonien pour ses deux phénomènes et à l'aide de tableau 4.2 on Tracer une fonction avec Matlab qui représente la variation de coefficient de frottement en fonction de nombre de Reynolds comme montres sur la figure (4.10).



**Figure 4.10 : la variation de coefficient de frottement en fonction de nombre de Reynolds**

La figure 4.9 représente la variation de coefficient de frottement en fonction de nombre de Reynolds, on observe qu'il y a une relation directe entre  $Re$  &  $C_f$  lorsque le nombre de Reynolds augmente le coefficient de frottement diminue.

### 4.4.2 Fluide Newtonien

On dit un fluide newtonien lorsque la contrainte de cisaillement augmente la viscosité augmente.

➤ Résultats analytiques

Re	Cf
34.41	0.464
68.82	0.232
137.64	0.116
172.05	0.092
206.46	0.077

Tableau 4.4 : la variation de Re & Cf pour le fluide newtonien

Les résultats sont établis avec l'équation (4.4)

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (4.4)$$

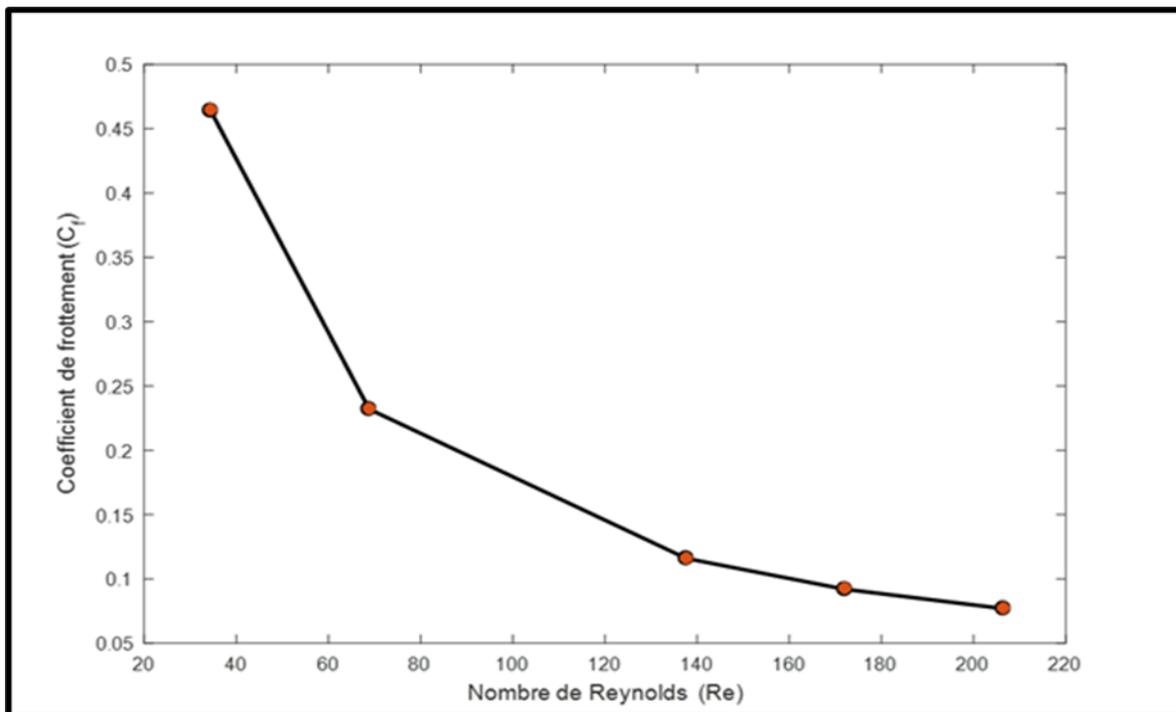


Figure 4.11 : la variation de Re par rapport à Cf pour le fluide newtonien

La figure 4.10 représente la variation de Re par rapport au Cf trace par Matlab, on observe que lorsque le nombre de Reynolds augmente le coefficient de frottement diminue pour le fluide newtonien.

➤ Par simulation

En utilisant ansys on a pu tracer la variation de nombre de Reynolds et le coefficient de frottement pour le fluide newtonien comme montre les figures (4.12) & (4.13).

