



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de  
Master en génie mécanique  
Option Installations Energétiques et Turbomachines.

**THEME**

SIMULATION NUMERIQUE DE  
COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN NANO  
FLUIDE DANS UN ECHANGEUR DE CHALEUR  
TUBULAIRE

Encadré par :  
Mr. SALHI Merouane

Réalisé par :  
LADJADJ Ali  
BELKACEMI Abdemalek  
DJEGHBOUB Oussama

Année universitaire 2020/2021.

# Remerciements

Dans mon imaginaire, l'écriture de cette page était loin de représenter autant de choses ; la joie immense d'avoir mené ce projet à bien mais aussi la tristesse qui cache toujours derrière le mot fin. Rien n'aurait été possible seule. Par cette simple phrase, cette page prend ici tout son sens et la peur d'oublier quelqu'un. A tous ceux-là, merci.

J'exprime toute ma gratitude à monsieur **SALHI** et monsieur **ROUDANE** pour avoir accepté d'encadrer ce travail. Pour m'avoir supporté dans les moments de doute comme dans les moments d'allégresse, pour son enthousiasme permanent et ses implications tant humaines que scientifiques ainsi que pour la confiance qu'il a bien voulu m'accorder tout au long de ce travail...merci

# *Dédicaces*

---

*Je m'incline devant dieu tout puissant qui m'a ouvert la porte de savoir et m'a aidé à la franchir.*

*Je dédier ce modeste travail :*

*A ma chère et tendre mère, source d'affection de courage et d'inspiration qui autant sacrifier pour me voire atteindre ce jour.*

*A mon frère.*

*A toutes mes sœurs.*

*A mes tantes, oncles, cousines et cousins et A toute ma famille et nos proches. Je suis reconnaissant à mon binôme du projet de fin d'étude Belgacemi Abdelmalek et djeghboub Oussama pour les moments de découverte et de compréhension communs et pour notre sincère amitié. J'adresse à l'occasion mes salutations à toute la famille Belgacemi et djeghboub et leurs proches.*

*Tout le respect et gratitude à tous mes enseignants, généralement du département de mécanique de l'université de Blida, spécialement mon promoteur Mr M. Salhi.*

*A mes amis*

*A toute la promotion 2021 sans exception.*

*Je remercie enfin tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans L'accomplissement de ce travail.*

***Ladjadj***

# *Dédicaces*

---

Je m'incline devant dieu tout puissant qui m'a ouvert la porte de savoir et m'a aidé à la franchir.

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère et tendre mère, source d'affection de courage et d'inspiration qui autant sacrifier pour me voir atteindre ce jour.

A mon père source de respect, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour tout l'effort et le soutien incessant qui m'a toujours apporté.

A mes frères.

A toutes mes sœurs.

A mes tantes, oncles, cousines et cousins et A toute ma famille et nos proches. Je suis reconnaissant à mon binôme du projet de fin d'étude Ladjadj ali et Djeghboub Oussama pour les moments de découverte et de compréhension communs et pour notre sincère amitié. J'adresse à l'occasion mes salutations à toute la famille Ladjadj et Djeghboub leurs proches.

Tout le respect et gratitude à tous mes enseignants, généralement du département de mécanique de l'université de Blida, spécialement mon promoteur Mr M. Salhi.

A mes amis

A toute la promotion 2021 sans exception.

Je remercie enfin tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans

L'accomplissement de ce travail.

*Belkacemi*

# *Dédicaces*

---

*Je m'incline devant dieu tout puissant qui m'a ouvert la porte de savoir et m'a aidé à la franchir.*

*Je dédier ce modeste travail :*

*A ma chère et tendre mère, source d'affectation de courage et d'inspiration qui autant sacrifier pour me voire atteindre ce jour.*

*A mon père source de respect, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour tout l'effort et le soutien incessant qui m'a toujours apporté.*

*A mes frères.*

*A toutes mes sœurs.*

*A mes tantes, oncles, cousines et cousins et A toute ma famille et nos proches.*

*Je suis reconnaissant à mon binôme du projet de fin d'étude Ladjadj ali et Belgacemi Abdelmalek pour les moments de découverte et de compréhension communs et pour notre sincère amitié. J'adresse à l'occasion mes salutations à toute la famille Ladjadj et Belgacemi leurs proches.*

*Tout le respect et gratitude à tous mes enseignants, généralement du département de mécanique de l'université de Blida, spécialement mon promoteur Mr M. Salhi.*

*A mes amis*

*A toute la promotion 2021 sans exception.*

*Je remercie enfin tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.*

***Djeghbou6***

## Résumé :

Dans ce travail nous avons fait une simulation numérique sur le comportement thermique d'un nanofluide dans un échangeur de chaleur tubulaire a l'aide de « ANSYS-FLUENT, GAMBIT » Pour les nanofluide fluides utilisée dans cette étude nous avons considère quatre nano particules : le cuivre (Cu), l'aluminium (Al),

L'oxyde de l'aluminium ( $Al_2O_3$ ) et l'oxyde de cuivre (CuO) dans un fluide de base comme l'eau. L'effet de certains paramètres tels que, le type de nanofluide et la concentration de cette nanoparticule sur le champ dynamique et le transfert de chaleur a été étudié. Nos résultats obtenus prouvent être résume comme suit :

- Ajoutes une nanoparticule permet d'améliorer le transfert thermique
- Dans la construction de l'échangeur de chaleur, il faut choisir une géométrie qui donne un bon échange thermique et une minimum perte de charge.

**Les mots clés :** échangeur de chaleur, thermodynamique, faisceau de tubes, fluent.

## ملخص:

في هذا العمل، قمنا بعمل محاكاة عددية للسلوك الحراري لمائع نانوي في مبادل حراري أنبوبي باستخدام-ANSYS "FLUENT ، GAMBIT بالنسبة للسوائل النانوية السائلة المستخدمة في هذه الدراسة، اعتبرنا أربع جسيمات نانوية: النحاس (Cu) ، الألومنيوم (Al) وأكسيد الألومنيوم ( $Al_2O_3$ ) وأكسيد النحاس (CuO) في سائل أساسي مثل الماء. تمت دراسة تأثير معلمات معينة مثل نوع السائل النانوي وتركيز هذه الجسيمات النانوية على المجال الديناميكي وانتقال الحرارة. تثبت نتائجنا التي تم الحصول عليها على النحو التالي:

-إضافة جسيمات نانوية لتحسين نقل الحرارة

-في بناء المبادل الحراري ، يجب اختيار الشكل الهندسي الذي يعطي تبادلاً جيداً للحرارة وأدنى انخفاض في الضغط.

**الكلمات المفتاحية:** المبادل الحراري، تدفق الحمل الحراري، حزمة انابيب. تدفق الكتلة.

**Abstract:**

In this work we made a numerical simulation on the thermal behavior of a nanofluid in a tubular heat exchanger using “ANSYS-FLUENT, GAMBIT” For the fluid nanofluids used in this study we considered four nanoparticles: copper (Cu), aluminum (Al),

Aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and copper oxide (CuO) in a base fluid like water. The effect of certain parameters such as the type of nanofluid and the concentration of this nanoparticle on the dynamic field and heat transfer has been studied. Our results obtained prove to be summarized as follows:

- Add a nanoparticle to improve heat transfer
- In the construction of the heat exchanger, a geometry must be chosen which gives good heat exchange and minimum pressure drop.

**The key words:** heat exchanger, thermodynamics, tube bundle, fluent.

# TABLE DES MATIERES

## LISTE DES FIGURES

## LISTE DES TABLEAUX

## NOMENCLATURE

## INTRODUCTION

## CHAPITRE I : TRANSFERT DE CHALEUR

Introduction : .....	4
I.1 Modélisation du transfert de chaleur : .....	4
I.1.1 Définition du Conduction de la chaleur : .....	4
I.2 Modélisation de la diffusion : .....	5
I.2.1 Loi de Fourier :.....	5
I.2.2 Conductivité thermique : .....	6
I.2.3 Lien entre chaleur spécifique et conductivité thermique : .....	6
I.2.4 Expression de la loi de Fourier dans diverses configurations géométriques : ....	7
I.3 Équation de diffusion de la chaleur : .....	8
I.4 Notion de régime permanent et transitoire : .....	10
I.8 convections : .....	12
I.9 Couches limites en transfert par convection : .....	13
I.9.1 Couche limite hydrodynamique : .....	14
I.9.2 Couche limite thermique : .....	14
I.9.3 Écoulement laminaire et turbulent : .....	17
I.10 Convection Forcée : .....	18
I.10.1 Expressions du coefficient de convection h en convection forcée : .....	19
I.10.2 Régime laminaire : .....	19
I.10.3 Régime turbulent : .....	22
I.11 Convection naturelle : .....	24
I.11.1 Expressions du coefficient de convection h en convection naturelle : .....	24
I.11.1.1 Canalisation : .....	24
I.11.1.2 Cylindre concentrique : .....	26

I.12 Le rayonnement :	26
I.12.1 Nature du rayonnement :	27
I.13 Conclusion :	27

## **CHAPITRE II : NANOFUIDE**

Introduction :	28
II.1 Définition d'un nanofluide :	28
II.2 Applications des nanofluides :	39
II.2.1 Applications de transfert de chaleur :	39
II.2.2 Applications automobiles :	32
II.2.3 Applications électroniques :	34
II.3 Autres applications :	34
II.4 Types de nanoparticules :	45
II.4.1 Les nano particules les plus utilisées pour obtenir des nano fluides :	35
II.4.1.1 Nanoparticules des oxydes métalliques :	35
II.4.1.2 nanoparticules métalliques :	35
II.4.1.3 nanoparticules non métalliques :	36
II.5 Fluides de base le plus utilisés sont :	36
II.6 Méthodes de préparation pour les nano fluides :	36
II.6.1. Méthode à deux étapes :	37
II.6.2. Méthode en une étape :	37
II.6.3. Production des nano fluides et nanoparticules :	37
II.7 Avantages des nanofluides :	38
II.8 Inconvénients des fluides :	39
II.9 Caractéristiques thermo physiques des nano fluides :	39
II.9.1 La Masse volumique ( $\rho$ ) :	39
II.9.2 La chaleur spécifique ( $C_p$ ) :	40
II.9.3 La Conductivité thermique ( $k$ ) :	40
II.9.4 Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ) :	41
II.9.5 viscosités( $\mu$ ) :	42
II.10 Conclusion :	43

## **CHAPITRE III : MODELE MATHEMATIQUE**

INTRODUCTION :	44
III.1 Principe de la méthode des volumes finis	44
III.1.1 Maillage	46
III.1.1. 1 Choix de maillage	47
III.1.1. 2 Connectivité	48
III.2 Problème stationnaire de diffusion pure	48
III.3 Les étapes à suivre pour la modélisation numérique par Fluent	49
III.4 Simulation des grandes structures turbulentes (LES) :	49
III.5 la Géométrie :	50
III.6 Le processeur GAMBIT :	51
• Démarrage de GAMBIT :	51
• Créations les points :	52
• Création les lignes :	52
• Création les faces :	53
- Maillage des parois :	54
- Maillage des surfaces :	55
III.7 Code FLUENT :	57
• Démarrage fluent :	62
• Critère de la convergence :	63
• Affichage de contour :	64
III.8 Conclusion :	64

## **CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATION**

Introduction :	65
IV.1 simulations d'un faisceau d'un échangeur thermique avec ANSYS :	65
IV.2 Le critère de convergence :	65
IV.3 Les contours des paramètres thermodynamiques :	66
IV.3.1- La pression :	66
IV.3.2-La vitesse :	73
IV.3.3- La température :	81
Conclusion :	95

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : tube de flux de chaleur.....	5
Figure I.2 : Conductivité orthotrope d'un matériau composite tissé.....	7
Figure I.3 : Conductivité orthotrope d'un matériau fibré.....	7
Figure I.4 : Bilan thermique sur un transfert 1D par conduction et convection : .....	9
Figure I.5 : Un barreau cylindrique est chauffé à une de ses extrémités. Deux thermocouples permettent de mesurer l'évolution de la température en deux points de l'axe du barreau au cours du temps.....	10
Figure I.6 : Évolution de la température aux deux thermocouples au cours du temps.....	11
Figure I.7 : Mesure de température par thermocouple : .....	12
Figure I.8 : Transfert de chaleur par convection ; a) sur une surface quelconque, b) sur une surface plane : .....	13
Figure I.9 : Développement de couche limite hydrodynamique sur une surface plane.....	14
Figure I.10 : Développement de la couche limite thermique sur une surface plane.....	16
Figure I.11 : Expérience d'Osborne Reynolds sur la transition entre le régime laminaire et turbulent d'écoulement dans un tube de diamètre D.....	17
Figure I.12 : Développement de couche limite sur une longue surface plane : .....	17
Figure I.13 : Écoulement autour d'un cylindre : .....	20
Figure I.14 : Écoulement autour d'un faisceau de tubes : a) disposition alignée ; b) disposition en quinconce : .....	21
Figure I.15 : Écoulement entre deux tubes concentriques : .....	23
Figure I.16 : Échange par convection naturelle entre deux surfaces a) verticales ; b) horizontales, avec formation de cellules de <i>Banard</i> : .....	25
Figure I.17 : Échange par convection naturelle dans un espace entre deux cylindres : .....	26
Figure I.18 : Principe de l'expérience de William Herschel : .....	27
Figure II. 1 : Échelle des dimensions, 1 nanomètre = 0,000 001 millimètre.....	29
Figure II.2 : Nanoparticules sphériques ; nanotubes de carbone.....	35
Figure III.1: la géométrie d'étude.....	46
Figure III.2 volumes de contrôle bidimensionnel : .....	47
Figure III.3 Schéma de maillage (a) maillage décalé pour $u_e$ (b) maillage décalé pour $v_n$ (c) : .....	48

Figure III.4 : Exemples de maillages : .....	50
Figure III.5 : Démarrage de Gambit.....	51
Figure III.6: Création les point.....	52
Figure III.7: Création des lignes .....	53
Figure III.8 : Création des faces.....	54
Figure III.9 : Maillage des surfaces.....	55
Figure III.10 : les conditions aux limites.....	56
Figure III.11: Exporter le maillage.....	56
Figure III.12 : Affichage du maillage.....	58
Figure III.13 : Définition du modèle.....	58
Figure III.14: Définie équation d'énergie.....	59
Figure III.15: Définition le model d'écoulement.....	59
Figure III.16: Définition des propriétés des matériaux.....	59
Figure III.17: Définition des conditions aux limites.....	60
Figure III.18: Control la solution.....	61
Figure III.19: Initialisation la vitesse et la température à l'entrée.....	61
Figure III.20: Les résidus des calculs.....	62
Figure III.21: critère de la convergence.....	63
Figure III.22: affichage de contour.....	64
Figure IV.1 : Critère de la convergence d'aluminium dans une concentration de 0.1 .....	65
Figure IV.2: Contour de la pression dans le faisceau de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.025 .....	66
Figure IV.3: Contour de la pression dans le faisceau de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre CuO a une concentration égale 0.025.....	66
Figure IV.4 : Contour de la pression dans le faisceau de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.025.....	66
Figure IV.5 : Contour de la pression dans le faisceau de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a une concentration égale 0.025.....	66
Figure IV.6 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.05.....	67

Figure IV.7 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre CuO a une concentration égale 0.05.....	67
Figure IV.8 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.05.....	67
Figure IV.9 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a une concentration égale 0.05.....	67
Figure IV.10 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.075.....	68
Figure IV.11 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre CUO a une concentration égale 0.075.....	68
Figure IV.12 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.075.....	68
Figure IV.13 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a une concentration égale 0.075.....	68
Figure IV.14 : Contour de la pression dans le faisceau de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.1.....	69
Figure IV.15 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre CuO a une concentration égale 0.1.....	69
Figure IV.16 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.1.....	69
Figure IV.17 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a une concentration égale 0.1.....	70
Figure IV.18 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.3 .....	70
Figure IV.19 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre CuO a une concentration égale 0.3.....	70
Figure IV.20 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.3.....	71
Figure IV.21 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a une concentration égale 0.3.....	71
Figure IV.22 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.5.....	72
Figure IV.23 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre CuO a une concentration égale 0.5.....	72
Figure IV.24 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.5.....	72

Figure IV.25 : Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium $Al_2O_3$ a une concentration égale 0.5.....	72
Figure IV.26 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.025 .....	73
Figure IV.27 : Contour de la Vitesse dans le faisceau de l'échangeur pour l'oxyde cuivre CuO a une concentration égale 0.025 .....	73
Figure IV.28 : Contour de la Vitesse dans le faisceau de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.025.....	74
Figure IV.29 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium $Al_2O_3$ a une concentration égale 0.025.....	74
Figure IV.30 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.05 .....	74
Figure IV.31 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde cuivre CuO a une concentration égale 0.05.....	74
Figure IV.32 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.05.....	75
Figure IV.33 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium $Al_2O_3$ a une concentration égale 0.05.....	75
Figure IV.34 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.075 .....	75
Figure IV.35 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde cuivre CuO a une concentration égale 0.075.....	75
Figure IV.36 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.075.....	76
Figure IV.37: Contour de la Vitesse dans le faisceau de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium $Al_2O_3$ a une concentration égale 0.075 .....	76
Figure IV.38 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.1.....	76
Figure IV.39 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde cuivre CuO a une concentration égale 0.1 .....	76
Figure IV.40 : Contour de la Vitesse dans le faisceau de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.1.....	77
Figure IV.41 : Contour de la Vitesse dans le faisceau de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium $Al_2O_3$ a une concentration égale 0.1.....	77
Figure IV.42 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.3.....	78

Figure IV.43 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde cuivre CuO a une concentration égale 0.3.....	78
Figure IV.44 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.3.....	78
Figure IV.45 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a une concentration égale 0.3 .....	78
Figure IV.46 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.5 .....	79
Figure IV.47 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde cuivre CuO a une concentration égale 0.5.....	79
Figure IV.48 : Contour de la Vitesse dans le faisceau de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.5.....	80
Figure IV.49 : Contour de la Vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a une concentration égale 0.5.....	80
Figure IV.50 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.025.....	81
Figure IV.51 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre CUO a une concentration égale 0.025.....	81
Figure IV.52 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.025.....	82
Figure IV.53 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a une concentration égale 0.025.....	82
Figure IV.54 : Contour de la température statique dans le faisceau de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.05.....	82
Figure IV.55 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre CUO a une concentration égale 0.05.....	82
Figure IV.57: Contour de la température statique dans le faisceau de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.05.....	83
Figure IV.58 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a une concentration égale 0.05.....	83
Figure IV.59 : Contour de la température statique dans le faisceau de l'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.075.....	83
Figure IV.60 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre CuO a une concentration égale 0.075.....	84
Figure IV.61 : Contour de la température statique dans le faisceau de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.075.....	84

Figure IV.62 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium $Al_2O_3$ a une concentration égale 0.075.....	84
Figure IV.63 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre $Cu$ a une concentration égale 0.1.....	84
Figure IV.64 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre $CuO$ a une concentration égale 0.1.....	85
Figure IV.65 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium $Al$ a une concentration égale 0.1.....	85
Figure IV.66 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium $Al_2O_3$ a une concentration égale 0.1.....	86
Figure IV.67 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre $Cu$ a une concentration égale 0.3.....	86
Figure IV.68 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre $CuO$ a une concentration égale 0.3.....	86
Figure IV.69 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium $Al$ a une concentration égale 0.3.....	86
Figure IV.70 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium $Al_2O_3$ a une concentration égale 0.3.....	87
Figure IV.71 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour le cuivre $Cu$ a une concentration égale 0.5.....	87
Figure IV.72 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre $CuO$ a une concentration égale 0.5.....	88
Figure IV.73 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'aluminium $Al$ a une concentration égale 0.5.....	88
Figure IV.74 : Contour de la température statique dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium $Al_2O_3$ a une concentration égale 0.5.....	88
Figure IV.75 : nombre de nusselt en fonction de concentration.....	91
Figure IV.76 : température de sortie en fonction de concentration.....	92
Figure IV.77 : la vitesse max en fonction de concentration.....	92
Figure IV.78 : Coefficient de transfert de chaleur en fonction de concentration.....	93
Figure IV.79 : Flux de chaleur en fonction de concentration.....	93

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1 : combinaisons nanoparticules / fluide de base.....	47
Tableau. III. 1. Différentes formes de maillage des faces : .....	47
Tableau IV.1 :la température de sortie, la vitesse maximale, coefficient de transfert de chaleur, nombre de nusselt, le flux de chaleur de cuivre en fonction de concentration.....	89
Tableau IV.2 :la température de sortie, la vitesse maximale, coefficient de transfert de chaleur, nombre de nusselt, le flux de chaleur de l'aluminium en fonction de concentration.....	90
Tableau IV.3 :la température de sortie, la vitesse maximale, coefficient de transfert de chaleur, nombre de nusselt, le flux de chaleur de l'oxyde de cuivre en fonction de concentration.....	90
Tableau IV.4 :la température de sortie, la vitesse maximale, coefficient de transfert de chaleur, nombre de nusselt,le flux de chaleur de l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration.....	91

# Nomenclature

## LETTRES LATINES

$C_f$	Coefficient de frottement pariétal
$C_p$	Coefficient de pression
$CP$	Chaleur spécifique à pression constante
$D$	Diamètre du cylindre
$d$	Diamètre moyen des nanoparticules
$f$	La fréquence de lâcher tourbillonnaire
$g$	Accélération de pesanteur
$k$	Conductivité thermique
$Nu$	Nombre de Nusselt moyen
$P$	Pression adimensionnelle
$Pr$	Nombre de Prandtl
$Re$	Nombre de Reynolds
$t$	Temps
$T$	Température adimensionnelle
$U.V.W$	Composante de vitesse suivant la direction

## LETTRES GRECQUES

$a$	Diffusivité thermique du fluide
$\alpha$	Vitesse de rotation
$\Omega$	Vitesse angulaire
$\beta$	Coefficient d'expansion thermique
$\mu$	Viscosité dynamique
$\varphi$	Fraction volumique des nanoparticules
$\rho$	Masse volumique
$\nu$	Viscosité cinématique
$\Psi$	Sphéricité
$\theta$	Angle

## INDICES ET SYMBOLES INFÉRIEURS

$\mathcal{C}$	Cylindre
$f$	Fluide de base
$nf$	Nano fluide
$S$	Particule solide
$\infty$	Exterieur

## INTRODUCTION

Les nano fluides sont des suspensions liquides diluées de nanoparticules dont au moins une des dimensions principales est inférieure à 100 nm. Des études précédentes, les nano fluides ont été propriétés thermo physiques améliorées telles que comme conductivité thermique, diffusivité thermique, viscosité et coefficients de transfert de chaleur convectif comparés à ceux de fluides de base comme l'huile ou l'eau.

Le développement des nanotechnologies constitue un challenge pour les années à venir les nanosciences étudient la structure de la matière au niveau moléculaire donc à l'échelle nanométrique dans le but d'innover dans de nombreux domaines tels que : l'environnement, la production et le stockage de l'énergie, le refroidissement des composants électronique, la biologie, le diagnostic médical, le traitement de l'eau, etc.....

En ce qui concerne les applications dans le domaine du transfert de chaleur, des études menées une dizaine d'années ont montré que dans certaines conditions, l'ajout de particules nanométriques dans un fluide (appelé alors nano fluide) pouvaient augmenter le transfert de chaleur par rapport au cas du corps pur (eau), en modifiant de manière significative les propriétés thermo physiques du fluide porteur.

La nano fluidique est une miniaturisation ultime des laboratoires sur puces, et correspond au contrôle d'écoulement dans des dispositifs nanométriques. Le nano fluide est compatible avec des éléments électroniques et présente une conductivité thermique améliorée lui permettant une utilisation dans le refroidissement d'éléments électronique etc.....

Les nano fluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide. Leurs propriétés thermiques étonnantes en ont fait l'objet d'intenses investigations durant la dernière décennie.

Dans ce travail, nous présentons une investigation numérique sur l'écoulement et le transfert de chaleur dans un faisceau des tubes

Le présent mémoire comporte Quatre chapitres :

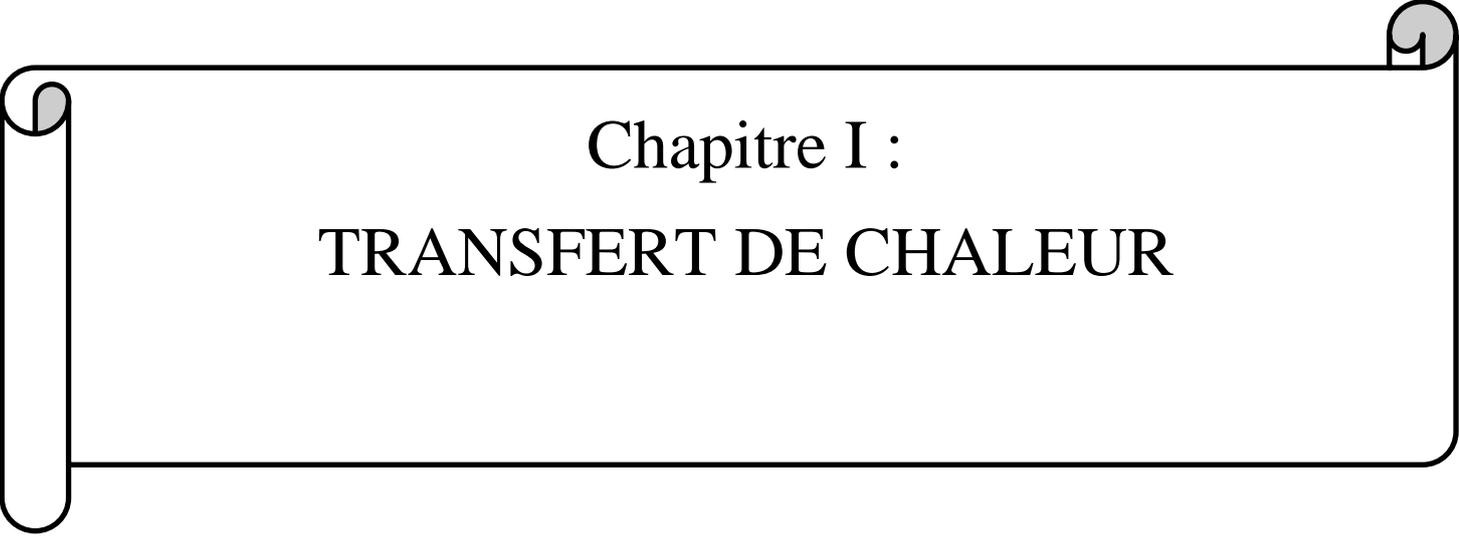
Après cette brève introduction, nous abordons dans le premier chapitre nous avons mentionné les généralités et les notions de base en transfert de chaleur.

Le deuxième chapitre est basé sur nano fluide leurs définitions, les applications, les types, les avantages Ets

Le troisième chapitre. Nous avons présenté la méthode de simulation par le code de calcul Fluent et le logiciel Gambit qu'il permet de dessiner la géométrie et leur maillage. Nous avons présenté également, dans ce chapitre, les équations de dérivés partielles gouvernent notre problème d'étude, les conditions aux limites qu'ils conviennent et aussi les dimensions de notre domaine de calcul.

Dans le quatrième chapitre, nous évaluerons et discuterons les résultats de simulation.

Enfin, ce mémoire sera terminé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.



Chapitre I :  
TRANSFERT DE CHALEUR

## INTRODUCTION :

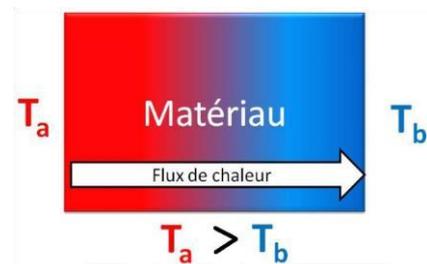
Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'existe entre eux une différence de température et cela quel que soit le milieu même vide qui les sépare. A la base de l'étude de transfert thermique se trouvent les principes de quantité de chaleur et de différences de température définis par la thermodynamique dans ses principes même. La thermodynamique représente une partie importante de la physique technique qui étudie les lois de la production de la chaleur ayant à la base d'autres formes d'énergie, sa transformation, sa propagation et son utilisation pratique. La notion de chaleur est définie par la thermodynamique comme étant une grandeur de parcours représentant une forme transitoire d'énergie qui se propage à la suite d'une différence de température soit :

- Entre deux parties d'un système quelconque ;
- Entre le système et son environnement ;
- Entre deux systèmes séparés par un milieu matériel ou pas (vide).

### I. 1 Modélisation du transfert de chaleur :

#### I. 1.1 Définition de la conduction thermique :

La conduction thermique est un transfert thermique ayant lieu au cœur d'un matériau c'est-à-dire à l'échelle microscopique. Elle résulte de l'élévation ou de la baisse de la température dans une certaine région d'un corps. Ceci provoque une différence de température dans l'intégrité du corps. Ainsi la région la plus froide du corps s'échauffe au contact de la région la plus chaude.



Ce transfert thermique a lieu sans transfert de matière mais avec transfert d'énergie. En effet, on peut considérer la conduction thermique au sein d'un solide comme la transmission de proche en proche de l'énergie microscopique de vibration du réseau cristallin. Car le fait que le corps soit chaud se traduit par une agitation microscopique des atomes composant le réseau cristallin.

Dans notre cas, lorsque l'extrémité de l'ailette est mise en contact avec le dispositif de chauffage, le phénomène de conduction thermique se traduit par une élévation progressive de la température dans la totalité de l'ailette et surtout dans les parties froides (l'autre extrémité).

## I. .2 MODÉLISATION DE LA DIFFUSION :

### I. .2.1 LOI DE FOURIER :

Le transfert de chaleur par diffusion a été pour la première fois abordée par J. Fourier, dans son *Traité analytique de la chaleur* où il introduit aussi ses fameuses décompositions en série. La relation de Fourier est phénoménologique, c'est-à-dire issue de résultats expérimentaux. En effet, le lien entre les phénomènes microscopiques et macroscopiques, que nous avons vu précédemment, n'a pu être modélisé que grâce aux outils de la mécanique statistique et quantique. Or, si ces outils n'existaient pas encore à l'époque de Fourier, il est bien évident que le phénomène de diffusion à l'échelle macroscopique était observable et que comme il était alors possible de mesurer une température, rien n'empêchait de proposer une relation issue de ces mesures. Pour bien comprendre la signification de cette relation, reportons-nous à la figure 1.1. Sur cette figure est représenté un matériau homogène et isotrope sous la forme d'un tube supposé parfaitement isolé à sa périphérie. On note  $S$  la section du tube et  $l$  sa longueur. Les températures aux deux extrémités du tube, notées  $T_1$  et  $T_2$ , sont imposées et constantes au cours du temps. Un flux de chaleur apparaît dans la direction des hautes températures vers les basses températures. Les lignes de flux sont définies comme les lignes perpendiculaires aux isothermes dans le tube. On note  $\vec{x}$  le vecteur tangent aux lignes de flux. Comme le tube est parfaitement isolé sur sa périphérie, aucune ligne de flux ne sort du tube et donc le flux est constant tout le long du tube. J. Fourier obtient expérimentalement que lorsque les températures sont stabilisées dans le temps (régime stationnaire), il existe une relation liant le flux à l'écart de température entre l'entrée et la sortie sous la forme :

$$\vec{\Phi} = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{l} \vec{x} \quad (1.1)$$

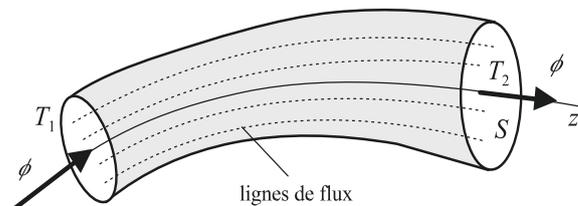


Figure I.1 : tube de flux de chaleur.

Lorsque l'on fait tendre la longueur  $l$  vers 0, on trouve l'expression du flux de conduction sous la forme différentielle :

$$\vec{\Phi} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \vec{x} \quad (1.2)$$

En généralisant la relation à une configuration tridimensionnelle, on obtient :

$$\vec{\Phi} = -\lambda S \vec{\nabla} T \quad (1.3)$$

L'opérateur  $\vec{\nabla} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$  désigne le vecteur gradient. On définit la densité de flux comme le rapport du flux à la section de passage :

$$\vec{\Phi} = \frac{\vec{\Phi}}{S} = -\lambda \vec{\nabla} T \quad (1.4)$$

La relation 1.4 montre bien que les lignes de flux sont perpendiculaires aux iso-thermes.

### 1.2.2 Conductivité thermique :

La relation 1.4 montre qu'à l'échelle macroscopique  $\lambda$  est le paramètre intrinsèque au matériau qui lie le gradient de température au flux de chaleur. Il caractérise la propension d'un matériau à conduire la chaleur il s'exprime en  $W m^{-1}K^{-1}$ . Lorsqu'un matériau laisse facilement diffuser la chaleur on dit qu'il est conducteur. C'est le cas notamment des métaux dont la conductivité thermique est élevée. À l'inverse, un matériau tel que l'air au repos s'oppose au transfert de chaleur et est donc appelé isolant. Exprime comme :

$$\frac{\lambda}{\sigma T} = L_0 = 2.44 * 10^{-8} W \Omega K^{-2}.$$

### I. 2.3 Liens entre chaleur spécifique et conductivité thermique :

La chaleur spécifique des solides et leur conductivité thermique sont liées. Rien dans ce cours ne permet d'en donner une démonstration complète car il faudrait alors introduire les outils mathématiques de mécanique statistique et quantique. Nous nous contenterons donc d'en donner la définition :

$$\lambda = \frac{1}{3} l \cdot v \cdot Cv \quad (1.5)$$

Nous retrouvons dans cette définition la quantité  $l$  qui désigne le libre parcours moyen des particules et que nous avons introduite précédemment. Dans cette relation  $v$  désigne la vitesse du son dans le matériau. Cette définition a bien un sens au regard de ce que nous avons dit vis-à-vis la modélisation des liaisons entre particules avec des raideurs sur la figure 2.5.

Nous pouvons aussi exprimer la relation entre  $l$  et  $Cv$  en utilisant le temps de relaxation qui est lié au libre parcours moyen par :  $t = l/v$ . Ainsi la relation 2.6 s'écrit aussi :

$$\lambda = \frac{1}{3} l v^2 C v \tag{1.6}$$

On voit néanmoins que ces deux relations apportent peu d'aide vis-à-vis de la détermination de la conductivité d'un solide à partir de sa chaleur spécifique étant donné qu'elles font intervenir deux quantités inconnues, à savoir  $l$  et  $t$ .

**I. .2.4 Expressions de la loi de fourrier dans diverses configurations géométriques :**

Dans le système de coordonnées cartésiennes, la relation de Fourier s'écrit :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \vec{x} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{y} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{z} \right) \tag{1.7}$$

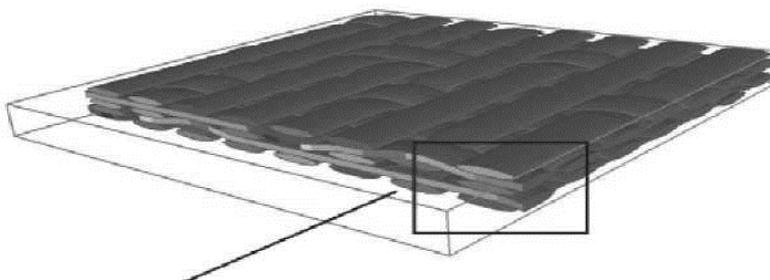


Figure I.2 : Conductivité orthotrope d'un matériau composite tissé.

Dans de nombreux cas rencontrés dans la nature ou bien parmi les objets fabriqués par l'homme, la conductivité n'est plus isotrope mais orthotrope, voire anisotrope. Dans le cas orthotrope (matériaux composites par exemple tel que celui représenté sur la figure 2.8 ou bien encore le matériau fibré représenté sur la figure 2.9), la relation 2.3 devient :

$$\vec{\varphi} = -\left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \vec{x} + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \vec{y} + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \vec{z} \right) \tag{1.8}$$

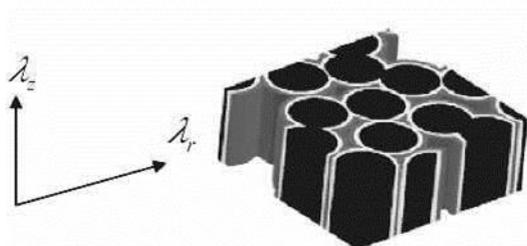


Figure I.3 : Conductivité orthotrope d'un matériau fibré.

On définit deux directions privilégiées pour la conductivité (longitudinale et radiale).

Cette relation définit donc trois composantes du flux, chacune étant dépendante d'une valeur particulière de la conductivité. Dans le cas de matériaux anisotropes, on définit le tenseur symétrique de conductivité :

$$\bar{\lambda} = \begin{matrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ Sym & & \lambda_{zz} \end{matrix} \quad (1.8)$$

Les 3 composantes de la densité de flux sont alors :

$$\varphi_x = -\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} - \lambda_{xz} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.9)$$

$$\varphi_y = -\lambda_{yx} \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} - \lambda_{yz} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.10)$$

$$\varphi_z = -\lambda_{zx} \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{zy} \frac{\partial T}{\partial y} - \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.11)$$

### I. 3 Equation de diffusion de la chaleur :

Il est maintenant possible d'établir l'équation de la chaleur, c'est-à-dire l'équation traduisant mathématiquement l'évolution de la température en tout point du système étudié et à chaque instant. Nous l'établissons en effectuant un bilan sur un volume élémentaire du matériau.

Considérons pour simplifier le transfert de chaleur unidirectionnel par conduction selon x dans un matériau comme cela est représenté sur la figure 1.3. Nous supposons que les propriétés thermiques du matériau ne dépendent pas de la température. Isolons un élément de largeur dx et effectuons un bilan des flux entrants et sortant de cet élément. On désigne par S la section de passage du flux et par V le volume compris entre x et x + dx. D'après la relation 1.3 le flux entrant s'écrit :

$$\varphi_e = -\lambda S \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \quad (1.12)$$

De la même façon le flux sortant s'écrit :

$$\varphi_s = -\lambda S \frac{\partial T(x+\delta x,t)}{\partial x} \quad (1.13)$$

Le bilan thermique consiste donc à écrire que la somme des flux, comptés positivement dans le sens de la normale intérieure au volume élémentaire, est égale au terme d'accumulation de chaleur dont l'expression a été donnée à la relation 2.1. Si on considère la présence éventuelle d'une source volumique  $Q$  (en W) de chaleur dans l'élément, ce bilan s'écrit :

$$\phi_e - \phi_s + Q = \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.14)$$

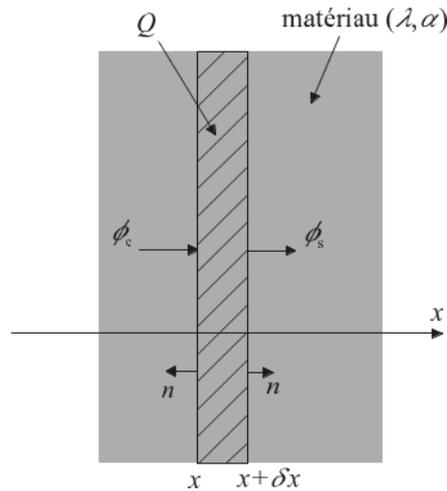


Figure I.4 : Bilan thermique sur un transfert 1D par conduction et convection.

En remplaçant les flux par leur expression on trouve alors :

$$-\lambda S \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + \lambda S \frac{\partial T(x+\delta x,t)}{\partial x} + Q = \rho V C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (1.15)$$

Sachant que, par définition, la dérivée de la fonction f est :

$$\frac{df(X)}{dx} = \frac{f(x+\delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad \text{Quand } \delta x \rightarrow 0 \quad (1.16)$$

La relation 1.6 s'écrit :

$$\lambda S \delta x \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + Q = \rho V C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (1.17)$$

Et comme  $V = S dx$ , on trouve finalement :

$$\lambda \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{Q}{V} = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (1.18)$$

L'espace à trois dimensions Cette relation aux dérivées partielles, en temps et en espace, se généralise dans sous la forme ( $\dot{Q}$  en  $W m^{-1}$ ) est la source de chaleur volumique) :

$$\lambda \Delta T + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T(M,t)}{\partial t} \quad (1.19)$$

Cette relation traduit le transfert linéaire de chaleur par diffusion dans le matériau. Dans le système de coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$ , cette relation s'écrit :

$$\lambda \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.20)$$

Enfin, dans le système de coordonnées sphériques  $(r, \theta, \varphi)$ , cette relation prend la forme :

$$\lambda \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.21)$$

#### I. 4 Notion de régime permanent et transitoire :

Une notion très importante en transfert thermique est celle de régime permanent et transitoire. Imaginons un barreau cylindrique tel que celui représenté sur la figure 1.5. Supposons, à un instant initial, que l'on dispose une source de chaleur à proximité d'une extrémité du barreau. La température du barreau proche de la source de chaleur va alors augmenter et la chaleur va diffuser de cette zone chaude vers la zone plus froide située à l'autre extrémité. Supposons d'autre part que nous ayons disposé deux thermocouples (voir encart plus loin) en deux points de l'axe du barreau afin de mesurer l'évolution de la température en ces points au cours du temps

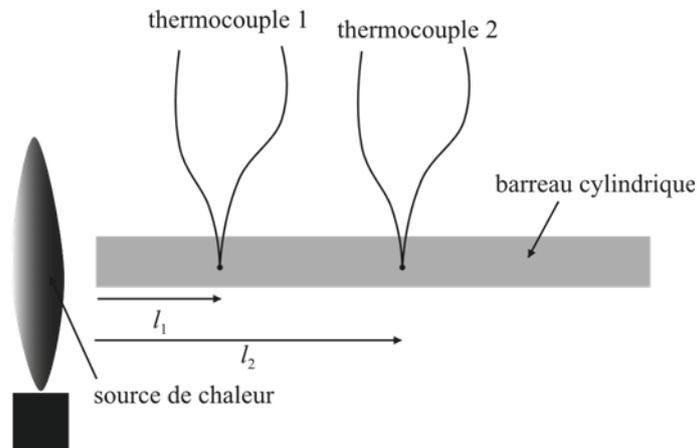


Figure I.5 : Un barreau cylindrique est chauffé à une de ses extrémités. Deux thermocouples permettent de mesurer l'évolution de la température en deux points de l'axe du barreau au cours du temps.

L'acquisition de ces températures au cours d'une durée assez longue va conduire à la représentation de la figure 1.5. On devine alors trois domaines temporels bien distincts. Sur le domaine 1, la température n'évolue pas et reste identique à la température initiale du barreau.

Cela correspond au temps que met la chaleur pour diffuser de la source chaude jusqu'au thermocouple. Ce temps est plus important pour le thermocouple 2, qui est situé plus loin de la source de chaleur, que pour le thermocouple 1. On peut estimer les temps de retard  $t_1$  et  $t_2$  si on connaît la diffusivité thermique  $\alpha$  du matériau. En effet nous savons, d'après l'équation aux dimensions de la diffusivité, qu'elle correspond au rapport entre le carré d'une distance et d'un temps. On aura donc en première approximation :

$$T_1 \sim \frac{l_1^2}{\alpha} \text{ et } T_2 \sim \frac{l_2^2}{\alpha} \quad (1.22)$$

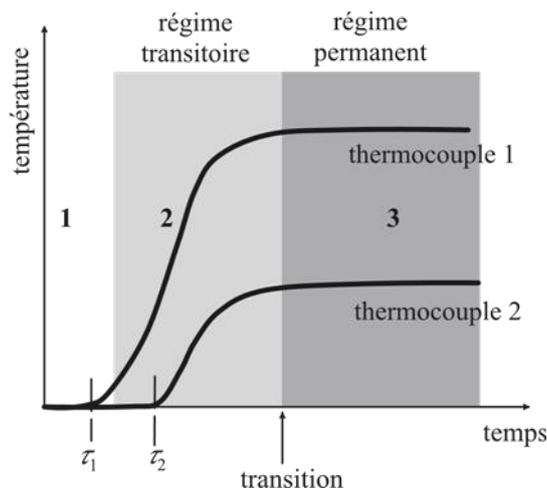


Figure I.6 : Évolution de la température aux deux thermocouples au cours du temps.

Le domaine temporel 2 correspond à une élévation de la température au cours du temps. Il définit donc le régime transitoire car les températures dépendent du temps. Enfin, on observe sur le domaine 3 une valeur constante de la température mesurée par les deux thermocouples. Cette valeur n'est pas la même étant donné que le thermocouple 2 est localisé plus loin de la source de chaleur que le thermocouple 1 et donc que la température sera plus faible. Ce domaine correspond au régime permanent car les températures ne dépendent plus du temps mais seulement de l'espace. On doit absolument noter que la transition entre régime transitoire et régime permanent est la même pour tous les points du matériau. Le temps à partir duquel apparaît cette transition ne dépend que de des dimensions caractéristiques du barreau et de ses propriétés thermiques (capacité thermique  $\rho C_p$  et conductivité thermique  $l$ ).

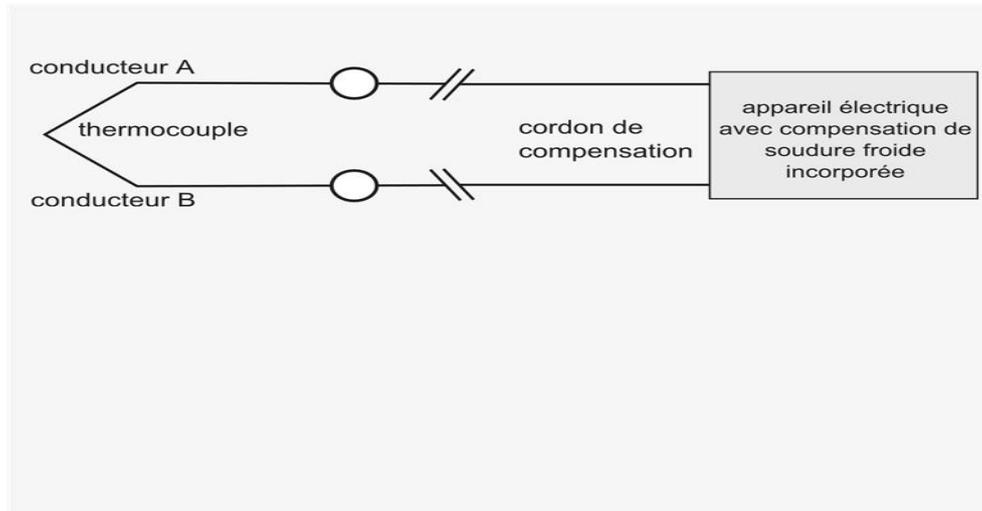


Figure I.7 : Mesure de température par thermocouple

Le schéma ci-dessus présente le principe de la mesure de température par thermocouple. Les deux métaux A et B, de natures différentes, sont reliés par une jonction. Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel entre les deux conducteurs qui dépend de la température de la jonction. Rigoureusement, les thermocouples ne mesurent pas une température, mais une différence de température entre une jonction dite « chaude » et une jonction froide dont la température est connue. Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit donc être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante (0 °C). Notons que l'effet Peltier est le contraire de l'effet Seebeck. Peltier a démontré que lorsqu'un courant traverse un circuit composé de deux conducteurs métalliques initialement à la même température, la température d'une jonction augmente tandis que celle de l'autre jonction diminue.

### I. 8 convections :

Un fluide possédant une vitesse  $U_{inf}$  et une température  $T_{inf}$  passe sur la surface d'un milieu solide de forme arbitraire et de surface  $A_s$ . La surface du milieu est à une température uniforme  $T_s$  et les deux températures  $T_{inf}$  et  $T_s$  sont différentes. Cette différence provoque le transfert de la chaleur entre le solide et le fluide. La densité de flux local échangé s'exprime sous la forme :

$$\dot{\phi} = h (T_s - T_{inf}) \quad (1.23)$$

Dans cette expression  $h$  représente le coefficient local d'échange convectif. Parce que les conditions d'écoulement peuvent varier d'un point à l'autre, le coefficient et le flux échangés

peuvent aussi varier. La densité de flux total échangé sera alors obtenue par intégration du flux local sur toute la surface entre le fluide et le solide :

$$\varphi = \int_{A_s} \dot{\phi} dA_s = (T_s - T_{inf}) \int_{A_s} h dA_s \quad (1.24)$$

Nous définissons le coefficient d'échange convectif moyen pour toute la surface qui permet d'exprimer le flux total échangé sous la forme :

$$\Phi = \bar{h} A_s (T_s - T_{inf}) \quad (1.25)$$

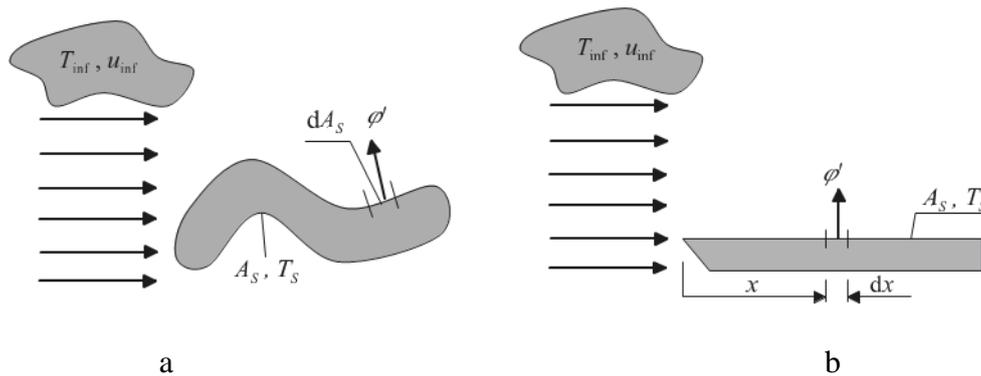


Figure I.8 : Transfert de chaleur par convection ; a) sur une surface quelconque, b) sur une surface plane.

Cette expression est appelée la loi de Newton. Ce dernier ne l'a pas formulé explicitement mais il considérait dès le début que l'échange par convection était proportionnel à l'écart de température :

$$\frac{dT_s}{dt} \propto (T_s - T_{inf}) \quad (1.26)$$

Nous définissons le coefficient d'échange moyen :

$$\bar{h} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} h dA_s \quad (1.27)$$

Ainsi, si nous considérons par exemple une plaque plane (voir figure 2.1 b)), le coefficient local varie avec la distance et le coefficient moyen est alors :

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h dA_s \quad (1.28)$$

### I. 9 Couches limites en transfert par convection :

Les flux local et total sont fondamentaux pour le problème de convection. Ils peuvent être déterminés à partir des relations données précédemment. Néanmoins, la simplicité de ces

relations n'est qu'apparente. En effet, on ne peut calculer le flux que si l'on connaît le coefficient d'échange, local ou moyen. Or, ces coefficients dépendent de nombreuses variables telles que : les propriétés thermo physiques du fluide en écoulement (masse volumique, chaleur spécifique, viscosité, conductivité thermique), la géométrie de l'écoulement et la dynamique de l'écoulement. De plus, les propriétés du fluide dépendent de la température et de la pression au sein de l'écoulement. Pour cela, la détermination des coefficients d'échange est considérée comme un problème de convection thermique directement lié à la formulation d'un problème de mécanique des fluides. En d'autres termes la convection de la chaleur est totalement couplée au transfert de masse dans un écoulement. L'influence de nombreuses variables sur le coefficient d'échange vient du fait que le phénomène de convection thermique se développe à la surface solide dans une couche fluide d'épaisseur très petite, appelée

### I. 9.1couche limite hydrodynamique :

Pour introduire le concept de couche limite hydrodynamique on considère l'écoulement sur une plaque plane comme représenté à la figure 1.10. Les particules fluides en contact avec la surface ont une vitesse nulle. Ces particules freinent les particules voisines dans les couches supérieures et cela sur une épaisseur  $\delta$ , jusqu'à ce que cet effet de freinage devienne négligeable. Ce retard est accompagné de contraintes de cisaillement  $t$  intervenant dans les plans parallèles à la vitesse du fluide. En augmentant la distance à la surface, la vitesse  $u$  du fluide tend vers la vitesse  $U_{inf}$ .

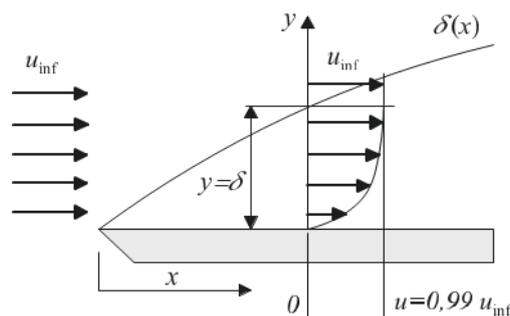


Figure I.9 : Développement de couche limite hydrodynamique sur une surface plane.

La quantité  $\delta$  est appelée l'épaisseur de la couche limite hydrodynamique. Elle est définie comme la distance à la surface correspondante à la vitesse  $U = 0,99U_{inf}$ . De cette manière, la couche limite sépare deux domaines distincts. Dans le premier, le gradient de

vitesse et les contraintes de cisaillement sont importants alors qu'ils sont négligeables dans le second. La couche limite hydrodynamique se développe quel que soit l'écoulement et a une importance fondamentale pour le transfert par convection.