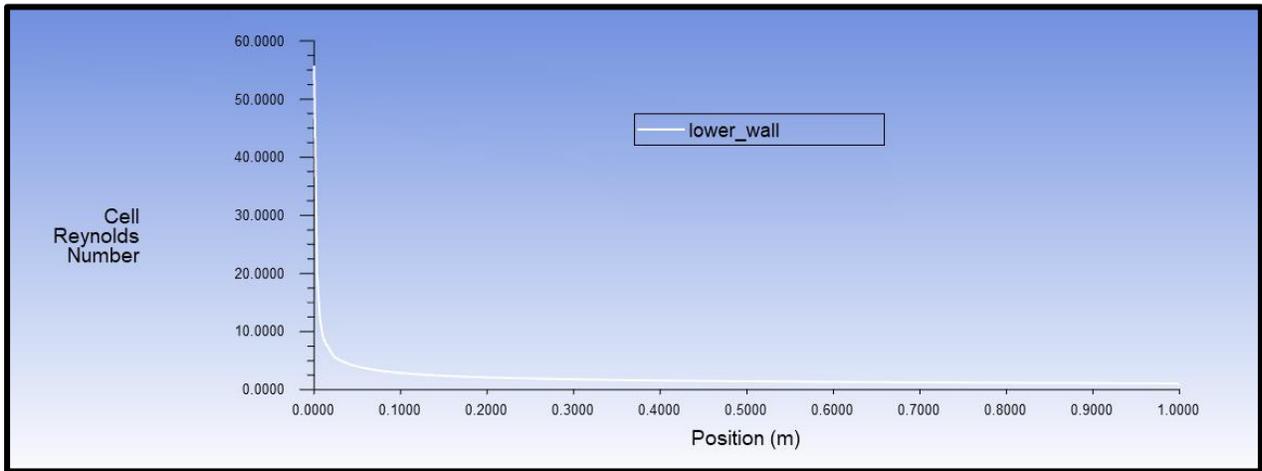


Figure 4.12 : La variation de nombre de Reynolds pour un fluide newtonien

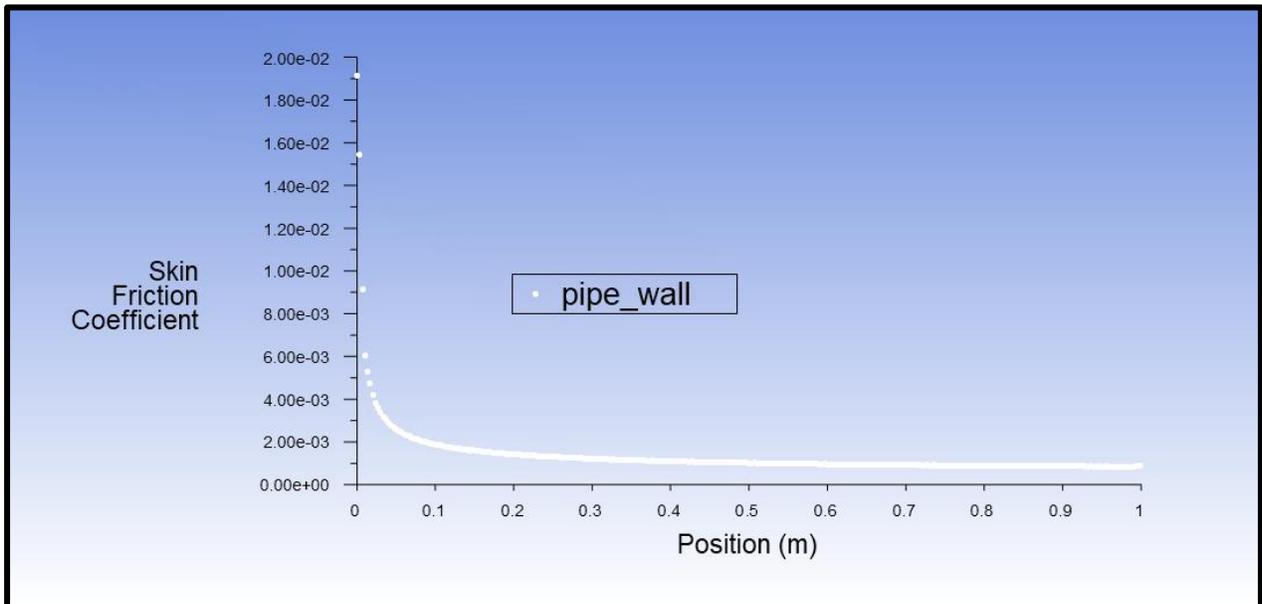


Figure 4.13 : Le coefficient de frottement pour un fluide newtonien

## 4.6 le modèle de Rayleigh-Bénard

L'écoulement de Rayleigh-Bénard est un exemple fascinant de la manière dont les différences de température peuvent entraîner des mouvements de convection dans un fluide, ce qui a des implications profondes dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques.