Elle est directement liée aux contraintes de cisaillement à la surface  $\tau_s$  et donc aux effets de frottement. L'épaisseur de la couche limite augmente avec la distance  $x$ .

Pour un écoulement externe, elle fournit une base à l'évaluation du coefficient de frottement local :

$$C_f = \frac{2\tau_s}{\rho u_{inf}^2} \quad (1.29)$$

Ce paramètre clé permet de déterminer la force de traînée. Pour un fluide Newtonien (Visqueux), le cisaillement à la surface peut être évalué à partir du gradient de vitesse à cette même surface :

$$\tau_s = \mu \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right| \quad (1.30)$$

Où  $\mu$  est la propriété du fluide appelée viscosité dynamique.

### I. 9.2 Couches limite thermique :

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la couche limite hydrodynamique se développe pour tout l'écoulement. Cependant, la couche limite thermique ne se développera que si la température du fluide et celle de la surface sont différentes.

Considérons l'écoulement représenté sur la figure 1.11. Le fluide arrive à une température  $T_{inf}$  sur une plaque horizontale. Les particules fluides en contact avec la surface de la plaque sont à la température de cette surface. Ces particules échangent de l'énergie avec les particules voisines, ce qui donne naissance à un gradient de température dans le fluide. Le domaine où ce gradient se développe et appelé la couche limite thermique et son épaisseur  $\delta_t$  est définie comme la distance pour laquelle le rapport  $(T - T_{inf}) / (T - T_s) = 0.99$ . Comme pour la couche limite hydrodynamique, l'épaisseur de la couche limite thermique augmente avec la distance  $x$ .

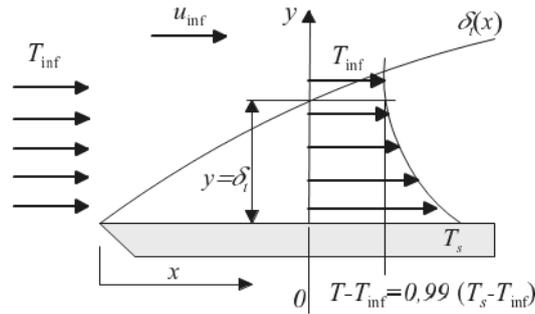


Figure I.10 : Développement de la couche limite thermique sur une surface plane

La densité de flux dans le fluide à la surface ( $y = 0$ ) s'exprime à partir de la loi de

Fourier :

$$\varphi = -\lambda_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad \text{Pour } y = 0 \quad (1.32)$$

Cette chaleur est ensuite transportée par convection dans le fluide et la densité de flux s'exprime donc aussi selon la loi générale de Newton :

$$\varphi = h(T_s - T_{inf}) \quad (1.33)$$

Ceci permet de mettre en évidence la relation entre le coefficient d'échange thermique par convection  $h$  et le gradient de température dans le fluide à la paroi :

$$h = \frac{-\lambda_s \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|}{(T_s - T_{inf})} \quad (1.34)$$

Le gradient de température à la surface conditionne donc le transfert au travers de la couche limite.

### Signification des couches limites

La couche limite hydrodynamique est caractérisée par la présence de gradients de vitesses et de contraintes de cisaillement.

La couche limite thermique est caractérisée par la présence de gradients de température.

Le paramètre clé pour la couche hydrodynamique est le coefficient de frottement.

Le paramètre clé pour la couche limite thermique est le coefficient d'échange thermique par convection.

**I. 9.3 écoulements laminaires et turbulents :**

Pour traiter un problème de convection il est important de déterminer le régime d'écoulement du fluide : est-il laminaire ou turbulent ? Le coefficient d'échange convectif dépend fortement du régime d'écoulement. La transition entre les régimes d'écoulement a été démontrée par Osborne Reynolds. Son expérience avec de l'ancre, jouant le rôle de traceur (les particules d'encre suivent l'écoulement du fluide sans trop le perturber), injectée dans un écoulement stationnaire d'eau est représentée schématiquement à la figure 1.12. On peut voir qu'au départ toutes les lignes de courant (lignes tangentes au vecteur vitesse) dans l'écoulement restent équidistantes. À partir d'une certaine distance, appelée critique, les lignes de courant se croisent et le traceur commence à se mélanger avec l'eau. C'est la région de transition qui évolue ensuite vers le régime turbulent.

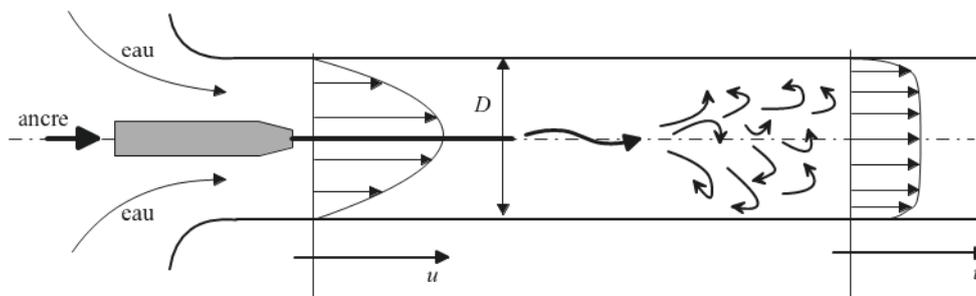


Figure I.11 : Expérience de Osborne Reynolds sur la transition entre le régime laminaire et turbulent d'écoulement dans un tube de diamètre D.

Un exemple de développement de la couche limite sur une plaque plane est donné à la figure 1.13.

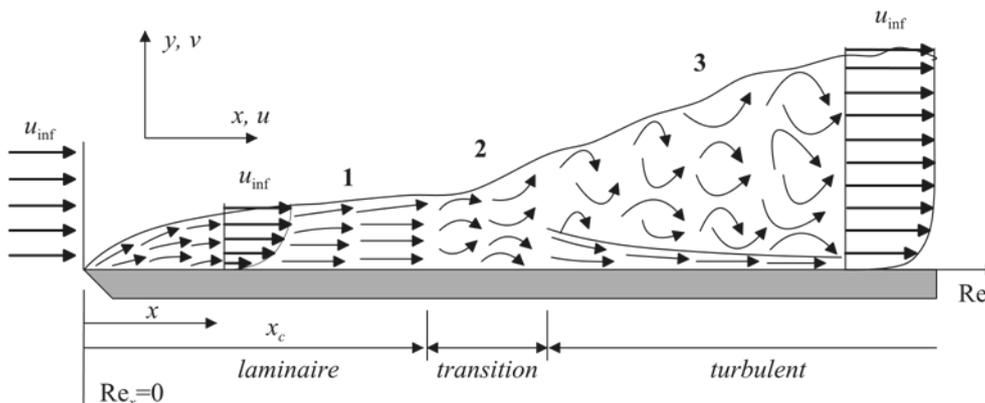


Figure I.12 : Développement de couche limite sur une longue surface plane

Trois régimes d'écoulement sont visibles : laminaire (1), transition (2) et turbulent (3). Une sous-couche laminaire se forme en dessous de couche turbulente.

La couche limite est initialement laminaire mais, à partir d'une certaine distance, de petites fluctuations commencent à apparaître et sont amplifiées. C'est la région de transition qui est suivie du régime complètement turbulent, caractérisé par les mouvements du fluide dans les trois dimensions d'espace. Dans la couche laminaire l'écoulement est ordonné et il est possible d'identifier des lignes de courant suivant lesquelles les particules fluides se déplacent. Les composantes de vitesse suivant  $x$  et  $y$  peuvent être définies. La composante selon  $y$  va contribuer au transfert de la quantité de mouvement et de l'énergie au travers de la couche limite. Le mouvement de fluide dans la couche limite turbulente est très irrégulier et se caractérise par des fluctuations locales de vitesse. Ces fluctuations augmentent le transfert de la quantité de mouvement et de l'énergie, ce qui conduit à l'augmentation du coefficient d'échange. Le profil de vitesse et de température est continu dans la couche laminaire.

La couche limite turbulente est plus épaisse que la couche laminaire à cause des fluctuations de vitesse.

Dans la couche limite turbulente, des sous-couches peuvent être distinguées. La première est assimilée à une sous-couche laminaire, la seconde à une sous-couche de transition et finalement la dernière à une sous-couche de turbulence.

Pour prédire le régime d'écoulement il est tout d'abord utile de déterminer la distance critique pour laquelle le régime de transition intervient. Pour cela un nombre sans dimension, appelé nombre de Reynolds local, est défini :

$$Re_x = \frac{\rho u_{inf} x}{\mu} \quad (1.35)$$

### I. 10 Convection forcée :

Le cas de la convection forcée est rencontré très souvent en pratique dans les échangeurs de chaleur de tous genres. Ainsi, par exemple pour le refroidissement de centrales nucléaires, la récupération de chaleur dans les collecteurs solaires, la circulation des liquides cryogéniques dans les systèmes de refroidissement de machines thermiques. Ces systèmes impliquent deux types d'écoulements :

- Externe : l'écoulement du fluide n'est pas confiné dans un domaine ;
- Interne : le fluide s'écoule dans un domaine confiné (tube, conduite, etc.)

Nombre de Reynolds, qui caractérise le régime d'écoulement (laminaire, turbulent) :

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (1.36)$$

### I. 10.1 Expressions du coefficient de convection h en convection forcée :

Nous avons vu que les relations décrivant un problème de convection forcée peuvent s'écrire sous la forme :  $Nu = f(Pr, Re)$ . La relation entre ces trois nombres adimensionnels ne peut pas être établie théoriquement mais doit être déterminée expérimentalement. De nombreux résultats obtenus par des scientifiques ont été rassemblés dans la littérature. Ils sont appelés « corrélations expérimentales ». Dans cette partie nous présenterons les corrélations expérimentales les plus usuelles en convection forcée.

Concernant le nombre de Prandtl, qui intervient dans l'expression du nombre de *Nusselt*, et qui caractérise le fluide en écoulement il doit être déterminé pour une température donnée du fluide. Or, pour qu'il y ait échange de chaleur, la température à la surface et la température du fluide doivent être différentes, les propriétés du fluide seront tout simplement prises pour la température moyenne  $T_f$ :

$$T_f = \frac{T_{inf} + T_s}{2} \quad (1.37)$$

- Écoulement externe :

Par écoulement externe nous considérons un écoulement se développant librement à une surface solide. Cette surface pourra être plane (plaque) ou bien courbée (cylindre, sphère...).

- Écoulement sur une plaque plane :

La plaque peut être horizontale ou verticale. Le fluide en écoulement a une vitesse moyenne  $U_m$  et  $x$  désigne la longueur considérée. Si pour une longueur donnée  $x$ , le nombre de Reynolds ne dépasse pas  $5 * 10^5$  le régime d'écoulement est laminaire.

### I. 10.2 Régime laminaire :

$$Nu_x = 0.332 Re_x^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \quad , \quad \text{pour } Pr \geq 0.6 \quad (1.38)$$

Le coefficient moyen pour cette configuration est :

$$\bar{Nu}_L = 0.664 Re_L^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \quad , \quad \text{pour } Pr \geq 0.6 \text{ } L \text{ la longueur considérée}$$

Pour les valeurs de nombres de Reynolds supérieures à  $5 * 10^5$ , le régime d'écoulement est turbulent :

Régime turbulent

$$Nu_x = 0.296 Re_x^{0.8} \cdot Pr^{0.33} \quad , \text{ pour } 0.6 < Pr < 60 \quad (1.39)$$

- Écoulement autour d'un cylindre :

Le fluide est en écoulement perpendiculaire par rapport à l'axe du cylindre. Sa vitesse à l'infini amont est  $U_{inf}$  et sa température  $T_{inf}$  (voir la figure 1.14). Un sillage se forme en aval de l'écoulement qui conduit à une répartition non homogène du coefficient variable sur la périphérie du cylindre. On définit un coefficient de convection moyen pour toute la périphérie à température  $T_s$  :

Dans le cas d'un gaz

$$\bar{Nu}_D = C Re_D^m \cdot Pr^{0.33} \quad \text{Pour } C = cst \quad (1.40)$$

Dans le cas d'un liquide

$$\bar{Nu}_D = 1.11 Re_D^m \cdot Pr^{0.33} \quad (1.41)$$

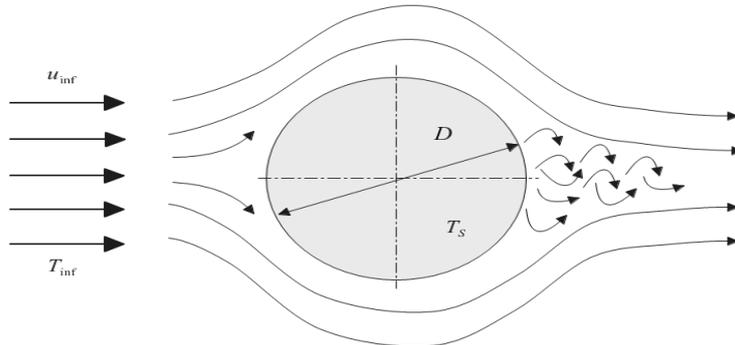


Figure I.13 : Écoulement autour d'un cylindre.

- Écoulement autour d'une sphère

Pour une sphère, les effets de sillage sont similaires à ceux rencontrés dans le cas du cylindre, néanmoins la corrélation préconisée par la littérature est la suivante :

$$\bar{Nu}_D = 2 + (0.4Re_D^{0.5} + 0.06Re_D^{0.66})Pr^{0.4} \left( \frac{\mu_{inf}}{\mu_s} \right) \quad (1.42)$$

$$\left[ \begin{array}{l} 0.71 < Pr < 380 \\ 3.5 < Re_D < 7.6 * 10^4 \\ 1 < \left( \frac{\mu_{inf}}{\mu_s} \right) < 3.2 \end{array} \right]$$

Toutes les propriétés sont déterminées à la température  $T_{inf}$  sauf la viscosité dynamique  $\mu$  du fluide qui l'est à la température  $T_s$ .

- Écoulement autour d'un faisceau de tubes

Beaucoup d'installations industrielles sont constituées de rangées de tubes parallèles immergées dans un écoulement perpendiculaire à leur axe. Les tubes peuvent être alignés ou disposés en quinconce, comme représenté à la figure 1.15.

La disposition en quinconce conduit à de plus fortes turbulences et donc un coefficient d'échange plus important que pour un faisceau aligné. La corrélation utilisée est la suivante :

$$\overline{Nu}_D = 1.13C_1 Re_{D,max}^m \cdot Pr^{0.33} \tag{1.43}$$

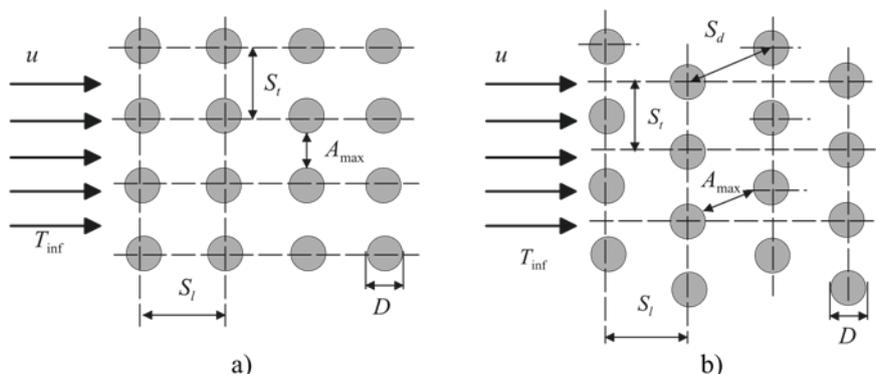


Figure I.14 : Écoulement autour d'un faisceau de tubes : a) disposition alignée ; b) disposition en quinconce.

Les valeurs des constantes sont :  $C_1 = 0.26$  et  $m = 0.65$  pour la disposition alignée, et  $C_1 = 0.41$  et  $m = 0.60$  pour la disposition en quinconce.

Le nombre de Reynolds est calculé dans ces configurations en utilisant la vitesse maximale dans l'écoulement. On l'observe pour les plans désignés par  $A_{max}$  pour les deux cas (figure I.15). Elle se calcule en utilisant les espacements entre les tubes, la vitesse d'arrivée du fluide et le diamètre des tubes :  $u_{max} = S_t / (S_t - D) u$ , pour un arrangement aligné et :  $u_{max} = 2S_t / (S_d - D) u$ , pour un arrangement en quinconce.

- Écoulement interne

Par écoulement interne nous considérons un écoulement se développant dans un espace confiné. Cet espace peut être un tube (cylindrique ou rectangulaire), l'espace entre

deux tubes concentriques etc. La corrélation utilisée pour les calculs de convection dans ces conditions est appelée corrélation de *Colburn*.

- Écoulement dans un tube cylindrique :

**1.10.3 Régime turbulent :** Pour le nombre de Reynolds supérieur à 104 le régime d'écoulement est turbulent. On applique alors la corrélation suivante :

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} \cdot Pr^{0.33} \quad (1.44)$$

Cette corrélation est valable pour  $0.7 < Pr < 100$  et seulement quand le régime turbulent est établi, ce qui n'est garanti que si  $x/D > 60$ .

**Régime laminaire :** Pour le nombre de Reynolds  $Re < 2100$  la littérature recommande la relation :

$$\bar{Nu}_D = 1.86 \left( \frac{Re_D}{L} Pr D \right)^{0.33} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (1.45)$$

$$\left[ \begin{array}{c} T_s = cst \\ 0.48 < Pr < 16\,700 \\ 0.0044 < \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right) < 9.75 \end{array} \right]$$

$\mu$  Et  $Pr$  sont évalués à la moyenne des températures du fluide entre l'entrée et la sortie du tube. Cependant  $\mu_s$  est viscosité du fluide déterminée pour la température de paroi du tube  $T_s$ .

- Écoulement dans des tubes de forme polygonale :

Beaucoup d'applications industrielles utilisent des tubes dont la section n'est pas circulaire. Pour l'écoulement et l'échange thermique dans ce type de tubes on peut utiliser un diamètre effectif (ou diamètre hydraulique) défini par :

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (1.46)$$

$A_c$  Est l'aire de section du tube et  $P$  est le périmètre de contact entre la paroi solide et le fluide en écoulement. Ce diamètre  $D_h$  est utilisé pour le calcul des nombres  $Nu_D$  et  $Re_D$ . Ainsi, les corrélations pour le tube circulaire peuvent être appliquées. Les résultats sont fiables pour l'écoulement turbulent. En régime laminaire le calcul est moins précis. Bien évidemment, pour une forme non circulaire le coefficient peut varier sur le périmètre du tube et plus particulièrement il tend vers zéro dans les angles. La démarche que nous proposons ici conduit à un coefficient d'échange convectif moyen sur le périmètre du tube.

- Écoulement entre deux tubes concentriques :

Pour un écoulement entre deux tubes concentriques, le diamètre hydraulique est défini par :

$$D_h = \frac{4\left(\frac{\pi}{2}\right)(D_o^2 - D_i^2)}{\pi D_o - \pi D_i} = D_o - D_i \quad (1.47)$$

Le calcul basé sur le diamètre hydraulique conduit à des résultats avec  $\pm 100\%$  de précision pour la surface interne (tube de diamètre  $D_o$ ). Le coefficient d'échange peut être différent à la surface externe (tube de diamètre  $D_i$ ), surtout lorsque  $D_i \ll D_o$ . Des méthodes plus précises sont proposées dans la littérature [3].

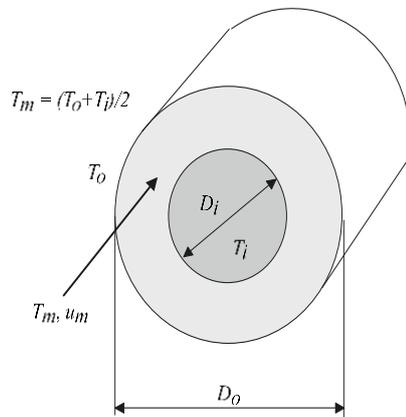


Figure I.15 : Écoulement entre deux tubes concentriques.

## I. 11 Convection naturelle :

La convection naturelle est la forme d'échange convectif la plus souvent observée. Les transferts par convection naturelle résultent simplement du mouvement du fluide provoqué par les différences de densité dues aux variations spatiales de température. La convection naturelle peut être observée à la surface d'un solide immergé dans un fluide d'extension infinie ou dans un espace confiné. Comme pour la convection forcée, il existe en convection naturelle une couche limite. En convection naturelle les échanges sont nettement moins intenses qu'en convection forcée. La convection naturelle explique les mouvements des grandes masses d'air autour de la Terre, actions de vents, formations des nuages et formations de courants océaniques.

### I. 11.1 Expressions du coefficient de convection h en convection naturelle :

Les corrélations expérimentales les plus usuelles en convection naturelle sont généralement de la forme :

$$Nu_L = C Ra_L^n \quad (1.48)$$

Avec :

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{\beta g \Delta T L^3}{\nu \alpha} \quad (1.49)$$

L'exposant n prend les valeurs :

- n = 1/4 en convection laminaire
- n = 1/3 en convection turbulente

Les propriétés du fluide en écoulement pour le nombre de Rayleigh sont déterminées pour la valeur moyenne de température  $T_f = (T_{inf} + T_s)/2$ .

- Plaque plane inclinée

La littérature montre que pour les surfaces planes inclinées, le coefficient d'échange peut être déterminé à partir de corrélations pour la plaque verticale. Ces corrélations doivent être modifiées en remplaçant la gravité g dans le nombre de Rayleigh par  $g \cos \vartheta$ , où  $\vartheta$  est l'angle d'inclinaison mesuré par rapport à la verticale.

#### I. 11.1.1 Canalisations :

- Plaques verticales

Pour le transfert entre deux surfaces parallèles verticales (voir figure 1.17 a)) la littérature propose le calcul direct de la densité de flux échangé entre ces surfaces selon la loi de Fourier :

$$\varphi = \frac{\lambda_{eq}}{\delta} (T_1 - T_2) \quad (1.50)$$

Dans cette expression  $\lambda_{eq}$  représente la conductivité équivalente qui est déterminée comme suit :

$$\frac{\lambda_{eq}}{\lambda_f} = 0.18 Gr_\delta^{1/4} \left(\frac{\delta}{L}\right)^{1/9} \quad \text{Pour } 2 * 10^4 \leq Gr_\delta \leq 2 * 10^5 \quad (1.51)$$

ET

$$\frac{\lambda_{eq}}{\lambda_f} = 0.065 Gr_{\delta}^{1/3} \left(\frac{\delta}{L}\right)^{1/9} \text{ Pour } 2 \cdot 10^5 \leq Gr_{\delta} \leq 1.1 \cdot 10^7 \quad (1.52)$$

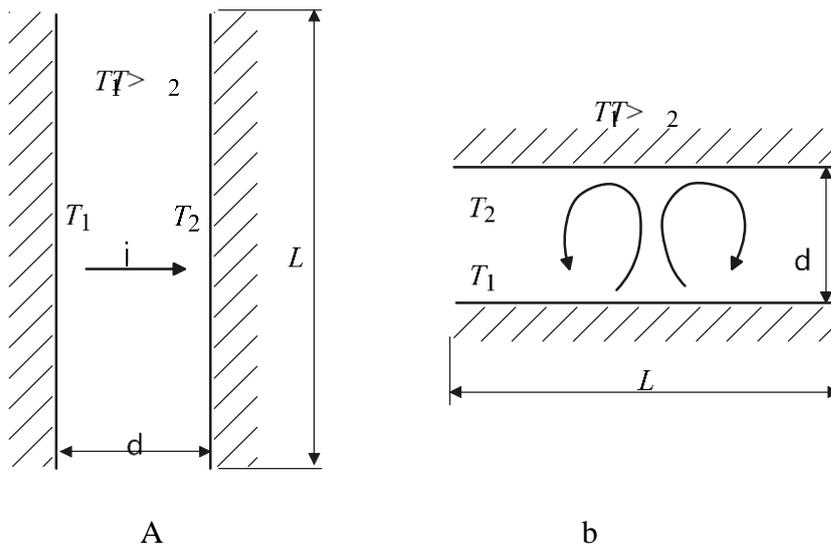


Figure I.16 : Échange par convection naturelle entre deux surfaces a) verticales ; b) horizontales, avec formation de cellules de *Banard*.

- Plaques horizontales :

Le transfert entre deux surfaces parallèles horizontales (voir figure 1.17b)) est assuré seulement par la conduction (loi de Fourier) si la surface chaude est située au-dessus de la surface froide ( $T_1 < T_2$ ). L'écoulement de fluide par convection n'est pas observé.

Dans le cas inverse, la convection a lieu. À partir d'une valeur critique de nombre de Rayleigh  $Ra_{\delta} = 1700$ . pour  $1700 < Ra_{\delta} < 45000$  on observe les cellules de *Banard*, dans lesquelles le fluide circule vers le haut au centre et descend sur les côtés. À partir de  $Ra_{\delta} > 45000$ , l'écoulement du fluide est turbulent.

La densité de flux échangé peut être calculée comme précédemment en utilisant les conductivités équivalentes :

$$\frac{\lambda_{eq}}{\lambda_f} = 0.21 Ra_{\delta}^{1/4} \text{ Pour } 2 \cdot 10^4 \leq Gr_{\delta} \leq 4 \cdot 10^5 \quad (1.53)$$

Et

$$\frac{\lambda_{eq}}{\lambda_f} = 0.075 Ra_{\delta}^{1/3} \text{ Pour } 4 \cdot 10^5 \leq Gr_{\delta} \leq 10^7 \quad (1.54)$$

### I. 11.1.2 Cylindres concentriques :

Pour un espace annulaire entre les deux cylindres (voir figure 1.18) la densité de flux échangé est calculée comme pour les plaques en utilisant la loi de Fourier :

$$\varphi = \frac{2\pi\lambda_{eq}}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}(T_i - T_o) \quad (1.55)$$

Avec

$$\frac{\lambda_{eq}}{\lambda_f} = 0.011Ra_\delta^{0.29} \text{ Pour } 6\,000 \leq Ra_\delta \leq 10^6 \quad (1.56)$$

$$\text{Et } \frac{\lambda_{eq}}{\lambda_f} = 0.4Ra_\delta^{0.2} \text{ Pour } 10^6 \leq Ra_\delta \leq 10^8 \quad (1.57)$$

La dimension caractéristique utilisée pour les calculs de nombre de Rayleigh est :

$$\delta = \frac{(D_o - D_i)}{2}$$

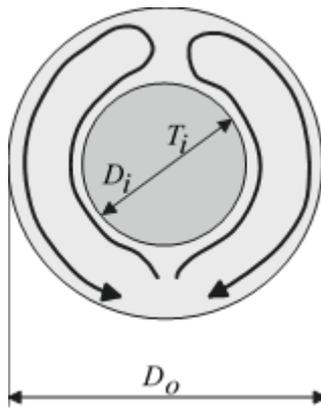


Figure I.17 : Échange par convection naturelle dans un espace entre deux cylindres.