### 4.6.1 l'évolution de nombre de Rayleigh avec le nombre de Nusselt

Dans le cas de la convection de Rayleigh-Bénard, des relations empiriques et semi-empiriques ont été développées pour relier Nu et Ra. Voici quelques-unes des relations couramment utilisées :

Pour les faibles nombres de Rayleigh (convection laminaire) :

$$\mathbf{Nu = 1 + (C * Ra^n)} \quad \mathbf{(4.5)}$$

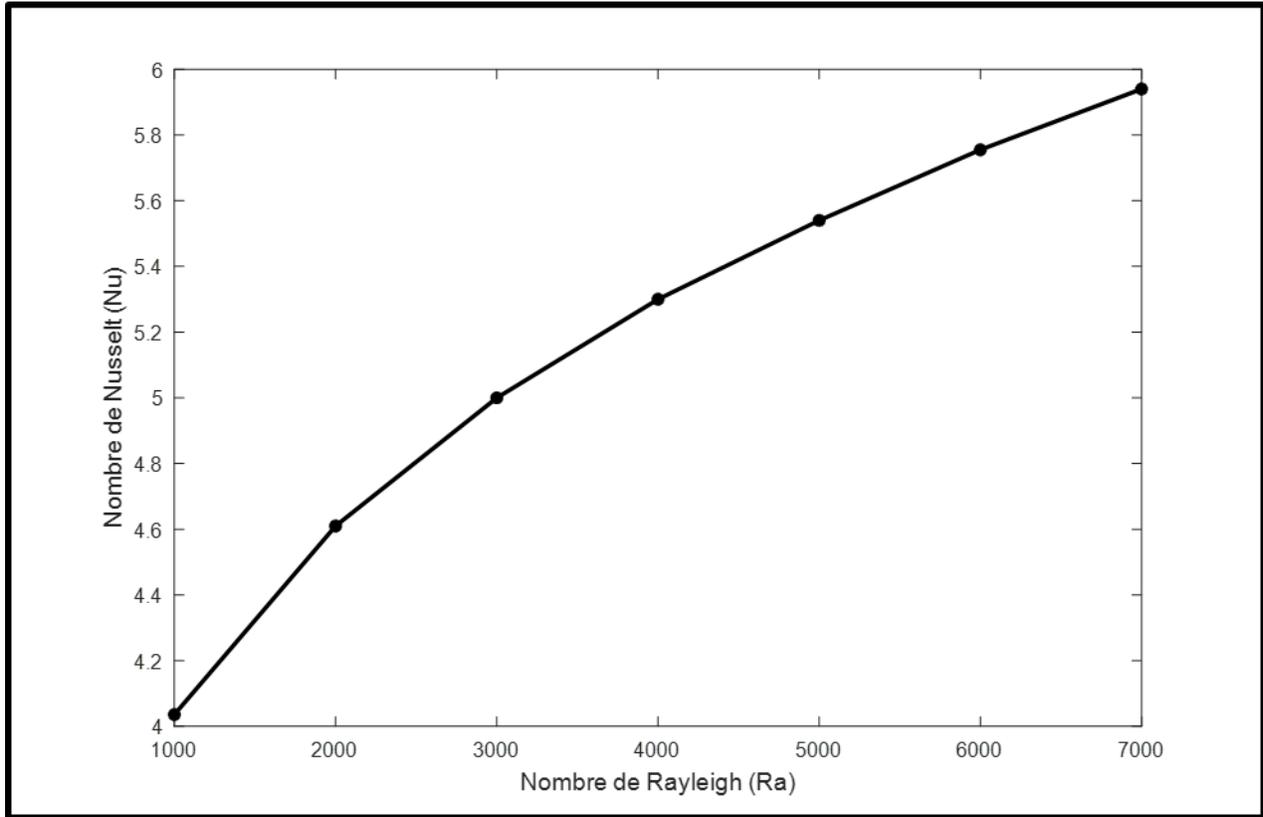
Où C et n sont des constantes déterminées empiriquement. Par exemple, pour un nombre de Prandtl (Pr) de l'ordre de 1 (comme l'eau à température ambiante), les valeurs typiques pourraient être C=0.54 et n=1/4.

#### Par simulation

Ra	$\Delta T$	Nu
1000	0.00007	4.036
2000	0.00015	4.61
3000	0.00022	5.00
4000	0.0003	5.3
5000	0.00037	5.54
6000	0.00045	5.75
7000	0.00052	5.94

**Tableau 4.5 : la variation de nombre de Rayleigh en fonction de nombre de Nusselt**

Pour savoir l'effet de la température sur le comportement de fluide on a tracer a laide de Matlab la fonction nombre de Ra en fonction de nombre de Nu (  $Nu = f(Ra)$ ) les résultats est représenter sur la figure (4.14).



**Figure 4.14 : Diagramme de Nombre de Rayleigh en fonction de nombre de Nusselt**

On observe que lorsque le nombre de Rayleigh Bénard est augmenté le nombre de Nusselt augmente avec la progression de faible nombre de Reynolds, alors la relation entre ces trois valeurs est directe.

4.6.2 les contours donner par Ansys

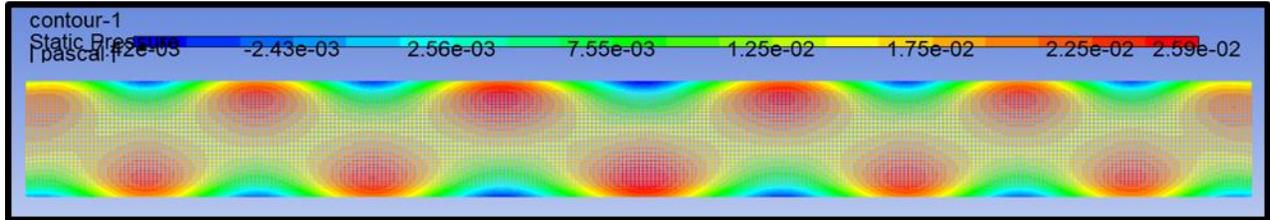


Figure 4.15 : le contour de pression de Rayleigh-Bénard

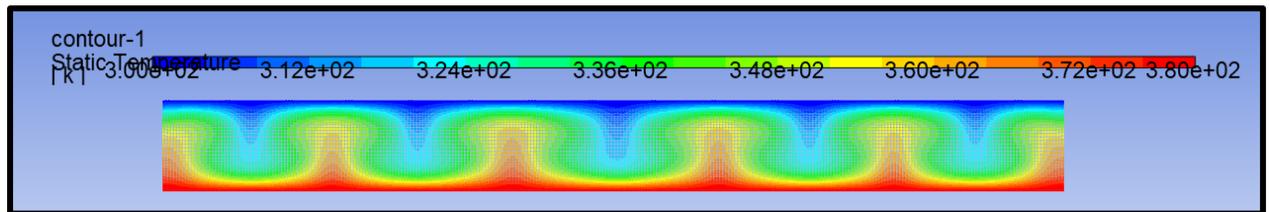


Figure 4.16 : Le contour de température

La figure (4.15) représente le contour de pression pour l'écoulement de Rayleigh-Bénard, et la figure (4.16) représente le contour de température pour le phénomène de Rayleigh-Bénard. D'après les résultats obtenus on remarque qu'il y a un mouvement et ce mouvement est causé par l'effet de température car la chaleur monte vers la paroi supérieure et le froid descend vers la paroi inférieure. Est ce qui nous aide à tracer ces contours.

## Discussion

Nous observons que les résultats des simulations fluides concordent généralement très bien avec la modélisation mathématique. Cela confirme que, dans les simulations numériques, le modèle de puissance fournit des résultats fiables pour les études rhéologiques de différents fluides non newtoniens avec une contrainte critique de cisaillement. En utilisant le code Fluent pour la simulation numérique, nous constatons que c'est le moyen le plus rapide pour obtenir des résultats précis par rapport aux expériences expérimentales, que nous avons prises comme référence.

Nous pouvons calculer le profil de vitesse en utilisant plusieurs modèles (par exemple, Herschel-Bulkley, Bingham, etc.). Nos résultats montrent que le fluide étudié est un fluide non newtonien avec une contrainte critique de type puissance. Nous remarquons que la vitesse est presque nulle à la paroi de la conduite et atteint une valeur maximale au centre, formant ainsi un profil de vitesse bien établi.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion

Dans ce travail on a étudié l'écoulement d'un fluide newtonien et non newtonien (poiseuille et Rayleigh Bénard et modèle loi de puissance), nous avons simulé numériquement l'effet de température appliquée sur la plaque inférieure de canal.