### I. 12 Le rayonnement :

Le rayonnement est un transfert thermique ne nécessitant pas de milieu matériel par opposition aux deux autres. En effet, ce type de transfert thermique résulte de l'émission de rayons électromagnétiques transportant de l'énergie. Ils sont émis par un corps chaud, tel que le soleil, et échauffent le corps qui les reçoit. (Ce type de transfert thermique ne nous a pas tellement concernés sachant que nous avons manipulé en salle de TD hors de vue du soleil.)

**I. 12.1 nature du rayonnement :** Tous les corps, quel que soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur.

Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde comme l'a démontré l'expérience de William Herschel :

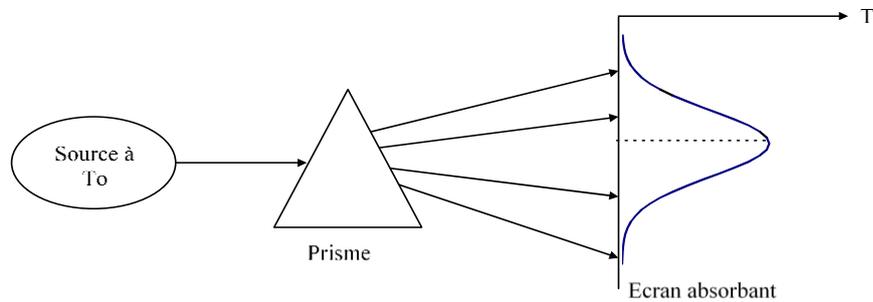
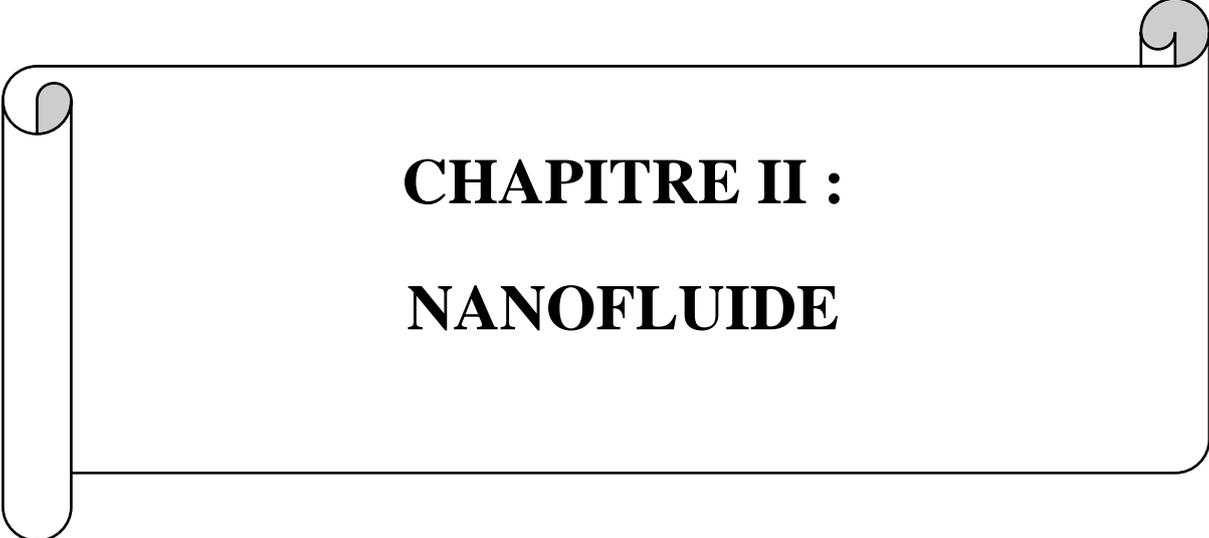


Figure I.18 : Principe de l'expérience de William Herschel.

### I. 13 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous introduisons les concepts de base du transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) et parlons de la nature de l'écoulement à travers les faisceaux de tubes.



**CHAPITRE II :**

**NANOFLUIDE**

## **INTRODUCTION :**

Nano fluide, un nom conçu par le Dr. Choi, au Laboratoire National d'Argonne, pour décrire un fluide

Composé de nanoparticules solides dont la taille est inférieure à 100 nm et qui sont suspendues avec des fractions de volume solides en général moins de 4 %.

Les nano fluides sont synthétisés en suspendant les nanoparticules de métaux et oxydes métalliques. Le terme nanomatériaux englobe une vaste gamme de matériaux, notamment : matériaux nanocristallins, nano composites, nanotubes de carbone et points quantiques. Xuan et Li [16] a expliqué qu'en raison de ses caractéristiques nano structurales, les nanomatériaux présentent des propriétés améliorées (Mécanique, thermique, physique, chimique), phénomène et procédés que les matériaux conventionnels. En général, il existe quatre types de nanomatériaux : Nanomatériaux à base de carbone (par exemple : Carbone nanotubes), nanomatériaux à base de métaux (oxydes métalliques tels que les oxydes d'aluminium), Dendrimères (Polymères nanométriques) et composites (argiles nanométriques) [13].

Les particules de taille micro contribuent à améliorer la conductivité thermique et le transfert de chaleur convectif des liquides lorsqu'il est mélangé avec des fluides de base. Pendant ce temps, le trajet du fluide est perturbé et la chute de haute pression en raison de la sédimentation, de l'usure excessive et du colmatage causé par des particules des problèmes sont surmontés et les propriétés thermiques sont améliorées grâce à l'utilisation de nano fluides. Dans les nano fluides, les nanoparticules de (1-100nm) et le fluide de base mélangé à fond sont identifiés par Choi dans l'année 1995 [14] au Laboratoire National d'Argonne.

Il s'agit de la première pierre de la technologie de transfert de chaleur des nano fluides qui offre de meilleures propriétés thermiques que les particules de taille micro. Ces dernières années, les nano fluides ont attiré de plus en plus d'attention. La principale force motrice de la recherche sur les nano fluides réside dans un large éventail d'applications de l'ingénierie, y compris le refroidissement de l'automobile et de la climatisation, le refroidissement des centrales solaires et électriques, le refroidissement de l'huile de transformateur, l'amélioration de l'efficacité des générateurs diesel, dans les réacteurs nucléaires, la défense et l'espace, comme l'ont signalé Xiang et Arun [15].

### **II. 1 Définition d'un nano fluide :**

Il est un fluide qui est composé d'un assemblage d'un liquide et milliers des atomes microscopique d'un certain matériau. Le liquide qui comporte un nano fluide est appelé un

liquide de base et les atomes sont appelés les nanoparticules. Les nano particules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire.

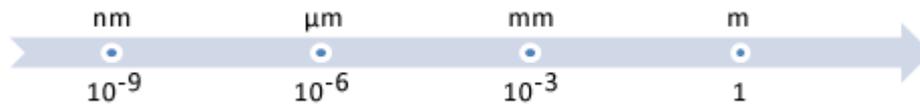


Figure II. 1 : Échelle des dimensions, 1 nanomètre = 0,000 001 millimètre

## II. 2 Applications des nano fluides :

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications pour leurs propriétés magnétique (paliers magnétiques à ferrofluides, agents de contraste en imagerie médicale), pour leurs propriétés électrique (dépôt conducteur électro mouillage pour lentilles liquides), et marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules fonctionnalisées. En thermique, les nano fluides peuvent être utilisés partout où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées : refroidissement de composants électriques et électronique, radars, automobile.....etc.). Les nano fluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance, ainsi que des Micro Electro Mechanicus systèmes.

### II. 2.1 Applications de transfert de chaleur :

- Industrialo Cooking Applications. Routbort et al. Lancé un projet en 2008 qui employait des nano fluides pour refroidissement industriel qui pourrait entraîner de grandes économies d'énergie et les réductions d'émissions qui en découlent. Pour l'industrie américaine, remplacement de l'eau de refroidissement et de chauffage par des nano fluides à le potentiel de conserver 1 billion de Btu d'énergie. Pour l'industrie américaine de l'énergie électrique, utilisant des nano fluides en boucle fermée Les cycles de refroidissement pourraient économiser environ 10 à 30 billions de Btu par an (équivalent à la consommation annuelle d'énergie d'environ 50 000 à 150 000 ménages). Les émissions les réductions seraient d'environ 5,6 millions de tonnes métriques du dioxyde de carbone ; 8 600 tonnes métriques d'oxydes d'azote ; et 21 000 tonnes de dioxyde de soufre.

Pour les usines de pneus Michelin Amérique du Nord, la productivité de nombreux processus industriels est limitée par l'absence de Han et coll. [15] ont utilisé des matériaux de changement de phase comme nanoparticules dans les nano fluides pour améliorer simultanément la conductivité thermique efficace et la chaleur spécifique des liquides. Par

exemple, une suspension de nanoparticules d'indium (température de fusion, 157 C) en polyalphaoléfine a été synthétisés à l'aide d'une méthode de nano émulsification en une étape. Les propriétés thermo physiques du fluide, c'est-à-dire la conductivité thermique, viscosité et chaleur spécifique, et leur température ont été mesurées expérimentalement. Les Transition de la phase de fusion-congélation des nanoparticules d'indium augmenté considérablement la chaleur spécifique efficace du fluide. Ce travail est l'un des rares à traiter de la diffusivité thermique ; des études similaires permettent des applications de refroidissement industriel pour continuer sans une compréhension approfondie de toute la chaleur mécanismes de transfert dans les nano fluides de refroidir efficacement le caoutchouc pendant son traitement.

Cela nécessite l'utilisation de plus de 2 millions de gallons de transfert de chaleur liquides pour les usines nord-américaines de Michelin. C'est objectif de ce projet d'obtenir une augmentation de productivité de 10 dans ses usines de traitement du caoutchouc, s'il est approprié à base d'eau nano fluides peuvent être développés et produits commercialement dans d'une manière rentable.

- Les fluides intelligents. En cette nouvelle ère du manque de sources abondantes d'énergie propre et diffusion d'appareils à piles, comme les téléphones portables et les ordinateurs portables, ont accentué la nécessité d'une manipulation technologique des ressources énergétiques. Nano fluides ont démontré leur capacité à assumer ce rôle dans certaines instances comme un fluide intelligent.

Dans un article publié récemment dans le numéro de mars 2009 de Physical Review Letters, Donzelle et al. [17] a montré qu'une classe particulière de nano fluides peut être utilisée comme matériau intelligent fonctionnant comme une soupape de chaleur pour contrôler le flux de chaleur. Le nano fluide peut être facilement configuré soit dans un état « bas », où il conduit la chaleur mal, ou dans un état « élevé », où la dissipation est plus efficace. Pour sauter le gouffre au chauffage et technologies de refroidissement, les chercheurs devront montrer plus preuve d'un système d'exploitation stable qui répond à une gamme d'entrées de flux de chaleur.

- Nuclear Reactors. Kim et al. [18, 19] au Nucléaire Département des sciences et de l'ingénierie du Massachusetts Institute of Technology (MIT), a effectué une étude pour évaluer la faisabilité des nano fluides dans les applications nucléaires par améliorer les performances de tout réacteur nucléaire refroidi à l'eau système d'évacuation de la chaleur limité. Applications possibles inclure le caloporteur primaire du réacteur à eau sous pression (REP), systèmes de sécurité de secours, cibles d'accélérateur, déviateurs de plasma, et ainsi de suite, [16].

Dans un réacteur à eau sous pression (REP) système de l'usine, le processus de limitation dans la production de vapeur est le flux thermique critique (CHF) entre les barres de combustible et le l'eau — lorsque de la vapeur se forme et finit par recouvrir la surface des barres de combustible conduisent très peu de chaleur, par opposition à eau liquide. En utilisant des nano fluides au lieu de l'eau, le carburant les tiges sont recouvertes de nanoparticules comme l'alumine, qui poussent réellement les bulles nouvellement formées loin, empêchant la formation d'une couche de vapeur autour de la tige et par la suite, augmenter considérablement la CHF.

Après des essais dans le réacteur de recherche nucléaire du MIT, expériences ont montré un succès prometteur où il est vu que PWR est beaucoup plus productif. L'utilisation de nano fluides comme réfrigérant pourrait également être utilisé en cas d'urgence systèmes de refroidissement, où ils pourraient refroidir la surchauffe surfaces plus rapidement conduisant à une amélioration de la puissance sûreté de la centrale de la cuve du réacteur. Si de tels accidents se produisaient, est souhaitable de conserver le combustible fondu à l'intérieur du navire : éliminer la chaleur de désintégration à travers la paroi de la cuve. Est limité par la présence de CHF sur le navire surface, mais l'analyse indique que l'utilisation de nano fluides peut accroître les capacités de rétention dans les cuves jusqu'à 40 % [20].

De nombreux systèmes nucléaires refroidis à l'eau sont CHFlimited, mais l'application de nano fluide peut grandement améliorer le CHF du liquide de refroidissement pour qu'il y ait une ligne de fond économique tout en augmentant la norme de sécurité du système de centrale électrique.

- Extraction d'énergie géothermique et d'autres sources d'énergie Sources. Les ressources géothermiques totales du monde calculé à plus de 13000 KJ dans un rapport du MIT (2007) [21]. À l'heure actuelle, seulement 200 KJ seraient extractibles, cependant, avec des améliorations technologiques, plus de 2000 KJ pourraient être extrait et fournir les besoins énergétiques du monde pour plusieurs millénaires. Lors de l'extraction de l'énergie de la croûte terrestre dont la longueur varie entre 5 et 10 km et la température entre 500oC et 1000oC, les nano fluides peuvent être utilisés pour refroidir les tuyaux exposés à de telles températures élevées. Lorsque de forage, les nano fluides peuvent servir à refroidir la machinerie et équipements fonctionnant dans des conditions de friction et de température élevées

En tant que « supraconducteur fluide », les nano fluides être utilisé comme fluide de travail pour extraire l'énergie de la terre cœur et traité dans un système de centrale PWR produisant grande quantité d'énergie de travail.

Dans le sous-domaine de la technologie de forage, si fondamental pour énergie géothermique, capteurs améliorés et électronique refroidie par des nano fluides capables de fonctionner à une température outils de fond, et des améliorations révolutionnaires utilisant nouvelles méthodes de pénétration de la roche refroidies et lubrifiées par nano fluides permettra de réduire les coûts de production. De telles améliorations permettra l'accès à des régions plus profondes et plus chaudes dans les des formations ou à des températures économiquement acceptables dans formations de niveau inférieur.

## II. 2.2 Applications automobiles :

Huiles moteur, fluides de transmission automatique, liquides de refroidissement, lubrifiants, et autre transfert de chaleur synthétique à haute température fluides trouvés dans les systèmes thermiques classiques des camions radiateurs, moteurs, chauffage, ventilation et climatisation (CVCA) — ont des propriétés intrinsèquement faibles de transfert de chaleur. Ceux-ci pourraient bénéficier de la conductivité thermique élevée offert par les nanofluides qui ont résulté de l'addition de nanoparticules [13, 22].

- Nano Floyd est froid. Dans la recherche de moyens d'améliorer la situation économique, sociale et culturelle Conception aérodynamique des véhicules, puis carburant Économie, les fabricants doivent réduire la quantité d'énergie Nécessaire pour surmonter la résistance au vent sur la route. À l'étage En accélération, environ 65 % de la production totale d'énergie Le camion est passé à surmonter les nuages aérodynamiques. C'est tout. Cela est dû en partie au grand radiateur à l'avant du moteur. En position pour maximiser l'effet de refroidissement de l'air suivant. L'utilisation de nanomatériaux comme réfrigérants le permettra. Plus petite taille et meilleur emplacement pour les radiateurs. En raison de Il y aura moins de liquide à cause de la hauteur. Efficacité, les pompes de liquide de refroidissement et les moteurs de camions peuvent être réduits Il peut être exécuté à des températures plus élevées, permettant plus. Un cheval tout en respectant des normes d'émissions strictes. Les chercheurs d'Argun, Singh et al. [24], ont décidé L'utilisation de nanomatériaux à haute température Les radiateurs peuvent entraîner une réduction dans la région du Pacifique. Radiateur jusqu'à 10%. Cette réduction du retrait aérodynamique Cela pourrait entraîner des économies de carburant pouvant atteindre 5 %. Application de la Convention Le nano

fluide a également contribué à la réduction du frottement et de la friction. Porter des vêtements, réduire les pertes parasites et faire fonctionner les composants Comme les pompes et les compresseurs, et ensuite la conduite. Plus de 6 p. 100 d'économies de carburant. Il est concevable que ce soit plus que cela. Les économies futures pourraient être améliorées. Afin de déterminer si le nano fluide se décompose Des matériaux radioactifs ont construit et étalonné un appareil. Qui peut simuler le flux de liquide de refroidissement dans le radiateur et est À l'heure actuelle, tester et mesurer les pertes matérielles typiques Matières radioactives par divers nanomatériaux. Érosion radioactive Les matériaux sont déterminés par des mesures de perte de poids. Vitesse du fluide et angle d'impact. Dans leurs tests, ils n'ont observé aucune érosion utilisant des nano fluides à base de fluides éthylène et de gyrophares tri-chloroéthylène avec des vitesses pouvant atteindre 9 m/s et des angles d'impact de 90 à 30. On a observé une érosion avec des nano fluides de cuivre à une vitesse de 9,6 m/s et l'angle d'impact de 90. Le taux de récession a été calculé à 0,065 millième/an de véhicule opération. Une enquête préliminaire a permis de déterminer que le nano fluide de cuivre produit un taux d'usure plus élevé que le liquide de base et ceci est probablement dû à l'oxydation du cuivre nanoparticules. Un taux d'usure et de frottement plus faible a été observé pour nano fluides d'alumine en comparaison avec le fluide de base. Certains les résultats intéressants des tests d'érosion de Singh et al. [24] sont présentés dans les tableaux 1 et 2. Shen et al. [26] ont fait des recherches sur l'usure des roues et la tribologie. Caractéristiques en lubrification humide, sèche et en quantité minimale (MQL) broyage de la fonte. Alumine à base d'eau et nano fluides de diamant ont été appliqués dans le broyage MQL processus et les résultats de broyage ont été comparés avec ceux d'eau pure. Les nano fluides ont démontré les avantages de réduire les forces de meulage, améliorer la rugosité de la surface, et empêcher la combustion de la pièce. Contraste avec broyage à sec, MQL broyage pourrait considérablement réduire la température de broyage. Plus de recherches doivent être menées sur le tribologique propriétés utilisant des nano fluides d'une plus large gamme de particules charges ainsi que sur le taux d'érosion du matériau du radiateur dans afin d'aider à développer des modèles prédictifs pour l'usure des nano fluides et l'érosion des systèmes moteurs. Les futures initiatives de recherche faire intervenir des nanoparticules contenant de l'aluminium et nanoparticules métalliques enrobées d'oxyde. Recherche et essais dans ce domaine aidera à la conception du moteur systèmes de refroidissement et autres systèmes de gestion thermique nano fluides. Futurs moteurs conçus à l'aide de nano fluides les

propriétés de refroidissement pourraient fonctionner à des températures permettant d'augmenter la puissance de sortie. Avec un moteur nanofluide, les composants seraient plus petits et peser moins permettant une meilleure consommation d'essence, ce qui permet aux consommateurs d'économiser de l'argent et de réduire les émissions pour un environnement plus propre.

- Nano fluide dans le carburant. Les nanoparticules d'aluminium, produites à l'aide d'un système à arc plasma, sont recouvertes de fines couches de l'oxyde d'aluminium, en raison de l'activité d'oxydation élevée de l'aluminium pur, créant ainsi une plus grande surface de contact zone avec de l'eau et permettant une décomposition accrue de l'hydrogène provenant de l'eau pendant le processus de combustion. Au cours de ce processus de combustion, l'alumine agit comme un catalyseur et les nanoparticules d'aluminium servent alors à décomposer l'eau pour produire plus d'hydrogène. Il a été montré que la combustion de carburant diesel mélangé avec aqueux nano fluide d'aluminium a augmenté la chaleur totale de combustion tout en diminuant la concentration de fumée et d'azote dans les émissions de gaz d'échappement du moteur diesel [27, 28].

### II. 2.3 Applications électroniques :

Les nano fluides sont utilisés pour le refroidissement des microprocesseurs dans les ordinateurs et ailleurs. Ils sont également utilisés dans d'autres applications qui utilisent des applications micro fluidiques.

- Refroidissement des microprocesseurs. Une des principales limites au développement Les microprocesseurs plus petites sont la dissipation rapide de la chaleur. Cependant, les nano fluides peuvent être utilisés pour le refroidissement des processeurs informatiques en raison de leur conductivité thermique élevée. Il est prévu que la prochaine génération de puces informatiques produit un flux thermique localisé sur 10 W/m<sup>2</sup>, avec puissance totale supérieure à 300 W. En combinaison avec évaporation de film, le tube de chaleur oscillant de nano fluide (OHP) système de refroidissement sera en mesure d'éliminer les flux de chaleur sur 10MW/m<sup>2</sup> et servir de dispositif de refroidissement de prochaine génération qui sera en mesure de gérer la dissipation de la chaleur provenant de nouvelle technologie [28, 29].

### II. 3 Autres applications :

Nettoyeur nano fluide : Le nano fluide n'agit pas dans Comme des fluides simples avec des concepts classiques.

Diffusion et adhérence sur des surfaces solides [14, 30, 31]. C'est tout. La vérité ouvre la possibilité que les nanomatériaux puissent être excellents. Candidats en réparation de sol, lubrifiants, Récupération et dissuasion des hydrocarbures. Applications techniques futures Il peut y avoir beaucoup d'opérations de ce genre.

## II. 4. Types de nanoparticules :

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) constitue un champ de recherche en pleine expansion, aussi seules les nanoparticules les plus couramment utilisées dans les applications liées aux transferts thermiques sont ici brièvement mentionnées.

D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories

- **Nanoparticules sphériques** : Pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent être à base de métaux (cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag.....) ou (oxydes de cuivre Cu, oxyde d'aluminium  $Al_3O_2$ , oxyde de titane  $TiO_2$ .....).
- **Nanotube** : (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane  $TiO_2$ , nanotube de silicium  $SiO_2$ )

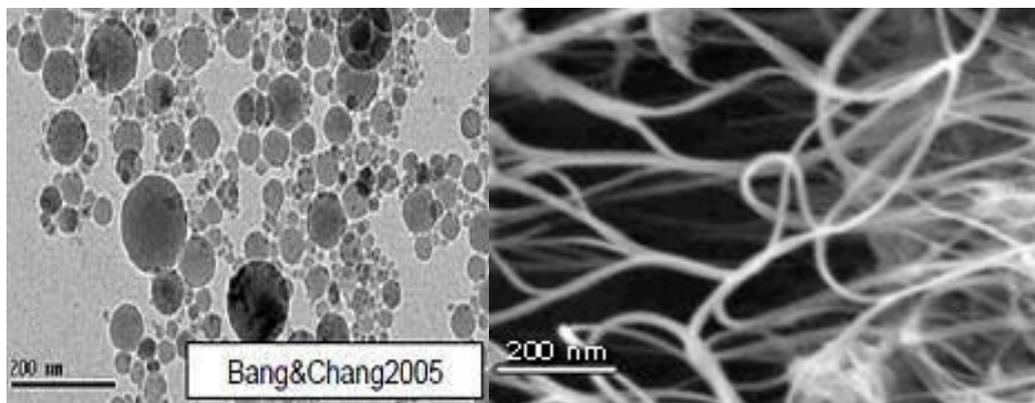


Figure II.2 : Nanoparticules sphériques ; nanotubes de carbone

## II. 4.1. Les nano particules les plus utilisées pour obtenir des nano fluides :

### II. 4.1.1. Nanoparticules des oxydes métalliques :

- Oxyde de cuivre,  $CUO$ .
- Oxyde de silicium,  $SiO_2$ .
- Oxyde de titanium,  $TiO_2$ .
- Oxyde d'aluminium,  $Al_3O_2$ .

### II. 4.1.2 nanoparticules métalliques :

- L'aluminium, Al.
- Le cuivre, Cu.
- L'or, Au.
- L'argent, Ag.
- La silicone, Si.

#### **II. 4.1.3 nanoparticules non métalliques :**

- Les nanotubes de carbone, CNT.
- Le diamant, C.

#### **II. 5. Fluides de base le plus utilisés sont :**

- Eau
- Ethylène-glycol, EG.
- Huiles.
- Toluène.
- Fluides de réfrigération (R12, R22.....).

Les choix des liquides de base est primordial pour nano fluide, il permet la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter toutes phénomènes d'agréations, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule.

#### **II. 6. Méthodes de préparation pour les nano fluides :**

##### **II. 6.1. Méthode à deux étapes :**

La méthode en deux étapes est la méthode la plus utilisée pour la préparation des nano fluides. Les nanoparticules, les nanofibres, les nanotubes ou d'autres nanomatériaux utilisés dans cette méthode sont d'abord produits sous forme de poudres sèches par des procédés chimiques ou physiques. Ensuite, la poudre nano saturée sera dispersée dans un fluide dans la deuxième étape de traitement à l'aide d'une agitation intensive de la force magnétique. La technique en deux étapes est avantageuse lorsque l'on considère la production de nanoparticule de masse important. En raison de la difficulté à préparer des nano fluides stables par une méthode en deux étapes, plusieurs techniques avancées sont développées pour produire des nano fluides, y compris la méthode en une étape.

##### **II. 6.2. Méthode en une étape :**

Cette méthode, combine la production de nanoparticules et la dispersion des nanoparticules dans le fluide de base en une seule étape. Le processus en une étape consiste à produire et à disperser simultanément les particules dans le fluide. Dans cette méthode, les processus de séchage, de stockage, de transport et de dispersion des nanoparticules sont évités, de sorte que

l'agglomération des nanoparticules est minimisée et la stabilité des fluides augmente. Les processus en une étape peuvent préparer des nanoparticules uniformément dispersées, et les particules peuvent être suspendues de manière stable dans le fluide de base.

La méthode physique en une étape ne peut pas synthétiser les nano fluides à grande échelle, et le coût est également élevé. Les caractéristiques de dispersion des nano fluides produits avec des techniques en une étape sont meilleures que celles produites avec la technique en deux étapes. Le principal inconvénient des techniques en une étape est qu'elles ne sont pas adaptées à la production de masse, ce qui limite leur commercialisation. Diverses techniques chimiques et physiques sont donc disponibles pour élaborer des nanoparticules. Le choix d'une méthode de synthèse est dicté par l'utilisation finale des nanoparticules.