Le mode de transfert utilisé est la convection mixte en régime laminaire pour trouver les différents nombres de Reynolds et le coefficient de frottement ainsi que le nombre de Nusselt pour l'écoulement de Rayleigh Bénard et le taux de cisaillement.

Nous avons développé le modèle mathématique décrivent notre problème physique. Ensuite nous avons introduit la méthode de génération du maillage pour mailler les domaines physiques, et réécrire notre modèle mathématique dans un domaine de calcul plus simple. Le modèle numérique mis au point est basé sur la méthode des volumes finis.

Les résultats numériques obtenue par la méthode des volume finis sont validés et présentés pour analyser le comportement dynamique et thermique de l'écoulement.

Pour la configuration de fluide newtonien on a fixé le nombre de Reynolds entre 25 et 200 on obtient le nombre de coefficient de frottement avec logiciel de Ansys on trouve que le coefficient de frottement est diminué avec l'augmentation de nombre de Reynolds ainsi que la vitesse de l'écoulement.

Pour la configuration de fluide non-newtonien, l'analyse nous a donnée des valeurs de Reynolds entre 34 et 206 avec des valeurs de coefficient de frottement suivis par le dessin graphique de ce type d'écoulement.

Pour l'écoulement de Rayleigh Bénard on a fixé des faibles nombres de Reynolds entre 1000 et 7000. Pour ce type on a varié la température entre les murs pour achever le nombre de Nusselt.

Ces études nous ont aidée à comprendre le comportement des différents fluides en variation des différents phénomènes.

Ainsi que L'étude comparative de la loi de puissance appliquée aux fluides newtoniens et non newtoniens a permis de mettre en lumière plusieurs aspects fondamentaux de leur comportement rhéologique.

Pour les fluides newtoniens, la viscosité reste constante indépendamment du taux de cisaillement appliqué. Cette caractéristique simplifie l'analyse et la modélisation de leur comportement, car la relation entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement est linéaire. La loi de Newton, qui stipule que la contrainte de cisaillement est proportionnelle au taux de cisaillement, est suffisante pour décrire le comportement de ces fluides.

En revanche, les fluides non newtoniens présentent une complexité accrue due à la variation de leur viscosité en fonction du taux de cisaillement. Les fluides pseudo plastiques, dilatants et les fluides à seuil sont des exemples de comportements non newtoniens qui nécessitent des modèles plus sophistiqués pour être décrits adéquatement. La loi de puissance est souvent utilisée pour modéliser ces comportements, en particulier pour les fluides pseudo plastiques et dilatants.

L'analyse des résultats expérimentaux et des modèles théoriques montre que :

Pour les fluides newtoniens, la loi de Newton s'applique parfaitement, et la viscosité dynamique est indépendante du taux de cisaillement.

Pour les fluides non newtoniens, la loi de puissance offre une description utile et flexible. La viscosité apparente de ces fluides varie avec le taux de cisaillement selon la relation

Cette étude démontre l'importance de choisir le modèle approprié pour la caractérisation des fluides en fonction de leur nature newtonienne ou non newtonienne. Une compréhension approfondie des propriétés rhéologiques permet une meilleure conception et optimisation des processus industriels impliquant ces fluides.

Ainsi que L'étude comparative du nombre de Reynolds et du coefficient de frottement pour des fluides newtoniens et non newtoniens met en évidence des différences significatives dans leur comportement en écoulement. Ces différences ont des implications importantes pour la conception et l'optimisation des systèmes de transport de fluides.

## Nombre de Reynolds

- Pour les fluides newtoniens, le nombre de Reynolds ( $Re$ ) est un paramètre adimensionnel essentiel qui caractérise le régime d'écoulement, qu'il soit laminaire ou turbulent.
- Pour les fluides non newtoniens, le calcul du nombre de Reynolds doit être adapté pour prendre en compte la viscosité apparente, qui varie avec le taux de cisaillement.

## Coefficient de Frottement

Le coefficient de frottement ( $f$ ) est un autre paramètre clé dans l'analyse des écoulements de fluides. Pour les fluides newtoniens, des corrélations bien établies comme celles de Blasius ou de Colebrook-White permettent de déterminer  $f$  en fonction de  $Re$  et de la rugosité relative de la conduite.

Pour les fluides non newtoniens, le calcul du coefficient de frottement est plus complexe. Les modèles doivent intégrer la dépendance de la viscosité au taux de cisaillement, ce qui conduit à des expressions modifiées de  $f$  en fonction de  $Re_{eff}$  des caractéristiques spécifiques du fluide non newtonien.

Cette étude souligne l'importance de comprendre et de modéliser correctement les propriétés rhéologiques des fluides pour optimiser les systèmes de transport et de traitement. Les futures recherches devraient se concentrer sur le développement de corrélations plus précises et universelles pour les fluides non newtoniens, ainsi que sur l'utilisation de techniques de simulation numérique pour explorer des scénarios d'écoulement complexes.

## Bibliographie

- P.-L. Viollet, J.-P. Chabard, and P. Esposito, *Mécanique des fluides appliquée : Écoulements incompressibles dans les circuits, canaux et rivières, autour des structures et dans l'environnement*, 2003.
- FALL, "Rhéophysique des fluides complexes Ecoulement et Blocage de suspensions concentrées " doctorat, université Paris 7 2008.
- C. Verdier. Cours drhéologie. Available: <http://www.liphy.ujfgrenoble.fr/pagesperso/verdier/>
- D. S. Gillet Steve, "Viscosité," ed.
- R. Mohamed, "Simulation Numérique d'un Ecoulement Non Newtonien dans une Conduite rectangulaire avec une contraction brusque 4 :1 " magister université des sciences et de la technologie d'Oran, 2014
- J. Koszkuł and J. Nabialek, "Viscosity models in simulation of the filling stage of the injection molding process," *Materials Processing Technology*, vol. 157-158, pp. 183187, décembre 2004.
- "Rheologie des fluides complexes ", université des sciences et de la technologie d'Oran.
- C. W. Macosko, *Rheology Principles, Measurements, and Applications*, Wiley ed., 1994.
- M. M. Cross, "Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudo plastic systems," *Colloid Science*, Elsevier, vol. 20, 1965.
- Van Cleef, J. F. (2020). Gel rhéoépaississant pour compresser le pansement d'un ulcère veineux. *JMV-Journal de Médecine Vasculaire*, 45, S120-S121.
- Xavier Nicolas. Simulation numérique et stabilité des écoulements de convection mixte en conduite rectangulaire chauffée par le bas. *Mécanique des fluides [physics.class-ph]*. Université Paul Sabatier Toulouse III, 1997. Français. Tel-00812211.
- Mahfoud, M., Benhadid, S., & Lebouché, M. (2005). Frottements et pertes de pression des fluides non newtoniens dans des conduites non circulaires. *Comptes Rendus Mécanique*, 333(6), 513-520.
- H. Bénard, Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide transportant de la chaleur par convection en régime permanent, *Annales de chimie et de physique, Série 7*(23) :pp62-144, 1901 , J. W. Rayleigh, On convection current in a horizontal layer of fluid, When the higher temperature is on the under side, *The London, Edinburgh, and Dublin*

Philosophical Magazine and Journal of Science, Sixth series, Vol.32-no.192:pp.529-546,  
1916.Simulation et résolution 88

- F. KREITH Traduction de B. KHODJA, Transmission de la Chaleur et Thermodynamique, Ed. Masson, (1967).
- B. Ammar Instabilités thermo convectives dans un canal horizontal soumis à un phénomène de convection mixte. Université El Hadj Lakhdar Batna (2012).
- X. Nicolas Simulation numérique et stabilité des écoulements de convection mixte en conduite rectangulaire chauffée par le bas, Université de Paul Sabatier - Toulouse III, (1997).
- P. Idrac Étude sur les courants de convection atmosphérique et leur rapport avec le vol à voile et la formation des bandes nuageuses (1920).
- De Langre, E. (2000). Analyse dimensionnelle en interaction fluide-structure. La Houille Blanche, (3-4), 14-18.
- M. BELHI. Étude Numérique de la Convection Naturelle dans une Cavité ayant plusieurs entrées, Mémoire De Magister (2007).
- [Thermal-engineering.org/fr/quest-ce-que-external-vs-internal-nusselt-nuberdefinition/](http://Thermal-engineering.org/fr/quest-ce-que-external-vs-internal-nusselt-nuberdefinition/)