### **II. 6.3. Production des nano fluides et nanoparticules :**

Les productions de fabrication de nanoparticules sont nombreuses. Ils peuvent être classés en deux catégories :

#### **➤ Procède physiques :**

La méthode la plus simple consiste à subdiviser un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique. Toutefois, cette méthode présente d'importantes limitations car elle ne permet pas un contrôle précis des distributions de taille.

Afin d'obtenir un meilleur contrôle de la taille et de la morphologie, on peut utiliser d'autres méthodes physiques plus sophistiquées comme :

- La pulvérisation d'un matériau cible, par exemple à l'aide d'un plasma (Pulvérisation cathodique), ou d'un faisceau laser intense (Ablation laser). H. Sakuma et K. Ishii ont ainsi synthétisé des nanoparticules magnétiques de Co-Pt et Fe de taille 4 à 6 nm ;
- Le chauffage à très haute température (Evaporation thermique) d'un matériau de manière à ce que les atomes qui le constituent s'évaporent. Ensuite un refroidissement adéquat de ces vapeurs permet une agglomération en nanoparticules.

En général, les méthodes physiques nécessitent un matériel coûteux pour un rendement en nanoparticules souvent très limité. Les nanoparticules ainsi synthétisées sont la plupart du temps déposées ou liées à un substrat.

#### **➤ Procède chimiques :**

Aujourd'hui un grand nombre de méthodes de synthèse par voie chimique sont disponibles et présentent l'avantage d'être en général simples à mettre en oeuvre et d'être souvent quantitatives et peu coûteuses. Ces méthodes permettent d'obtenir des particules avec une distribution de tailles relativement étroite et de morphologies variées.

Comme dans le cas de la voie physique, les nanoparticules peuvent être synthétisées sous deux formes : libres à l'état de poudre relativement facile à disperser dans un liquide ou un gel hôte, ou enrobées dans une matrice solide (Silice mésoporeuse par exemple) ou un polymère.

Nous citons ici les méthodes chimiques les plus couramment utilisées.

- **Décomposition de précurseurs organométalliques :**

L'utilisation de précurseurs organométalliques permet d'élaborer différents systèmes de nanoparticules. Le procédé repose sur la décomposition, dans un solvant organique judicieusement choisi, d'un composé organométallique, dans lequel le métal est généralement à bas degré d'oxydation. Ceci permet d'éviter l'emploi de réducteurs chimiques puissants qui engendrent souvent des impuretés qui s'adsorbent à la surface des particules et sont difficiles à éliminer. La décomposition est réalisée par élimination des ligands de coordination. Cette élimination se fait en général par chauffage. D. K. Lee et al.

[55] ont élaboré des nanoparticules de 13 nm de Cobalt et de Fer par décomposition thermique de  $\text{CoCl}_2$  et  $\text{FeCl}_2$ , en présence de polymères organiques.

- **Voie radiolytique :**

Le principe de la synthèse radiolytique des nanoparticules consiste à réduire des ions métalliques en solution au moyen d'espèces produites (Généralement des électrons) par radiolyse. Dans de telles solutions, les ions métalliques en solution sont en concentration suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas d'effet direct des rayonnements sur ces ions. La synthèse peut donc se décrire en deux parties (i) la radiolyse du solvant, et (ii) les réactions de réduction des ions métalliques par les espèces produites par radiolyse suivies par la coalescence des atomes produits. R. Benoit et al. Ont ainsi synthétisé des nanoparticules de bismuth dans de la silice.

Les méthodes chimiques ont souvent un rendement bien supérieur à celui des méthodes physiques.

## **II. 7. Avantages des nano fluides :**

- Haute dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.
- Grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation de système.

- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

## II. 8. Inconvénients des fluides :

- Fortes pertes de charge.
- Erosion.
- Sédimentation.
- Bouchons dans les écoulements.
- Cout élevé dans nano fluides.
- Difficultés dans le processus de production.

## II. 9. Caractéristiques thermo physiques des nanofluides :

On notera que la taille des particules est un paramètre physique important dans les Nano fluides car elle peut être utilisée pour adapter les propriétés thermiques du nano fluide ainsi que la stabilité à la suspension des nanoparticules. Les chercheurs de nano fluides ont essayé d'exploiter les propriétés uniques des nanoparticules pour développer des fluides de transfert de chaleur stables et hautement conducteurs.

Les propriétés thermophysiques des nano fluides sont essentielles pour prédire leur comportement au transfert de chaleur. Ces propriétés (Masse volumique, la chaleur spécifique, l'expansion thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des paramètres thermo physiques du nano fluide obtenus (Nature des nanoparticules, leur taille, la fraction volumique, la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu, etc.). Les propriétés thermo physiques effectives du nano fluide seront approximées par différentes relations tirées de la littérature ou que nous établirons dans la suite de ce travail.

### II. 9.1 La Masse volumique ( $\rho$ ) :

En utilisant des formules classiques dérivées pour un mélange en deux phases, la densité du nano fluide en fonction de la concentration volumique des particules et des propriétés individuelles peut être calculée à l'aide des étapes suivantes :

$$\rho = \left(\frac{m}{v}\right) = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s}$$

Où :

$\rho_{nf}$  : Masse volumique du nano fluide.

$\rho_f$  : Masse volumique du fluide de base.

$\rho_s$  : Masse volumique des nanoparticules solides.

## II. 9.2 La chaleur spécifique ( $C_p$ ) :

La chaleur massique ou la chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène  $C_p = \frac{dQ}{mdT}$ .

La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano fluide, on peut citer les deux modèles suivants :

## II. 9.3 La conductivité thermique :

Un large éventail d'étude expérimentales et théorique ont été menées dans la littérature pour modéliser la conductivité thermique des nano fluides. Les résultats existants étaient généralement basés sur la définition de conductivité thermique efficace d'un mélange à deux composants. Le modèle maxwell (1881) était l'un des premiers modèles proposés pour le mélange solide-liquide avec des particules relativement grandes. Il était basé sur la solution de l'équation de conduction de chaleur par une suspension aléatoire stationnement de sphères.

- **Modèle de maxwell**

Maxwell à dériver une formule pour la conductivité thermique effective de mixture solide-liquide avec des particules sphériques (maxwell 1873) :

Le modèle de maxwell [61] et ses dérivés sont probablement les plus largement utilisés dans la littérature. Ce modèle le base suppose que le fluide renferme pluieurs particules sphériques de même diamètre  $d_p$  et sont dispersées en faible concertation.

La formule de maxwell est donnée par :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s(1-2\beta_1)+2k_f+2\varphi[k_s(1-\beta_1)-k_f]}{k_s(1-2\beta_1)+2k_f+\varphi[k_s(1-\beta_1)-k_f]}$$

$$\text{Avec : } \beta_1 = \frac{2R_k k_f}{d_s}$$

Où :  $d_s$  :diamètre moyen d'une nanoparticule solide

$R_k$  : résistance de Kapitza

$k_f$  : conductivité thermique du fluide de base

D'après Wilson et al [63], la résistance de Kapitza entre des nanoparticules et le fluide de base est égale à  $7.7 \times 10^{-9} [km^2w^{-1}]$ .

- **Modèle de Pak et Cho**

Yu et Choi [65] ont proposé un modèle modifié plus complexe que le modèle de Hamilton-crosser, qui tient compte de l'effet d'interface entre les particules et le fluide de base

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s+2k_f+2(k_s-k_f)(1-\beta_2)^3\varphi}{k_s+2k_f-(k_s-k_f)(1-\beta_2)^3\varphi}$$

Où :  $\beta_2$  est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules. Ce modèle n'est valable que pour les particules de forme sphérique.

- **Modèle de Hamilton-crosser**

Ce modèle d'après Hamilton et crosser [64], est dérivé de celui de Maxwell, incorpore un facteur de forme  $n$  pour prendre en compte la forme non- sphérique des particules. Ce facteur de forme empirique donnée  $n = \frac{3}{\Psi}$  tel que ( $\Psi$ ) est un facteur géométrique appelé sphéricité. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule.

La conductivité apparente du milieu est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_s)\varphi}{k_s + (n-1)k_f + (k_f - k_s)\varphi}$$

Quand  $n = 3$  on retrouve le cas des particules sphériques. Le cas  $n = 6$  correspond à des particules cylindriques.

- **Modèle de bruggeman**

Bruggeman a proposé un modèle implicite qui permet de prévoir la conductivité thermique des nano fluides sans limitation sur la concentration volumique. Ce modèle suppose des particules de forme sphérique. Ce modèle a un bon accord avec certains résultats expérimentaux.

$$k_{nf} = \frac{1}{4} [(3\varphi - 1)k_s + (2 - 3\varphi)k_f] + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta}$$

$$\text{Avec : } \Delta = [(3\varphi - 1)^2 (k_s/k_f)^2 (2 - 3\varphi)^2 + 2(2 + 9\varphi^2)(k_s/k_f)]$$

Ce modèle ne tient pas compte ni de la taille des particules ni leur forme.

## II. 9.4 Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ) :

Pour calcul la valeur de ce coefficient pour les nano fluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nano fluides et par analogie avec la relation, on déduit l'expression suivante :

$$B = (1-\varphi) (\beta_f + \varphi\beta_s)$$

Où  $\beta_{nf}$  : le coefficient de dilatabilité du nano fluide.

$\beta_f$  : le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

$\beta_s$  : le coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

## II. 9.5 viscosités( $\mu$ ) :

La viscosité peut être défini comme étant une propriété d'un fluide pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement. La viscosité est une mesure du frottement interne d'un fluide. Un liquide très visqueux est liquide qui présente un frottement interne élevé.

La dispersion des nanoparticules dans un liquide à un effet sur la viscosité dynamique de ce dernier. La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nano fluide qui peut être influencé énormément par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide de base et de la température. Cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité du fluide de base et la fraction volumique du nano fluide. Pour ce qui suite nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparents :

- **Modèle d'Einstein :**

La viscosité dynamique d'un nano fluide est donnée par Einstein pour un mélange contenant des suspensions diluées de particule fines sphérique et rigides est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi)$$

Où

$\mu_{nf}$  : la viscosité dynamique du nano fluide.

$\mu_f$  : la viscosité dynamique du fluide de base.

$\phi$  : la fraction volumique des nano particules. Cette relation est valable juste pour  $\phi=0.03$

- **Modèle de Brink man :**

Brink man a étudié la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}}$$

Remarque : pour les faibles fractions volumiques, la relation de brinkman conduit exactement à celle d'Einstein. Ces relations n'intègrent pas les effets du mouvement brownien ni ceux de la taille des particules.

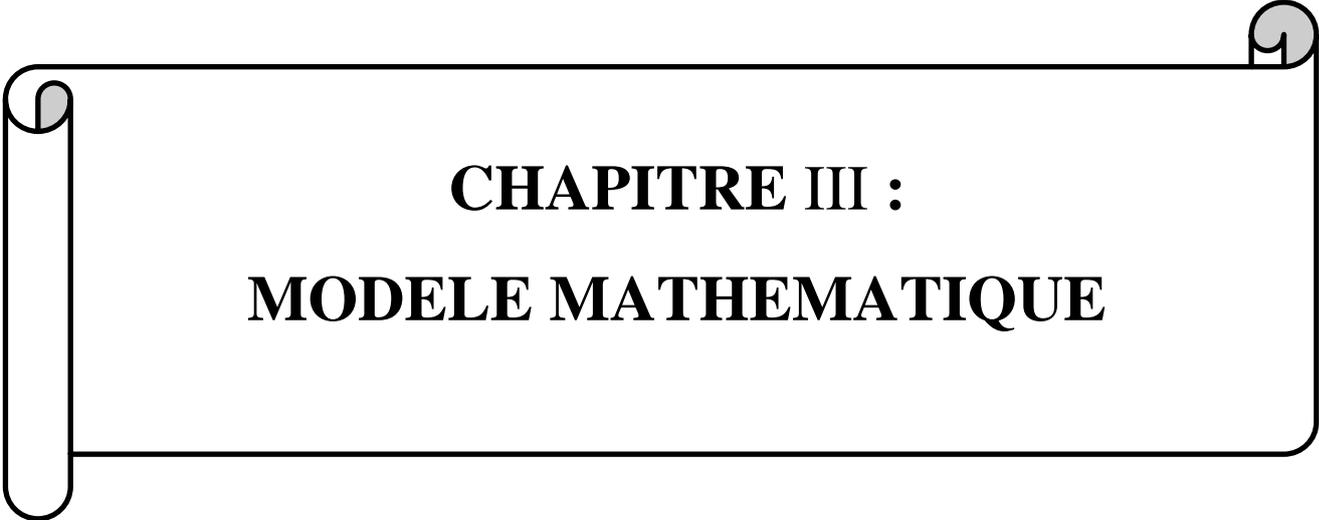
## II. 10. Conclusion :

Les nano fluides sont importants car ils peuvent être utilisés dans de nombreuses applications impliquant le transfert de chaleur, et d'autres applications telles que dans la

détergence. Colloïdes qui sont également nano fluides ont été utilisés dans le domaine biomédical pendant longtemps, et leur utilisation continuera de croître. Il a également été démontré que les nano fluides. Problèmes d'agglomération de nanoparticules, de décantation, et potentiel d'érosion tous doivent être examinés en détail dans les applications. Nano fluides utilisés dans la recherche expérimentale doivent être bien caractérisés en ce qui concerne la taille des particules, la taille la distribution, la forme et le regroupement de manière à rendre les résultats plus largement applicables. Une fois les sciences et le génie des nano fluides sont pleinement compris et leur plein potentiel recherche, ils peuvent être reproduits à grande échelle et utilisés dans de nombreuses applications. Les colloïdes qui sont aussi des nano fluides voir une augmentation de l'utilisation dans le génie biomédical et la biosciences.

D'autres recherches doivent encore être effectuées sur la synthèse et les applications de nano fluides afin qu'ils puissent être appliqués comme prévu. Néanmoins, il y a eu de nombreuses découvertes et des améliorations identifiées sur les caractéristiques de nano fluides dans les applications étudiées et nous sommes un se rapprocher de l'élaboration de systèmes plus efficaces plus petit, rendant ainsi l'environnement plus propre et plus sain.

---

A decorative frame resembling a scroll, with a vertical bar on the left and rounded corners on the right. The text is centered within this frame.

**CHAPITRE III :**  
**MODELE MATHEMATIQUE**

## INTRODUCTION

L'objectif des méthodes numériques est de fournir une solution approchée de comportement réel des phénomènes physiques. La physique possède des caractères tris dimensionnels, temporelles et non linéaire c'est à dire très complexe. Le rôle de modélisateur est de simplifié suffisamment le problème tout en conservant l'originalité du phénomène physique étudié

En mécanique des fluides, les écoulements que ce soit on régime laminaire ou turbulent, sont décrits par le système d'équation aux dérivée partielle (E.D.P). Ainsi, tous les phénomènes physiques sont régis par ce système formé par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie qu'il convient de résoudre pour les caractéristiques du champ d'écoulement et du champ thermique [24].

Parmi les méthodes numériques les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulement et de transfert de chaleur en peut citer :

1. La méthode des différences finies.
2. La méthode des éléments finis.
3. La méthode des volumes finis.

Le choix de l'utilisation de telle méthode numérique va dépendre essentiellement du type et de la complexité du problème à résoudre : la nature du fluide, le comportement thermodynamique, la modélisation du milieu et le problème stationnaire ou in stationnaire.

Dans la présente étude, on utilisera la méthode des volumes finis, car elle présente des avantages considérables du fait qu'elle soit simple, sa fiabilité quant aux résultats, son adaptation au problème physique, sa garantie pour la conservation de masse et de quantité de mouvement et de tout scalaire transportable sur chaque volume de contrôle et dans tout le domaine de calcul, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes numériques.

**III. 1 Principe de la méthode des volumes finis :** La méthode des volumes finis à été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar [25], consiste à transformer les dérivées en expressions algébriques faciles à résoudre. la résolution par cette méthode passe par quatre étapes principales :

1. Effectuer un maillage du domaine d'étude : ceci se fait en plaçant un certain nombre de nœuds dans ce domaine et en construisant un volume fini ou un volume de contrôle autour de chaque nœud. Ce volume de contrôle est délimité par des interfaces.
2. Intégrer l'équation aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle.
3. Choisir un profil de variation de la quantité à trouver (par exemple : température, pression, etc...) entre deux nœuds consécutifs pour pouvoir évaluer les dérivées à l'interface.

Ceci nous conduit à l'obtention d'une équation algébrique simple appelée « équation discrétisée » qui est propre à chaque nœud du domaine.

Donc, si celui-ci est constitué de n-nœuds, on aurait n-équations algébriques à résoudre, il y a donc, autant de nœuds que volumes de contrôle d'où la performance de la méthode des volumes finis comparativement aux autres méthodes.

4. Résoudre le système d'équations obtenu par l'une des méthodes de résolution des équations algébriques linéaires.

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, la méthode de volume fini comporte essentiellement [22] :

1. La discrétisation du domaine considérée en volume de contrôle ;
2. La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles ;
3. Le choix d'un schéma représentant la variation de la quantité physique et l'assemblage des diverses équations ;
4. Le modèle doit être stable et convergent.

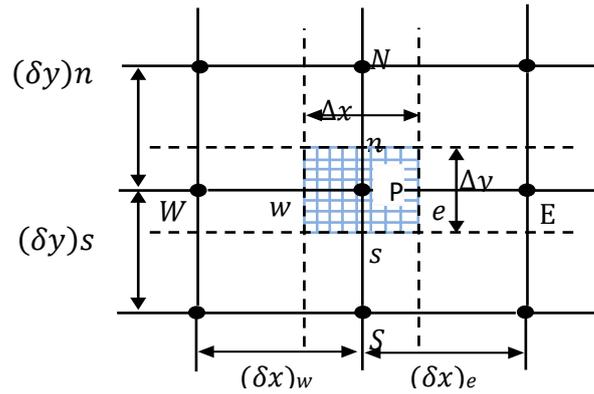


Figure III. 1 volume de contrôle bidimensionnel

Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volume de contrôle, comme indiqué dans la figure (3.1). Chacun de ces derniers englobe un nœud dit nœud principal P, les point E et W (Est et Ouest) sont des voisins dans la direction x, tandis que N et S (Nord et 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 points e et w dans la direction x, n et s dans la direction y.

Dans ce mémoire nous avons effectué la résolution de problème par logiciel FLUENT, basée sur la méthode des volumes finis.

### III.1.1 Maillage

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continue, ou aussi une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et éventuellement son environnement (le milieu) dans l'optique de simulation de calcul ou de représentation graphique.

Ainsi, un élément de volume de contrôle est défini autour de chaque nœud. Les grandeurs scalaires pression et température sont stockées dans le nœud P de maillage figure (.2 (a)), tandis que les grandeurs vectorielles  $u$  et  $v$  sont stockées au milieu des segments reliant les nœuds. L'équation générale du 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 composants de vitesse.

Le volume de contrôle de la composante longitudinale  $u$  est décalé suivant la direction  $x$  par rapport au volume de contrôle principale figure (3.2 (b)), celui de la composante transversale  $v$  est décalé suivant la direction  $y$  figure (3.2 (c)). Ce type de maillage dit «

maillage décalé "permet une bonne approximation des flux convectifs et une meilleure évaluation des gradients de pression ainsi qu'une stabilisation numérique de la solution. La construction des volumes de contrôle et le maillage décalé sont montrés dans figure (3.2) [].

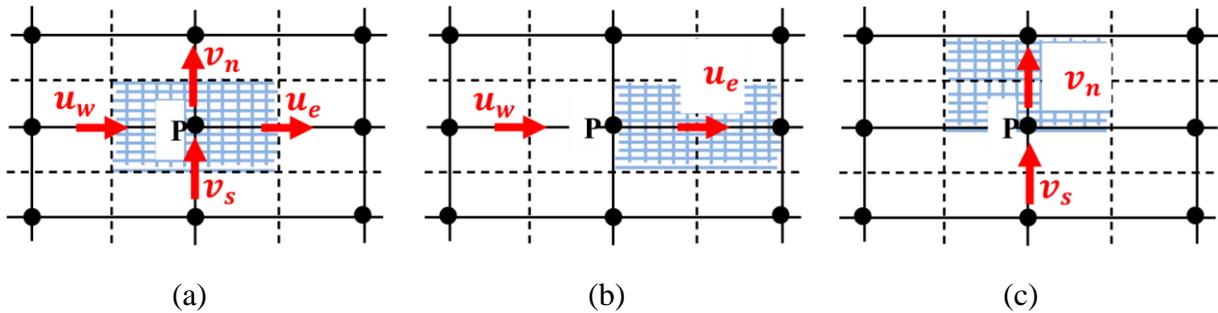


Figure III.2 Schéma de maillage (a) maillage décalé pour  $u_e$ (b) maillage décalé pour  $v_n$ (c)

### III. 1.1.1 Choix de maillage

Le choix de maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs, parmi ces paramètres, on peut citer :

1. Le nombre de la maille.
2. La distance entre les mailles (concentration des mailles).
3. La forme de la maille.
4. Les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

Les différentes formes de maillage des faces montrés dans le tableau (3.1) :

Tableau.III. 1. Différents formes de maillage des faces

Type des cellules en 2D	La forme de maillage	Exemple
Triangulaire		
Quadrilatérale		

### III. 1.1.2 Connectivité

La connectivité décrit les liaisons entre les sommets des éléments. Un maillage structuré si les nœuds de même type (dans le domaine, sur une limite ou sur un coin) ont toujours le même nombre des nœuds voisins. Ou sont associés au même nombre des éléments.

La connectivité associée ces nœuds est alors toujours de même type. Dans le cas d'un maillage non structuré, la connectivité est de type quelconque et le nombre de voisin de chaque nœud diffère localement, comme indique dans la figure (3.3).

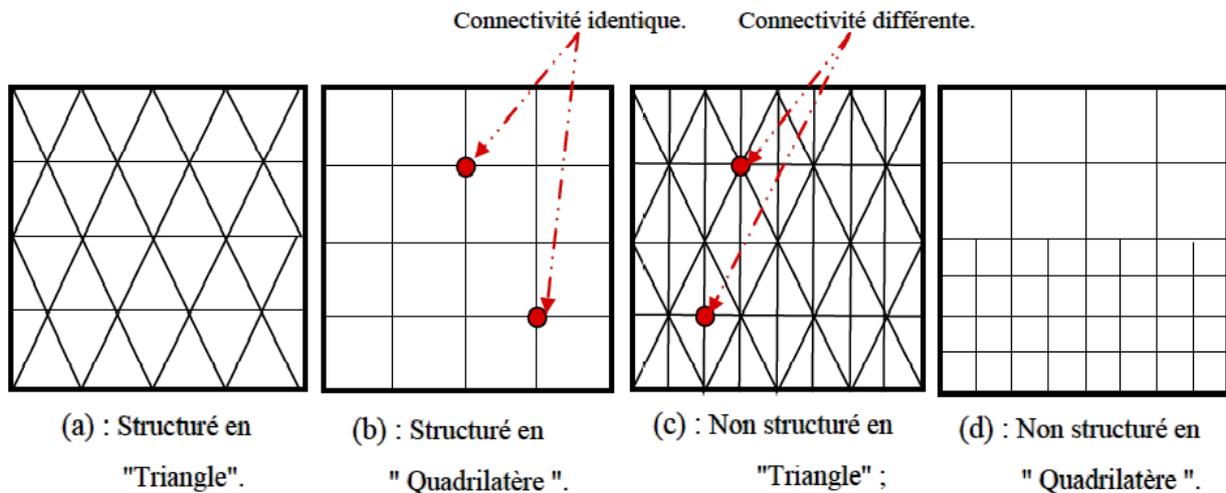


Figure III. 3. Exemples de maillages

### III.2 Problème stationnaire de diffusion pure :

Les méthodes des volumes finis ont été parmi les premières à atteindre un stade de développement avancé pour les calculs d'écoulements stationnaires et instationnaires. Elles ont permis une prise en compte complète des effets de non linéarité et de compressibilité ainsi que les effets de viscosité à l'aide des équations de Navier-Stokes, et de turbulence. Les méthodes aux volumes finis ont supplanté les méthodes classiques basées sur les différences finies dans le traitement des problèmes complexes notamment tridimensionnels.

- La technique comprend deux étapes importantes :

-le maillage : il consiste à diviser le domaine en plusieurs intervalles réguliers appelés volumes de contrôle.

- La discrétisation : lors de cette étape les équations sont intégrées dans les volumes de contrôle.

### **III.3 Les étapes à suivre pour la modélisation numérique par Fluent**

Les principales étapes à suivre lors du travail sur le logiciel de simulation numérique des écoulements Fluent nécessitent la connaissance de certaines notions théoriques de base. Ces notions, concernent notamment, les définitions des principales équations régissant l'écoulement.

La résolution numérique par Fluent d'une manière générale, suit les étapes suivantes [31] :

1. Création de la géométrie sous le Logiciel GAMBIT ;
2. Choix de la stratégie de maillage et création de plusieurs grilles ;
3. Définition des conditions aux limites dans GAMBIT ;
4. Définition du problème sous le logiciel FLUENT, étude des différentes grilles de maillage et sélection du maillage retenue ;
5. Calcul avec FLUENT pour les différents cas retenus ;
6. Analyse des résultats obtenus.

### **III.4 Simulation des grandes structures turbulentes (LES) :**

La simulation des grandes structures turbulentes (LES ou 'Large Eddy Simulation') [32] est une approche intermédiaire hybride utilisant une résolution partielle pour les grands tourbillons et une modélisation partielle pour les petits tourbillons.

L'idée est basée sur l'observation que si les grands tourbillons sont en fait très différents selon les géométries, leur structure variant beaucoup avec le type d'écoulement considéré, par contre les petits tourbillons ont un caractère plus universel.

La méthode consiste alors à calculer le mouvement tridimensionnel et instationnaire des gros tourbillons dans des réalisations particulières de l'écoulement considéré. Les propriétés statistiques sont obtenues ensuite dans un second temps, tout comme on le ferait sur des signaux issus de mesures en laboratoire.

De manière très générale, la modélisation consiste à faire un traitement statistique sur les équations de base et ensuite résoudre numériquement ces équations tandis que la simulation adopte la démarche inverse : résolution numérique des bases de données ainsi constituées.

La justification de ce type d'approche réside dans une idée simple : les grands tourbillons produits par l'écoulement moyen sont fortement dépendants de celui-ci, anisotropes et de longue durée de vie, ils sont difficiles à modéliser. Par contre, les petits tourbillons produits par transfert ont un caractère plus universel et tendent vers l'isotropie, leur durée de vie est courte et ils sont relativement plus faciles à modéliser.

Les simulations numériques à des nombres de Reynolds élevés, se basent donc sur un découpage des fluctuations turbulentes qui permet de ne calculer que les grandes structures énergétiques et modéliser les petites structures de caractère plus universel.

Bien qu'elle soit une technique encore en cours de développement, la simulation des grandes structures turbulentes est actuellement un outil pour l'ingénieur. Elle permet de simuler des configurations très proches de celles rencontrées dans l'industrie ; notamment celles pour lesquelles les modèles classiques. Nous allons faire une simulation numérique pour une structure d'aluminium avec quatre nano fluides qui sont : le cuivre, l'oxyde de cuivre, aluminium, oxyde d'aluminium ceci explique ci-dessus :

### III.5 la Géométrie :

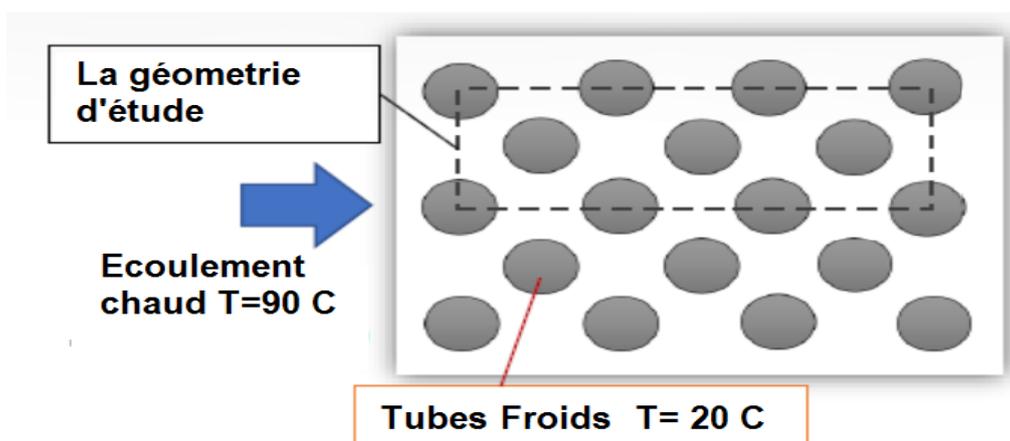


Figure III.4 : la géométrie d'étude

**III.6 Le processeur gambit** : C'est un logiciel conçu pour aider les analystes et les concepteurs à construire et à mailler des modèles pour les problèmes d'écoulement des fluides et d'autres applications scientifiques.

**GAMBIT** reçoit les données de l'utilisateur au moyen de l'interface graphique (GUI). Cette dernière réalise les étapes de base de construction et du maillage. De plus, il est assez souple pour adapter plusieurs applications de modelage. **GAMBIT**, le générateur de maillage convivial et ergonomique comprend un ensemble très complet d'outils de génération de maillages surfaciques et volumiques qui permettent de réaliser rapidement des maillages de qualité et garantissent une précision des résultats optimale, notamment, la génération automatique du maillage volumique en tétraèdre. Il a, aussi, l'avantage d'importer des fichiers CAO grâce à l'interface (au format CAD...) Qui transforme la géométrie directement en une série de maillages surfaciques ou volumiques.

**GAMBIT** possède une interface facile à manipuler et qui est constituée de plusieurs fenêtres d'outils d'opération destinées à construire le modèle, générer le maillage et incorporer les conditions aux limites, [33].

- Démarrage de GAMBIT :

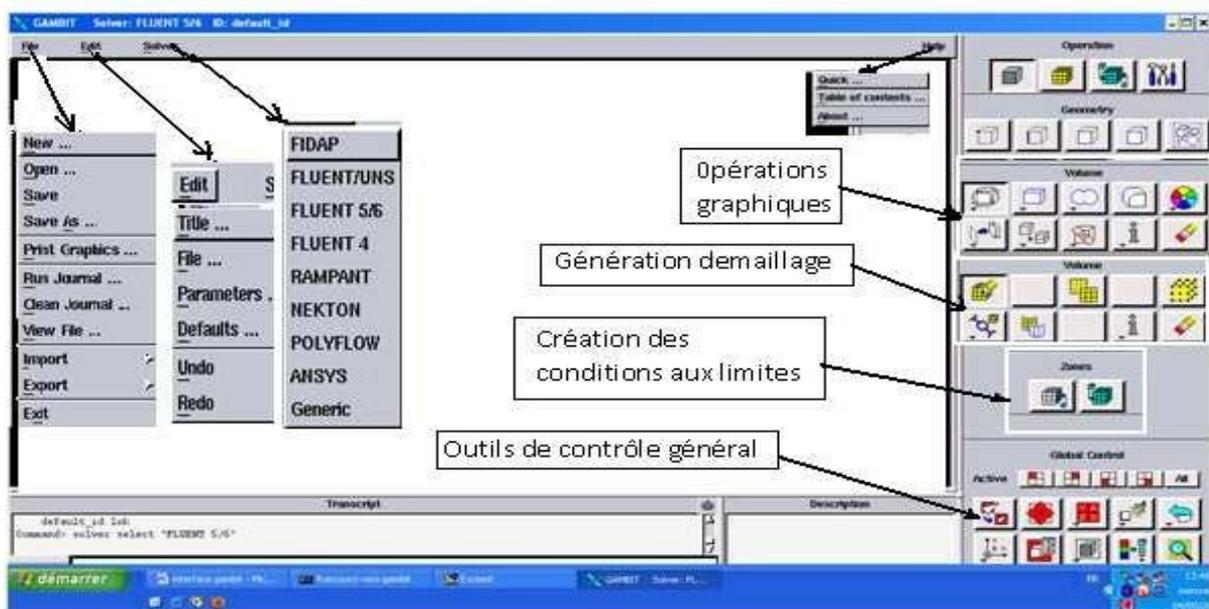


Figure III.5 : Démarrage de Gambit.

- Créations les points :

Importer fichier **geometry** pour créer les points sur **gambit**.

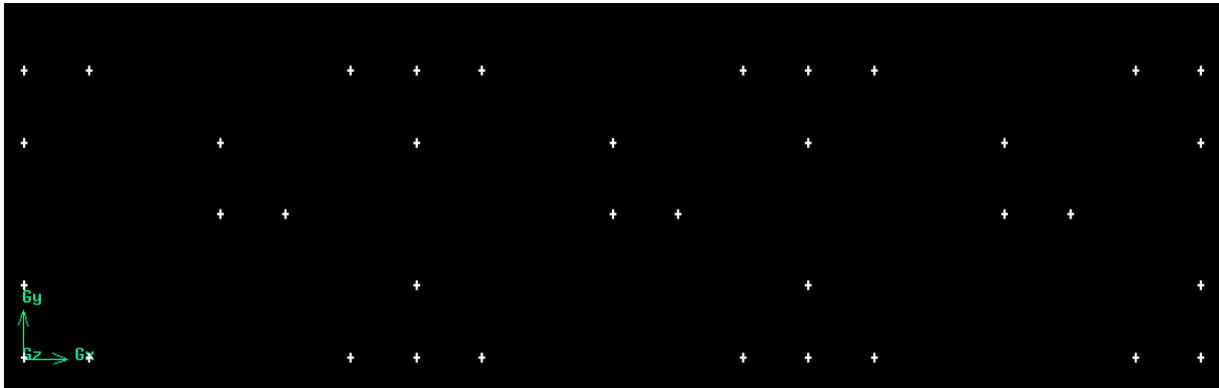


Figure III.6 : Création les points.

- Création les lignes :

Geometry Command Button  > Edge Command Button  > Create Edge 

Sélectionnez deux points en maintenant enfoncée la touche **Shift** et en cliquant sur les points. Comme chaque point est choisi, il apparaîtra en rouge dans la fenêtre graphique. Ensuite, relâchez la touche **Shift** et cliquez sur **Apply** dans la partie Créer Straight Edge fenêtre pour créer cette ligne. Répétez ce processus pour créer les lignes restantes.

Et pour les arcs :

Geometry Command Button  > Edge Command Button  > Create Edge 

Pour les cercles :

Geometry Command Button  > Edge Command Button  > Create Edge 

Sélectionnez deux points en maintenant enfoncée la touche **shift** et en cliquant sur les points, comme chaque point est choisi, il apparaitra en rouge et cliquez sur le centre et cliquez sur **Apply**.

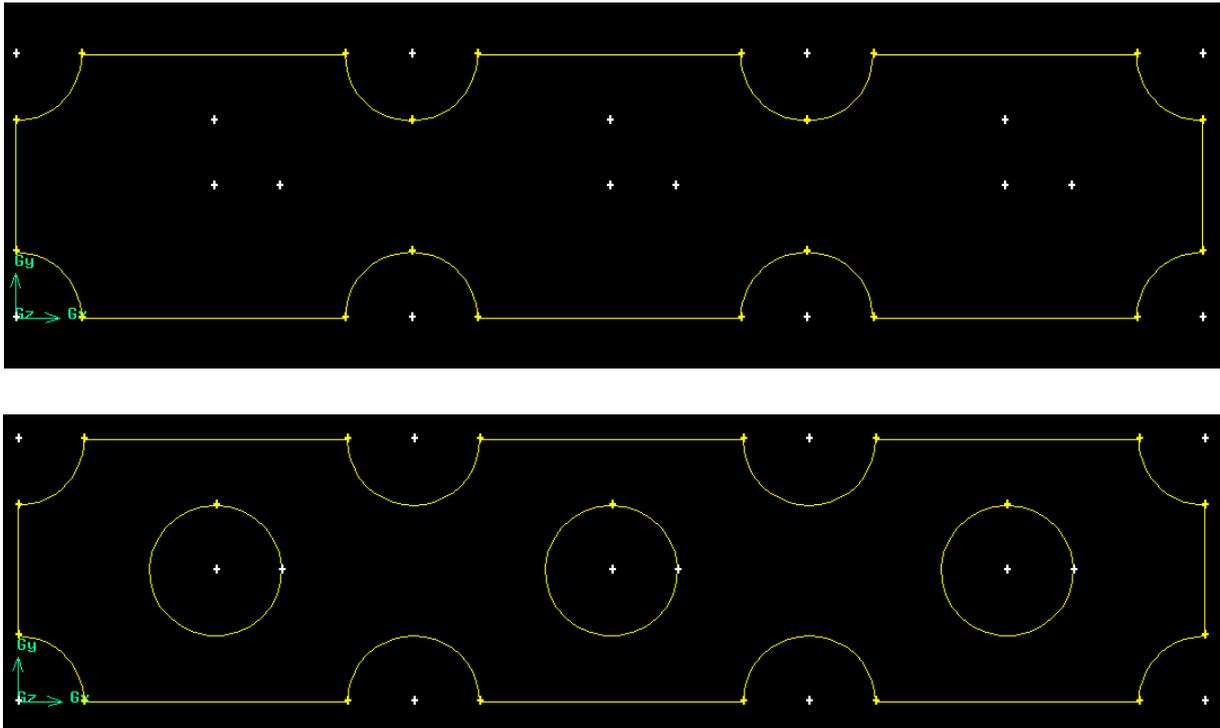
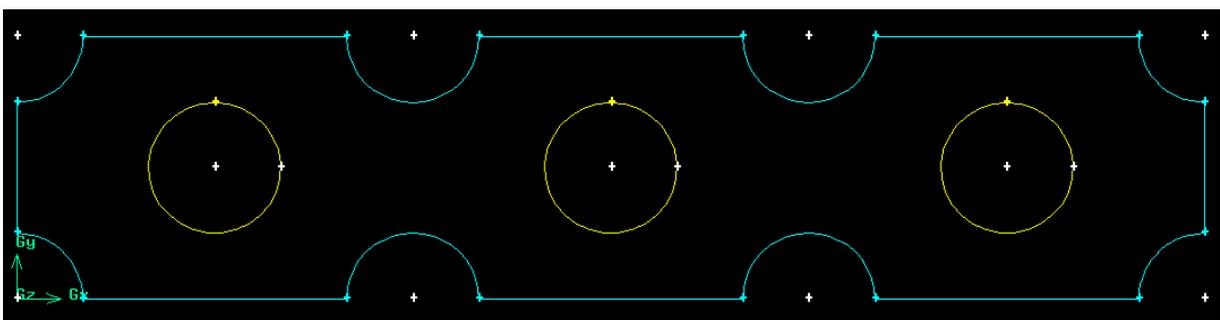


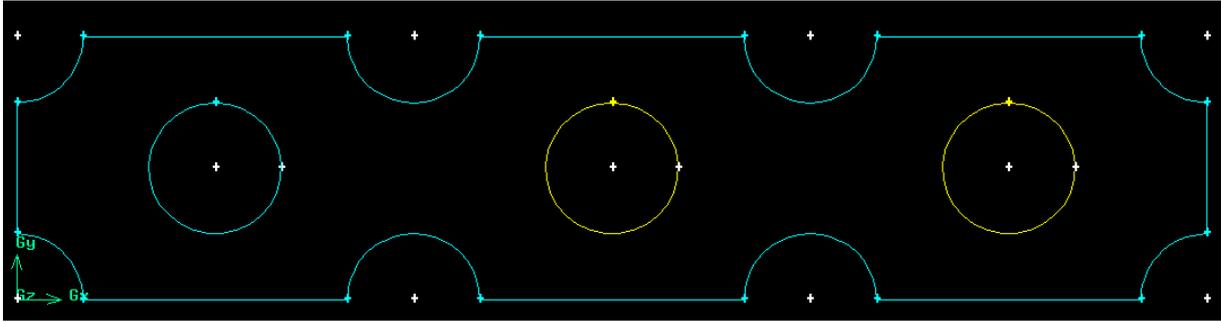
Figure III.7 : Création des lignes

- **Création des faces :**

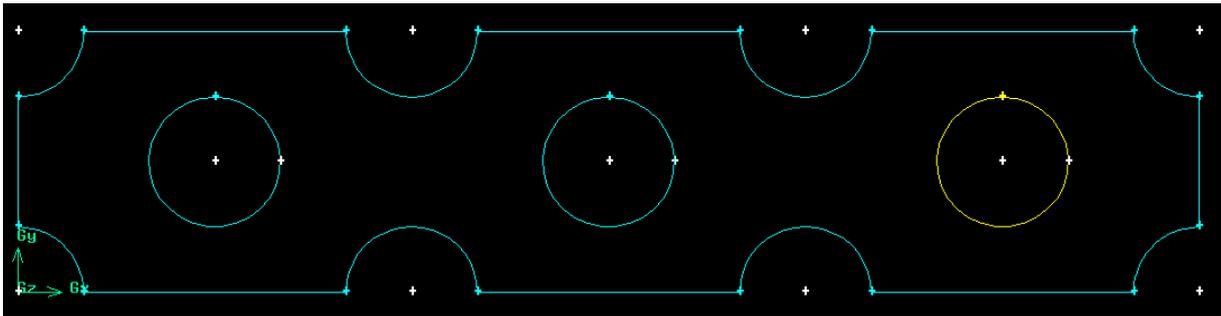
Pour former les faces, nous avons besoin pour sélectionner les lignes qui entourent ce domaine. Cela peut se faire en maintenant la touche **Shift**, en cliquant sur chaque ligne (notez que la ligne actuellement sélectionnée apparaît en rouge), puis relâcher la touche Shift après tous les lignes ont été sélectionnées et cliquez sur **Apply**.



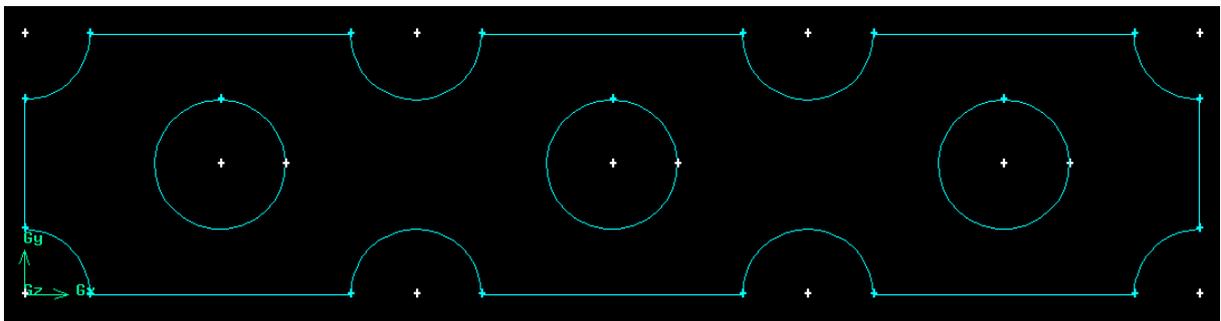
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.8 : Création des faces.

### Étape 2 : Maillage géométrie dans GAMBIT :

#### - Maillage des parois :

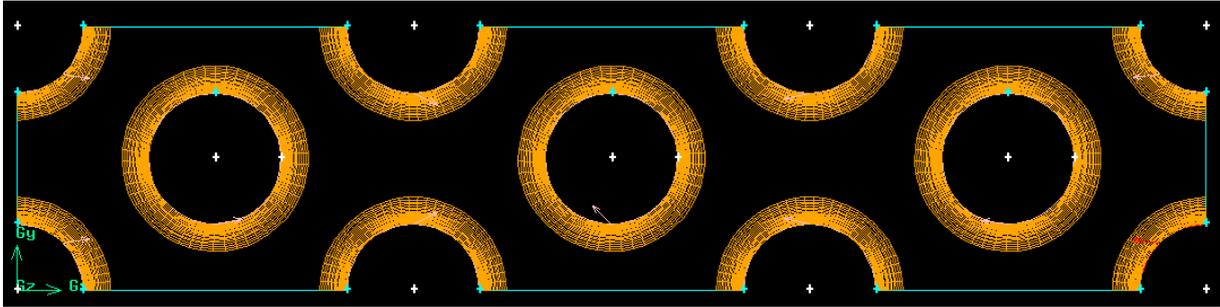
Mesh Command Button  > Edge Command Button  > Mesh Edges 

Sélectionnez les lignes verticales, sélectionnez **Interval count** dans la liste découlant qui dit **Interval Size** du maillage des bords de fenêtres, entre les nombres des nœuds pour l'intervalle compter et cliquez sur **Apply**.

- **Maillage des surfaces :**

Mesh Command Button  > Face Command Button  > Mesh Faces 

Sélectionnez la première surface et cliquez sur **Apply**.



Répétez le même processus pour les autres surfaces.

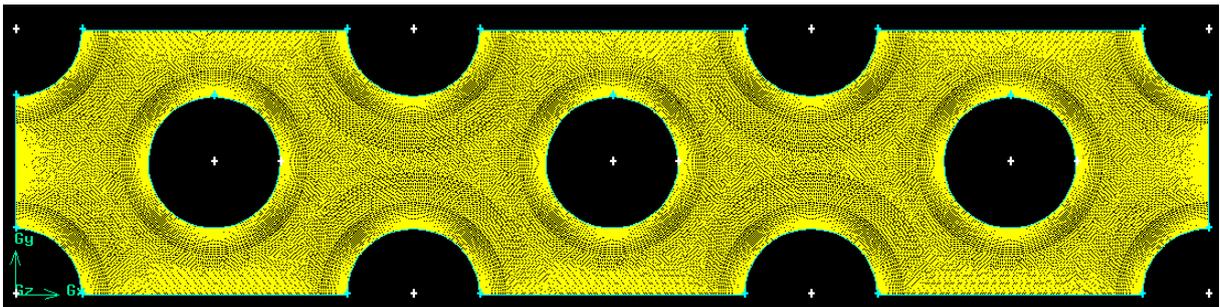


Figure III.9 : Maillage des surfaces.

**Étape 3 : les conditions aux limites dans GAMBIT :**

Zones Command Button  > Specify Boundary Types Command Button 

Sélectionnez la ligne gauche (entré de fluide).

Ecrire à côté de Nom : **inlet** Pour le type : sélectionnez **Pressure inlet**.

Cliquez sur **Apply**.

Sélectionnez la ligne à droite (sortir de fluide).

Ecrire à côté de Nom : **outlet** Pour le type : sélectionnez **Pressure outlet**

Cliquez sur **Apply**.

Sélectionnez la ligne au-dessus.

Ecrire à côté de Nom : **symmetry** Pour le type : sélectionnez **symmetry**.

Cliquez sur **Apply**.

Sélectionnez les arcs et cercles

Ecrire à côté de Nom : **Wall** Pour le type : sélectionnez **Wall**.

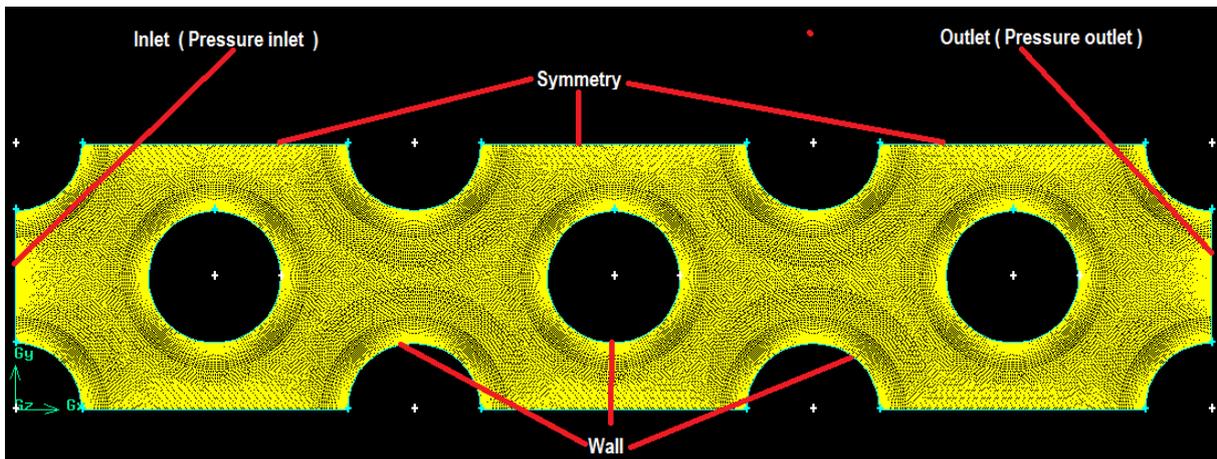


Figure III.10 : les conditions aux limites.

Exporter le maillage et sauvegarder le fichier

Une fois que la géométrie a été créée, que les conditions aux limites ont été définies, il faut exporter le maillage, en point. msh (mesh = maillage en anglais) pour que Fluent soit capable de le lire et de l'utiliser.

On peut ensuite fermer Gambit et lancer Fluent.

**File > Export > Mesh**

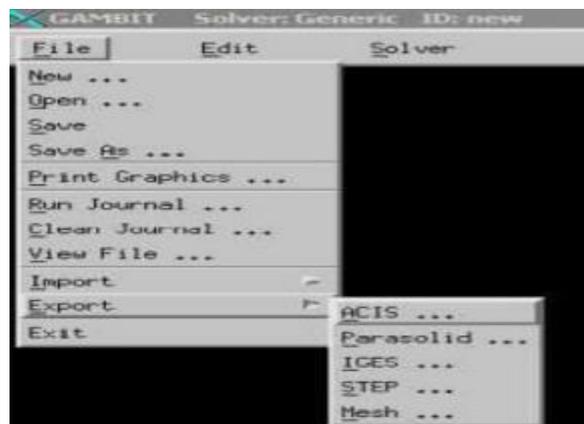


Figure III.11 : Exporter le maillage.

### III.7 Code FLUENT :

Fluent [34] est un programme informatique conçu pour la simulation des écoulements de fluide et du transfert de chaleur dans des géométries complexes.

Il présente une grande flexibilité d'adaptation avec n'importe quel type de maillage.

Il permet le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenus. Cela est très utile dans les régions à gradients importants (couches limites, couches à cisaillement libre).

Fluent est écrit en langage C. il emploie toute la flexibilité et la puissance qu'offre ce langage. Il a une architecture serveur client nécessaire au calcul parallèle sur plusieurs machines.

Fluent dispose d'un outil de graphisme pour l'affichage des résultats et leur exploitation. On peut aussi exporter les résultats vers un autre logiciel de graphisme.

#### Étape 4 : Mise en place problème dans FLUENT :

- Démarrer la version **2ddp** de **FLUENT**
- Lire le fichier échangeur.

**Msh File > Read > Case**

- Vérifier maillage

**Grid > Check**

- Contrôler la taille

**Grid > Info > Size**

- Vérifier unité

**Grid > Scale**

- Afficher le maillage

**Display > Grid**

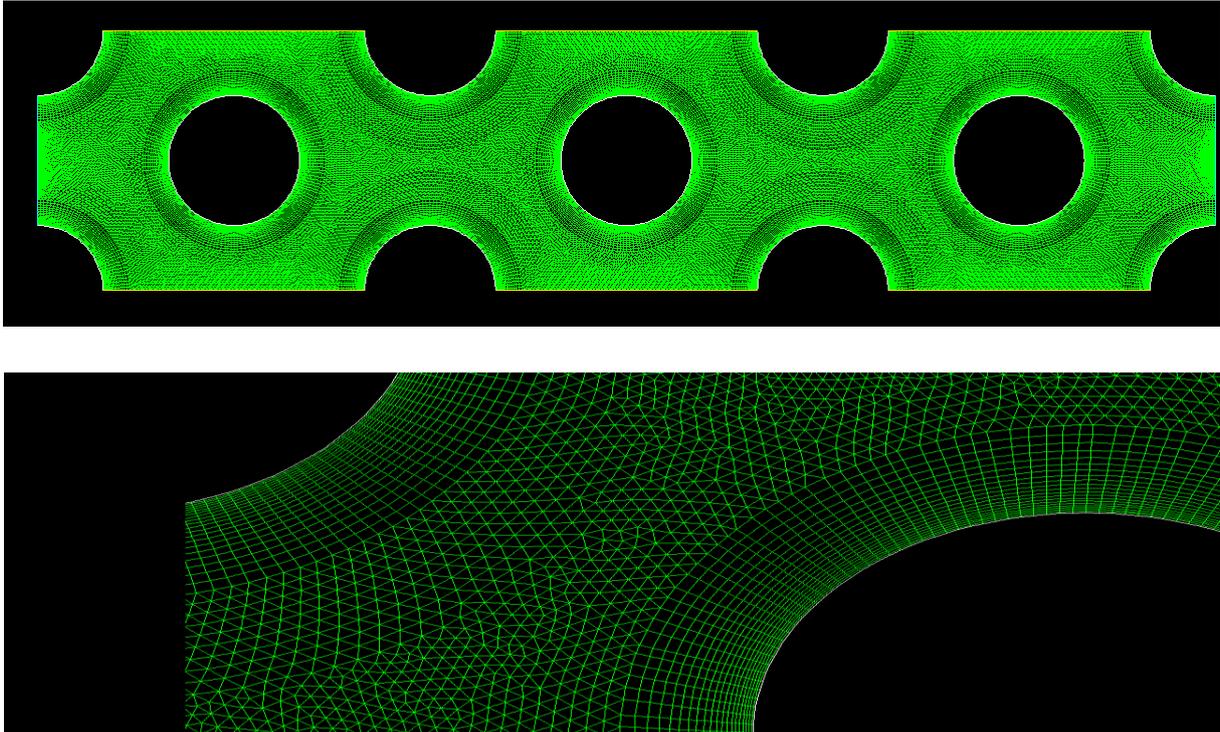


Figure III.12 : Affichage du maillage.

- Préciser le solveur de propriétés

### Define > Models > Solver

Pour notre cas, c'est un solveur découplé avec une formulation implicite pour un cas **2D** et un écoulement stationnaire et une vitesse absolue, valider en cliquant sur **OK**.

D'autres équations peuvent être rajoutées selon les phénomènes étudiés (transfert de chaleur, combustion, multi phases ...).

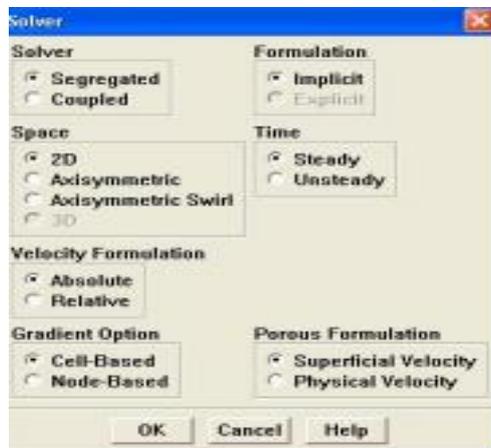


Figure III.13 : Définition du modèle.

**Define > Models > Energy**

- Formulation de l'équation d'énergie

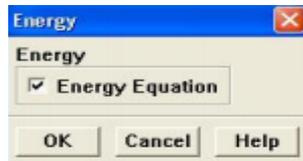


Figure III.14 : Définie équation d'énergie.

**Define > Models > Viscous**

À flux **laminaire** est l'option par défaut. Nous n'avons donc pas besoin de changer quoi que ce soit dans ce menu. Cliquez sur **Cancel**.

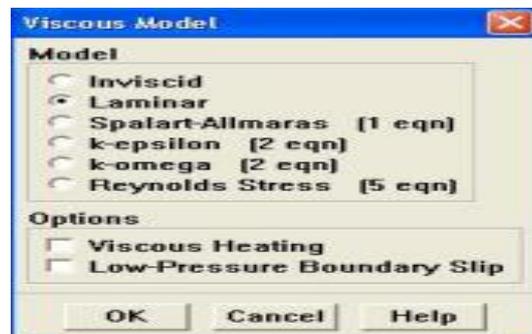


Figure III.15 : Définition le model d'écoulement.

- Définir les propriétés des matériaux

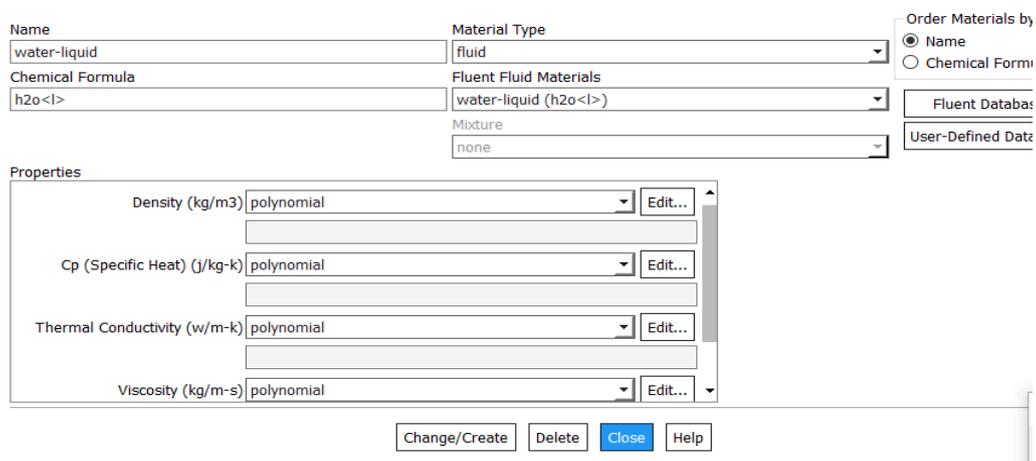
**Define > Matériels...**

Figure III.16 : Définition des propriétés des matériaux.

- Définir les conditions aux limites :

**Define > Boundary Conditions...**

Les conditions aux limites pour chaque frontière seront définies avec la fenêtre Boundary condition, après avoir sélectionné chaque fois, la frontière concernée et faire rentrer les conditions aux limites de cette dernière ensuite valider.

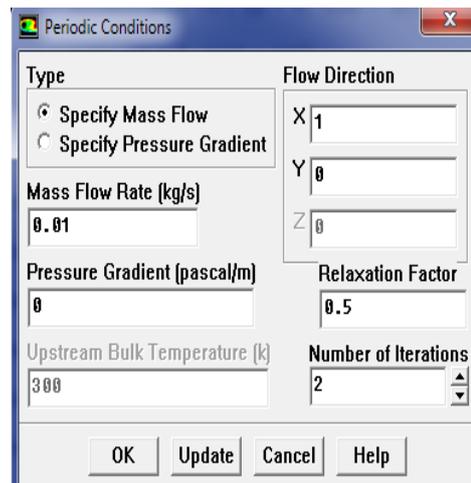
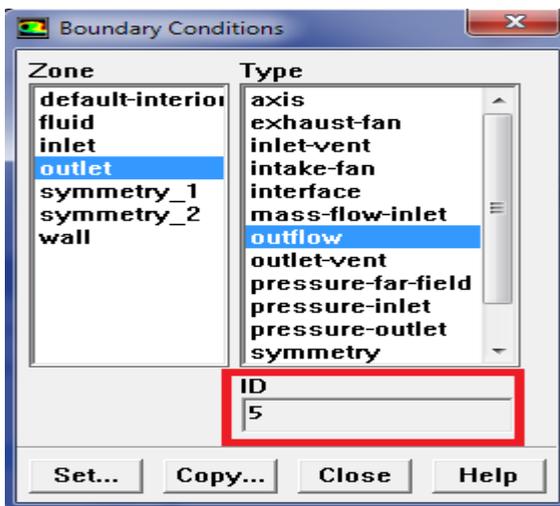
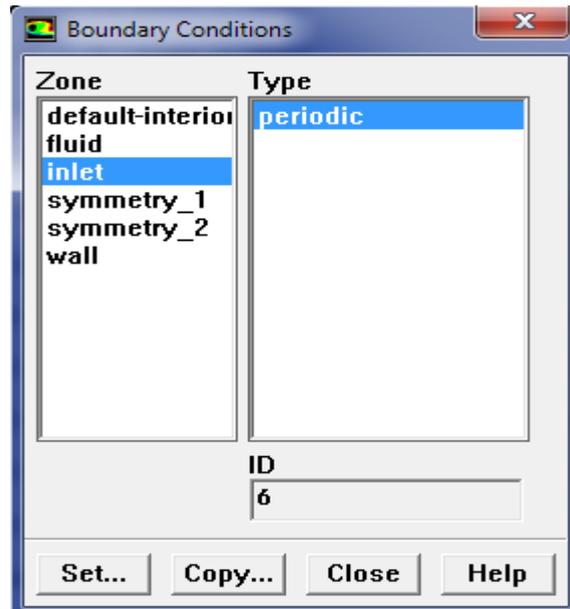
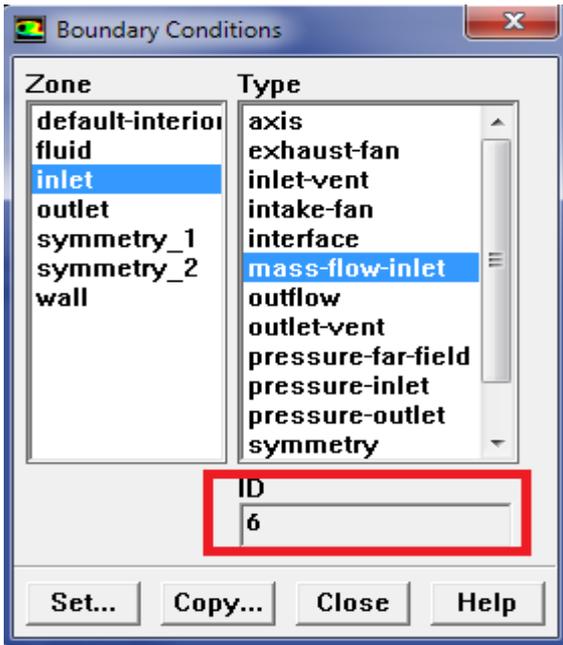


Figure III.17 : Définition des conditions aux limites.

**Étape 5 : solution :****Solve > Controls > Solution...**

On doit choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisation, les facteurs de sous relaxations, les critères de convergence et les algorithmes pour le couplage pression-vitesse

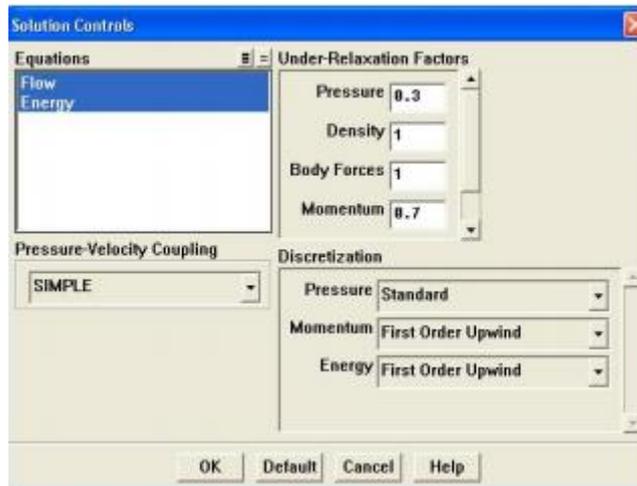


Figure III.18 : Control la solution.

**Solve > Initialize > Initialize...**

Initialiser le champ d'écoulement pour la valeur à l'entrée :

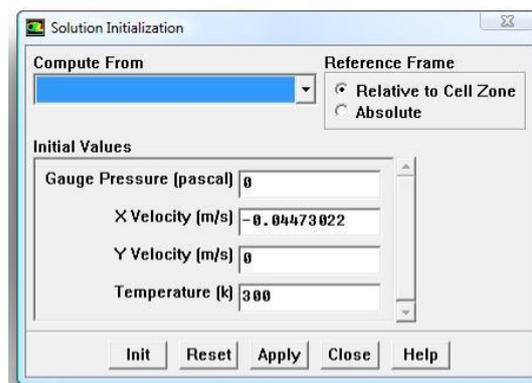


Figure III.19 : Initialisation la vitesse et la température à l'entrée.

**Solve > Monitors > Résiduel...**

Faire activer l'option plot dans la fenêtre résiduel monitor. Lancement des itérations jusqu'à la convergence (Solve > Iterate...), enregistrer les résultats pour entamer ensuite la phase sortie graphique.

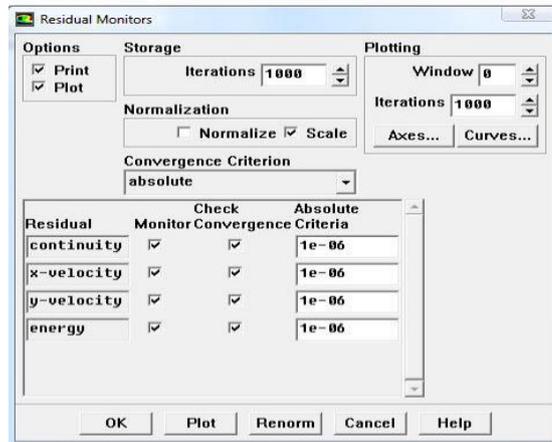
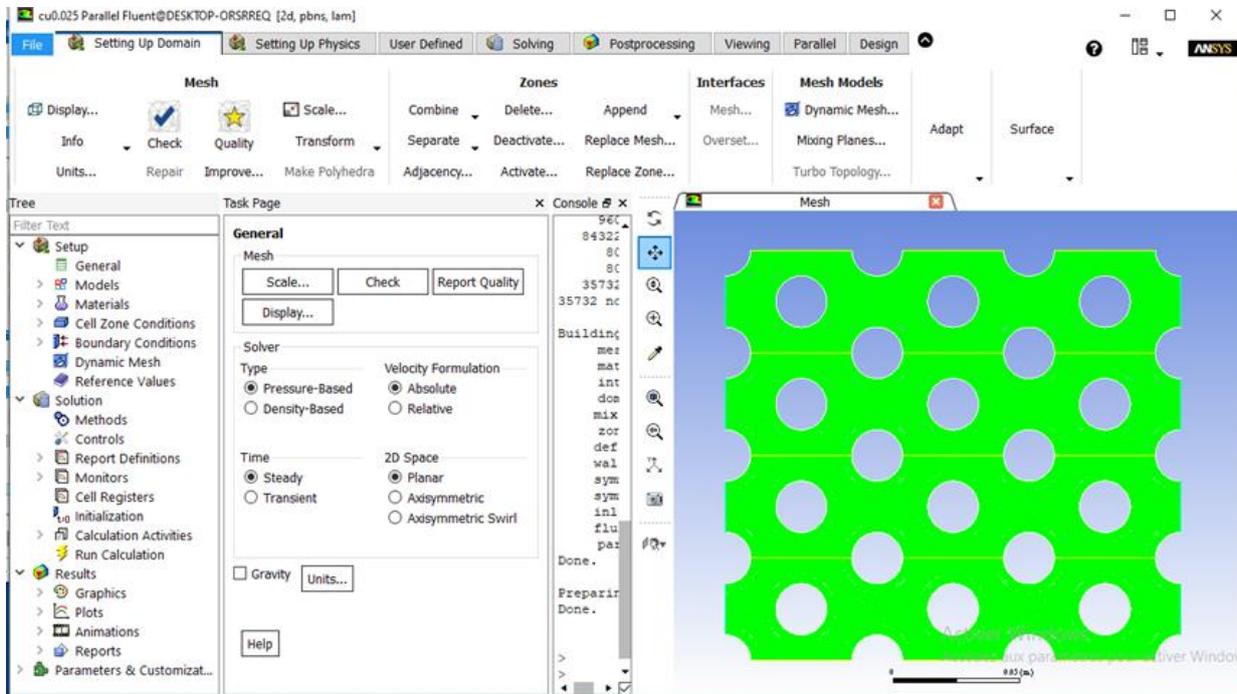
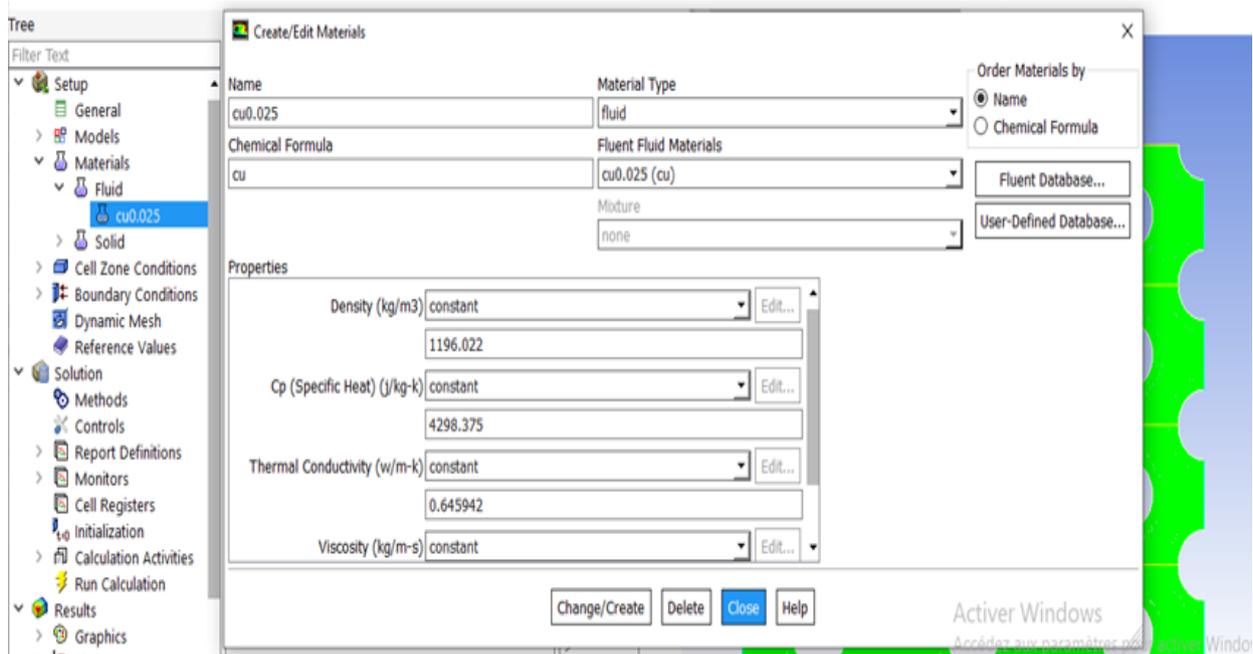


Figure III.20 : Les résidus des calculs.

- Démarrage fluide



Materials > fluid > change



Run > calculater > ok

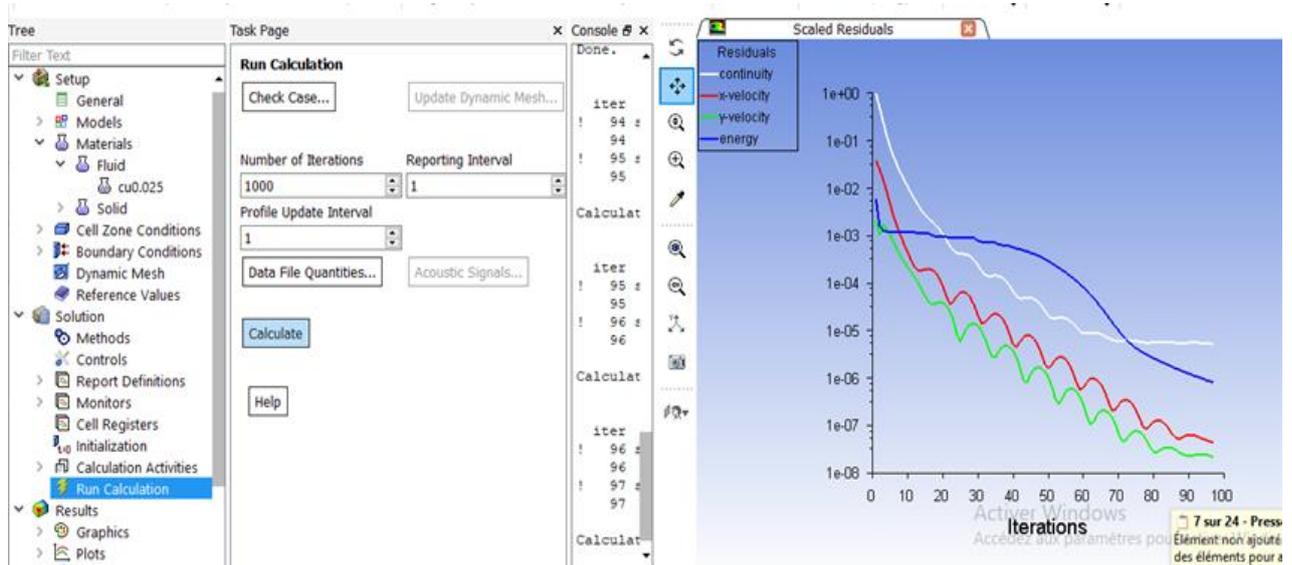


Figure III.21 : critère de la convergence.

Potprocessing > contours > contours of > displayj

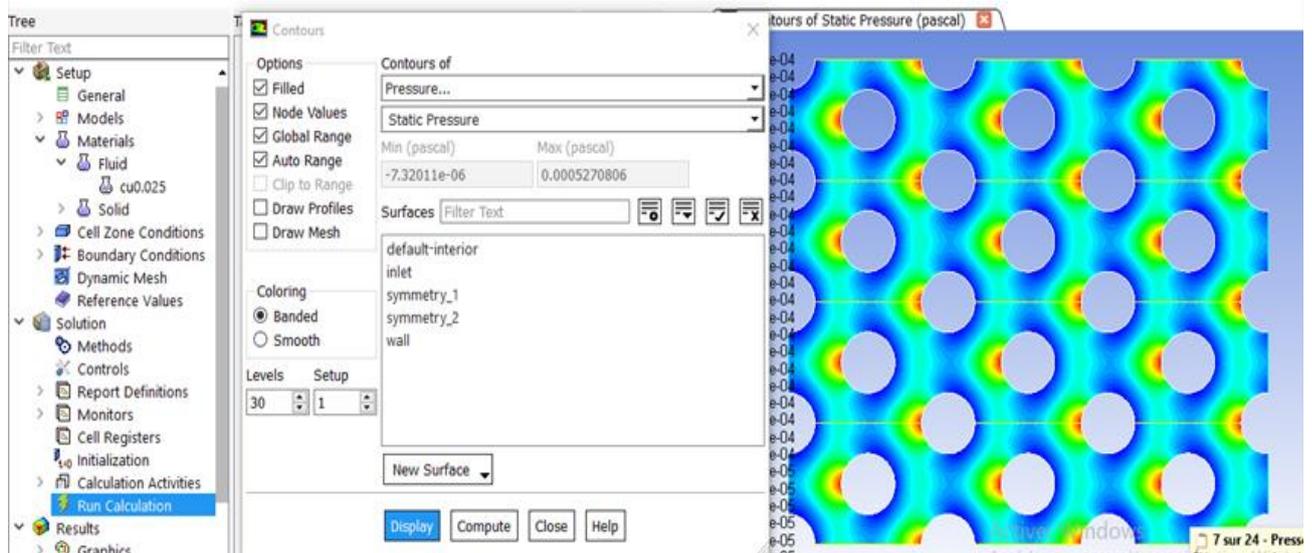
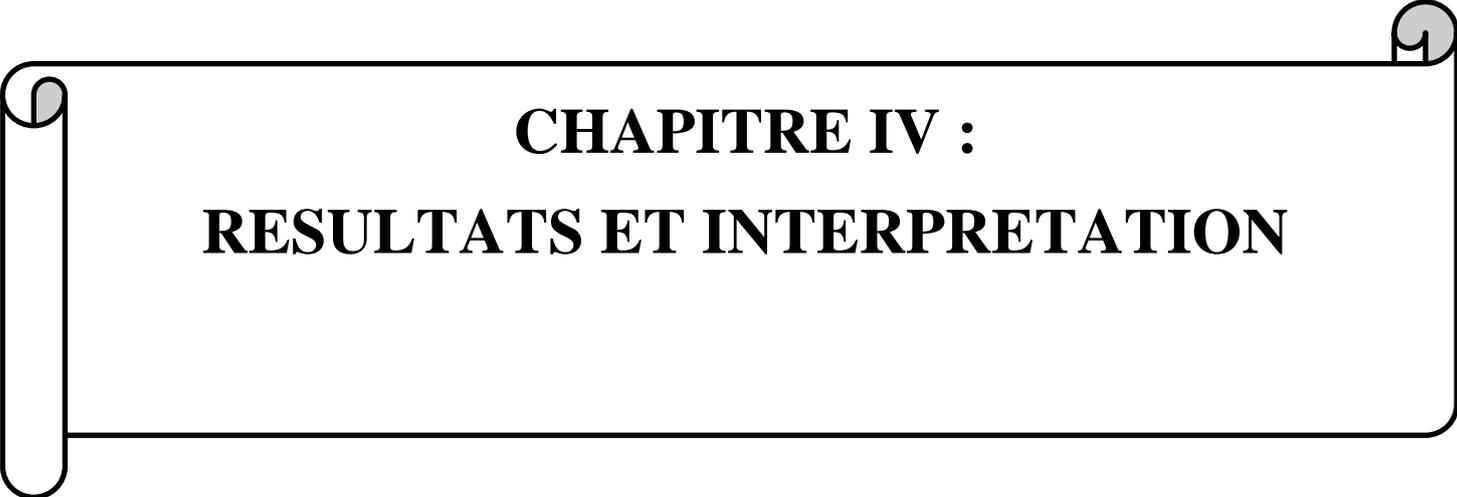


Figure III.22 : affichage de contour.

### III.8 Conclusion :

Dans le présent chapitre, nous avons présenté le code calcul ANSYS-Fluent, son principe de fonctionnement, et sa méthode de résolution des équations générales de l'écoulement, en utilisant le modèle basé sur le concept de viscosité turbulente, Après, nous

avons présenté les étapes suivies pour la création de la géométrie, et du maillage, la Configuration de notre problème, dont les résultats seront discutés au chapitre suivant.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

**CHAPITRE IV :**  
**RESULTATS ET INTERPRETATION**

## INTRODUCTION :

La résolution des équations d'un écoulement se fait par l'utilisation d'une méthode numérique qui consiste à développer les moyens de la résolution de ces équations.

Ce chapitre expose la description du problème et la simulation par le code de calcul ANSYSFLUENT, essentiellement la procédure qu'il propose pour résoudre les problèmes

La Construction des géométries avec génération de maillage et l'incorporation des conditions aux limites sont effectuées par le processeur GAMBIT.

### IV.1 Simulation d'un faisceau d'un échangeur thermique avec ANSYS :

La simulation est un moyen efficace pour mettre au point et étudier le comportement thermique des systèmes. Mais il est nécessaire de savoir ce que l'on cherche pour utiliser l'outil de façon optimale. L'informatique offre la possibilité d'effectuer des calculs qui seraient longs, fastidieux et répétitifs. Il existe plusieurs types de simulation pour un système physique : allant du modèle de représentation qui ne s'appuie que sur des relations mathématiques traduisant les grandes caractéristiques de son fonctionnement, jusqu'au modèle de connaissance complexe issu de l'écriture des lois physiques régissant les phénomènes mis en jeu. Le choix du type de modèle dépend principalement des objectifs poursuivis.

#### IV. 2. Le critère de convergence :

Pour s'assurer de la convergence des calculs, nous nous aidons d'un critère visuel. Consiste à observer les courbes des résidus tracées par Fluent, en fonction des itérations. Lorsque les résidus sont faibles (inférieurs à  $10^{-3}$  au moins) et que les courbes deviennent plates comme illustrées ci-dessous, nous pouvons considérer que la solution est atteinte.

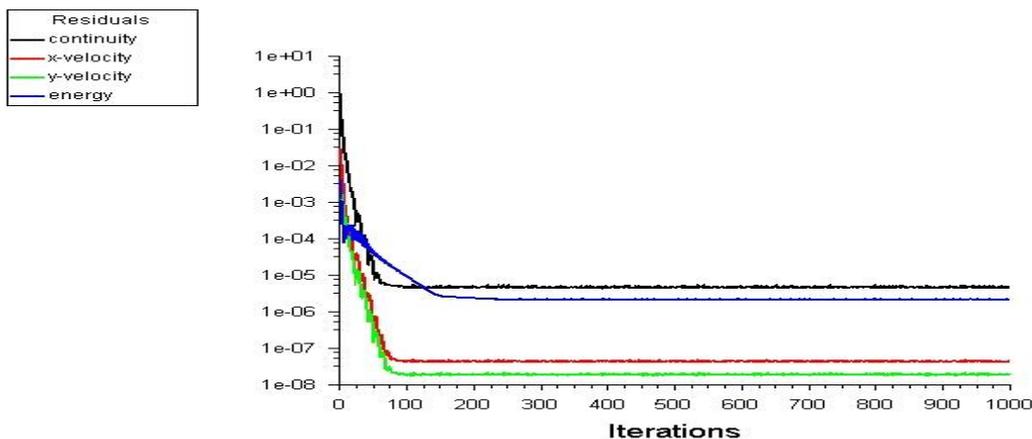


Figure IV.1: Critère de la convergence d'aluminium dans une concentration de 0.1

### IV.3 Les Contours des paramètres thermodynamiques :

#### IV.3.1- La pression :

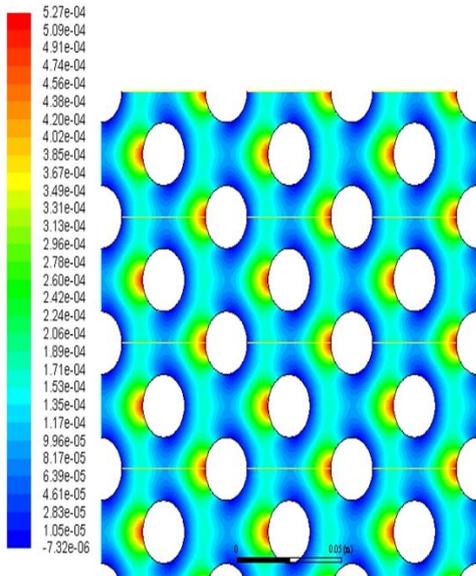


Figure IV.2: Contour de la pression dans le faisceau de

l'échangeur pour le cuivre Cu

a une concentration égale 0.025

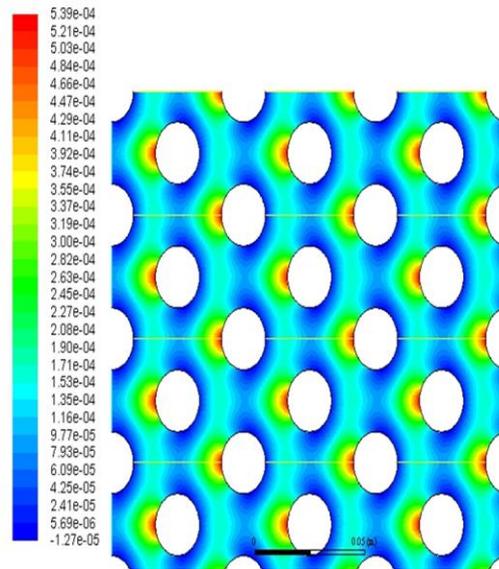


Figure IV.3: Contour de la pression dans les faisceaux

de l'échangeur pour l'oxyde de cuivre CUO

a une concentration égale 0.025

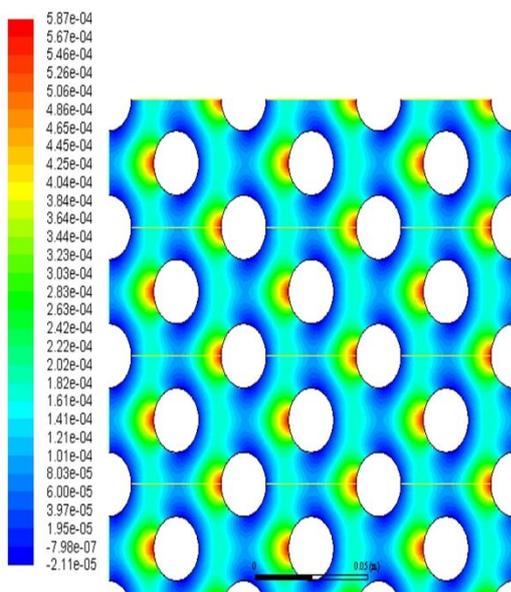


Figure IV.4: Contour de la pression dans le faisceau de

L'échangeur pour l'aluminium Al

a une concentration égale 0.025

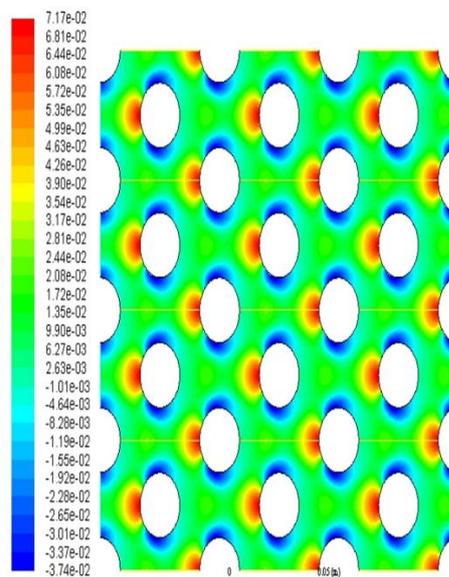


Figure IV.5: Contour de la pression dans les faisceaux

de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

a une concentration égale 0.025

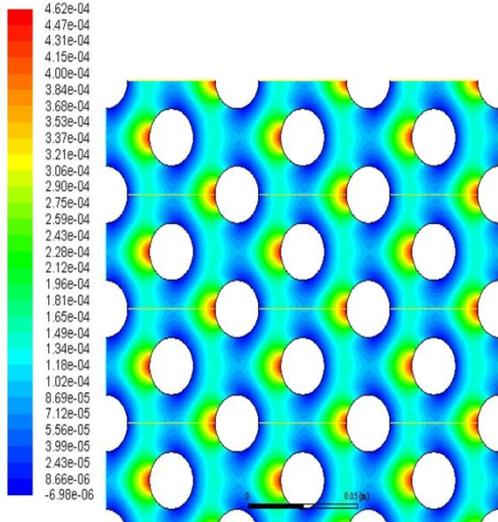


Figure IV.6: Contour de la pression dans le faisceau de

L'échangeur pour le cuivre Cu

a une concentration égale 0.05

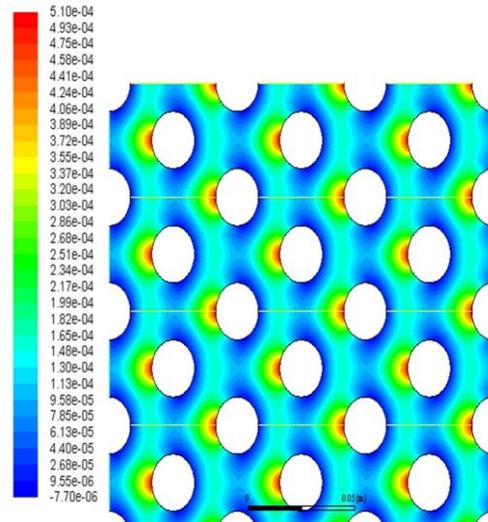


Figure IV.7: Contour de la pression dans les faisceaux

de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO

a une concentration égale 0.05

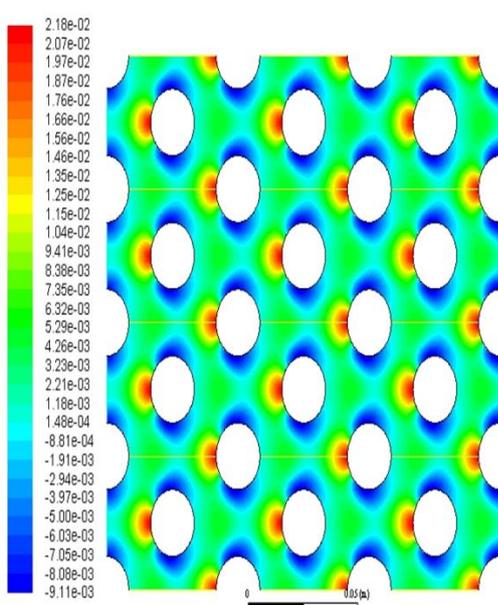


Figure IV.8: Contour de la pression dans le faisceau de

L'échangeur pour l'aluminium Al

a une concentration égale 0.05

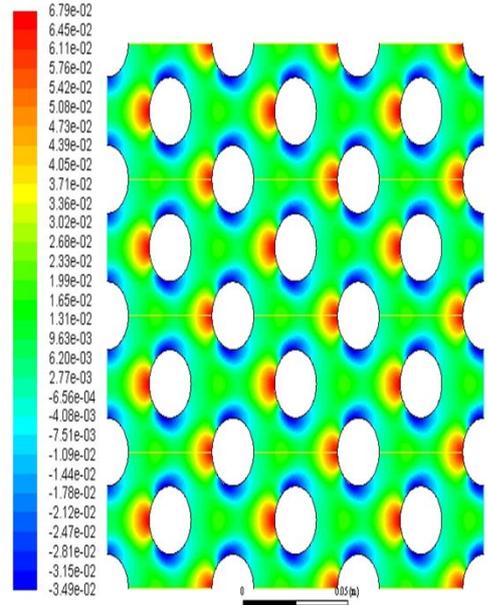


Figure IV.9: Contour de la pression dans les faisceaux

de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

a une concentration égale 0.05

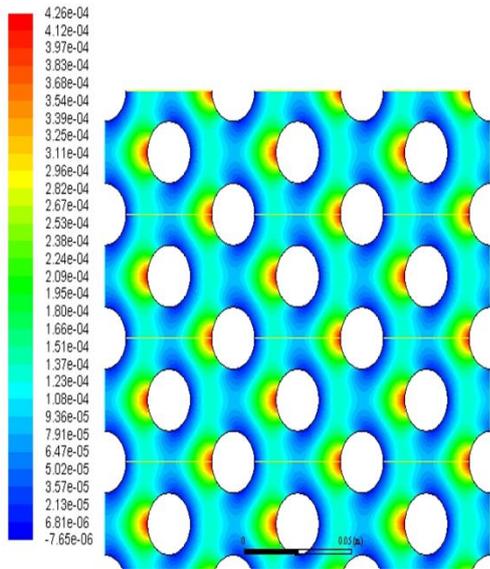


Figure IV.10: Contour de la pression dans le faisceau de L'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.075

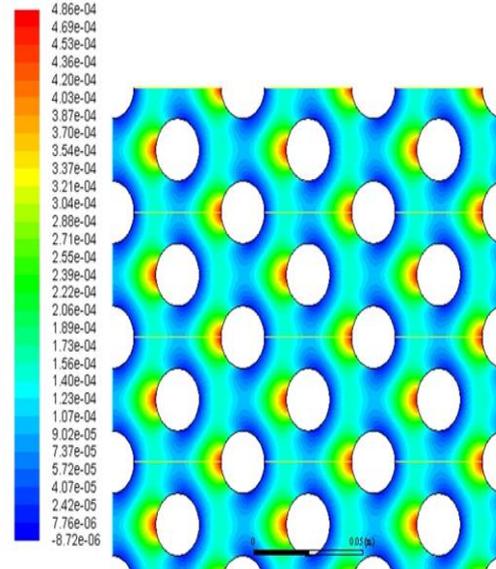


Figure IV.11: Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO a une concentration égale 0.075

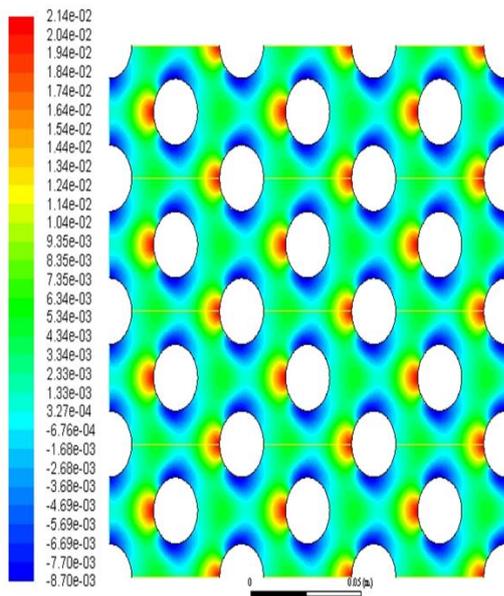


Figure IV.12: Contour de la pression dans le faisceau de L'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.075

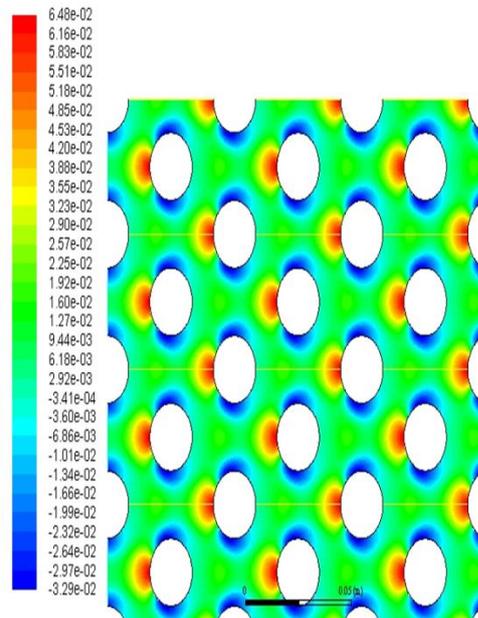


Figure IV.13: Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a une concentration égale 0.075

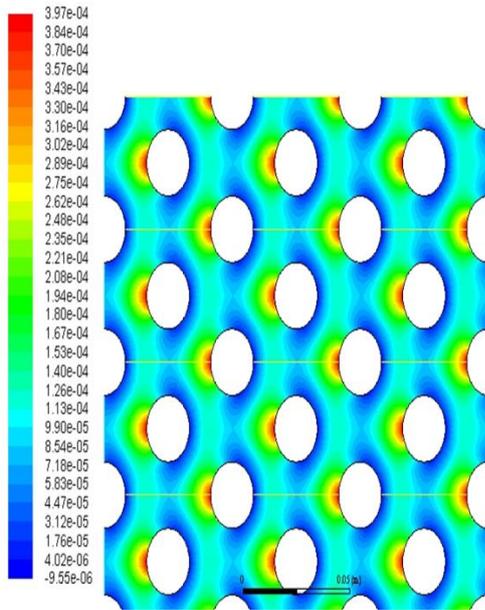


Figure IV.14: Contour de la pression dans le faisceau de L'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.1

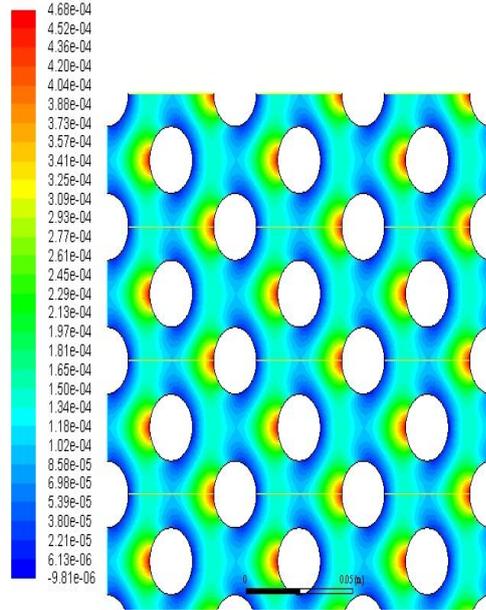


Figure IV.15: Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO a une concentration égale 0.1

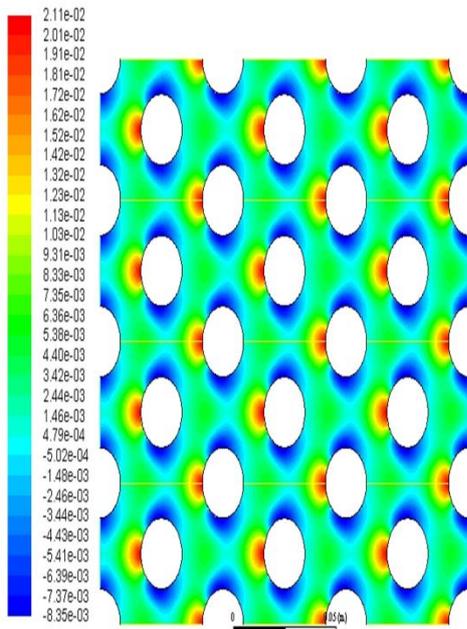


Figure IV.16: Contour de la pression dans le faisceau de L'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.1

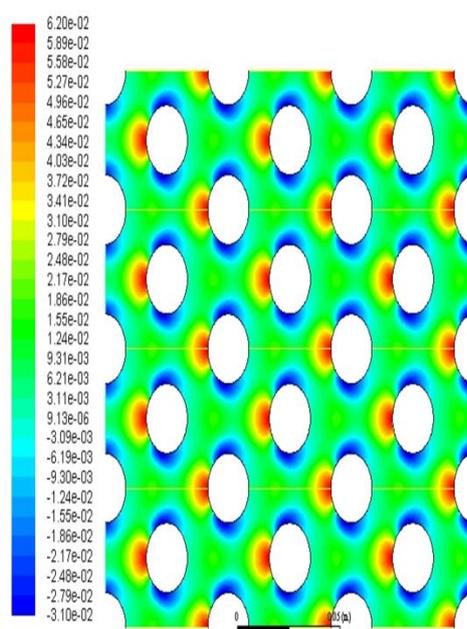


Figure IV.17: Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a une concentration égale 0.1

Les figures (IV.2— IV.17) représentent les contours de la pression dans le faisceau de l'échangeur pour quatre matériaux sont aluminium, le cuivre. Oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration

Nous remarquons dans les contours lorsque la concentration augmente de 0,1 jusqu'à 0,3 que la pression à l'entrée d'un faisceau de tubes pour les quatre matériaux aluminium, l'oxyde de l'aluminium, le cuivre et l'oxyde de cuivre est supérieure à la pression de sortie, car l'écoulement est chaud à l'entrée des tubes, et après avoir circulé autour des tubes il est refroidi, ce qui explique la chute de pression à la sortie d'un faisceau des tubes

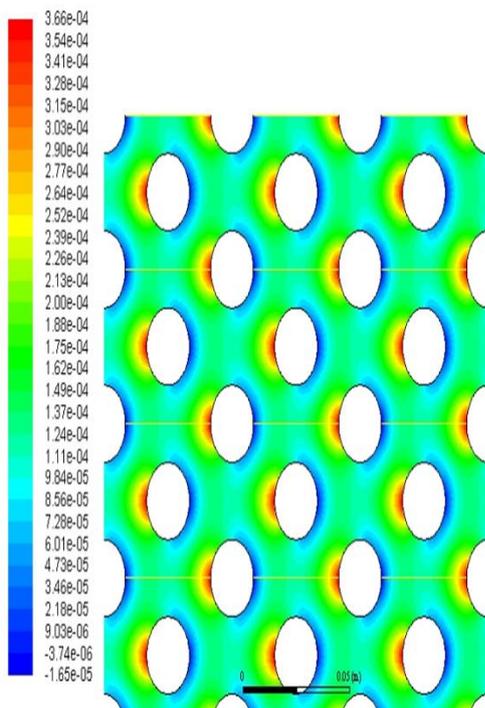


Figure IV.18: Contour de la pression dans le faisceau de l'échangeur pour le cuivre Cu à une concentration égale 0.3

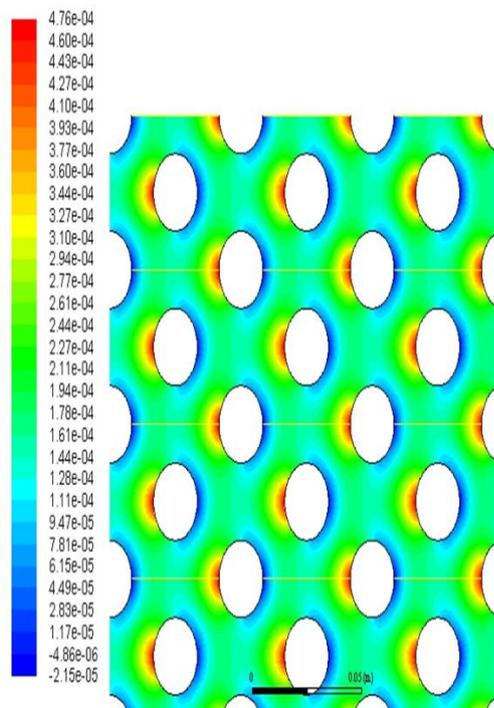


Figure IV.19: Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO à une concentration égale 0.3

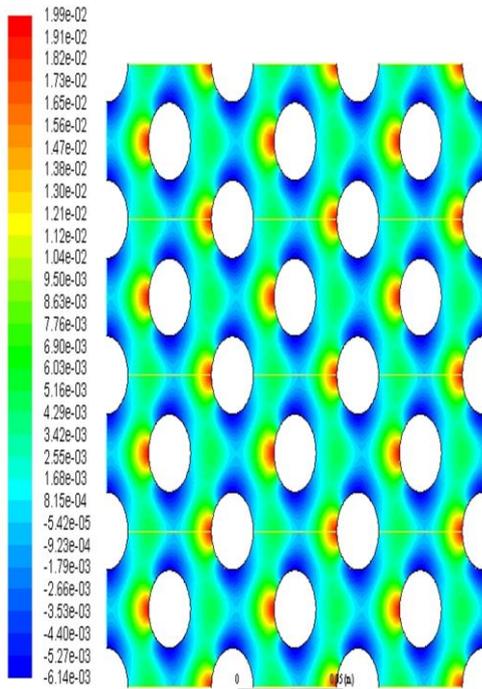


Figure IV.20: Contour de la pression dans le faisceau de

L'échangeur pour l'aluminium Al

a une concentration égale 0.3

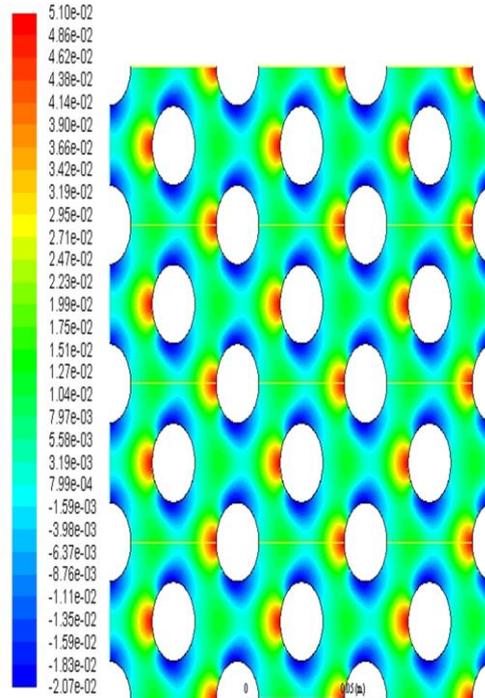


Figure IV.21: Contour de la pression dans les faisceaux

de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$

a une concentration égale 0.3

Les figures (IV.18— IV.21) représentent les contours de la pression dans le faisceau de l'échangeur pour quatre matériaux sont aluminium, le cuivre. Oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration

Nous remarquons dans les contours lorsque la concentration augmente de 0,1 jusqu'à 0,3 que la pression à l'entrée d'un faisceau de tubes pour les quatre matériau aluminium, l'oxyde de l'aluminium, le cuivre et l'oxyde de cuivre est supérieure à la pression de sortie, car l'écoulement est chaud à l'entrée des tubes, et après avoir circulé autour des tubes il est refroidi, ce qui explique la chute de pression à la sortie d'un faisceau des tubes

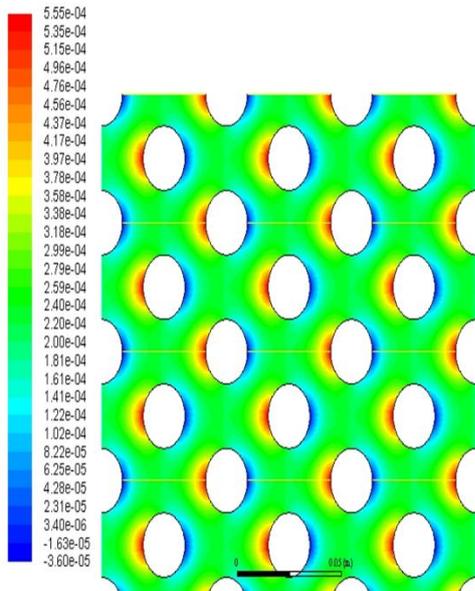


Figure IV.22: Contour de la pression dans le faisceau de L'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.5

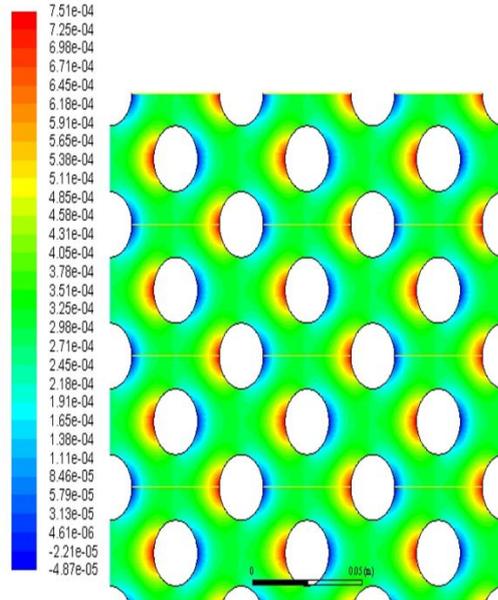


Figure IV.23: Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO a une concentration égale 0.5

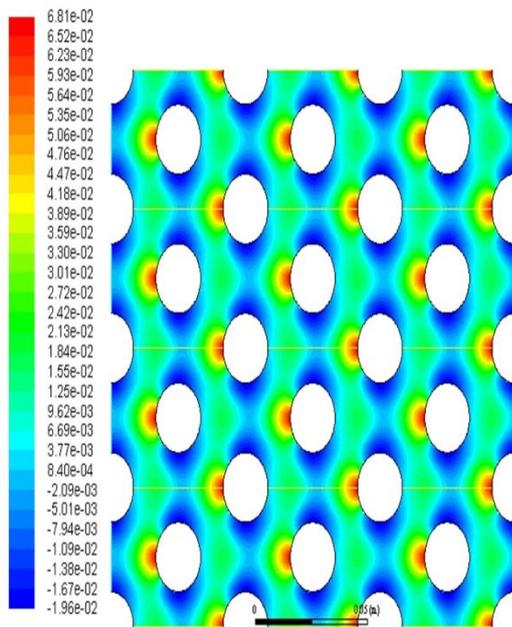


Figure IV.24: Contour de la pression dans le faisceau de L'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.5

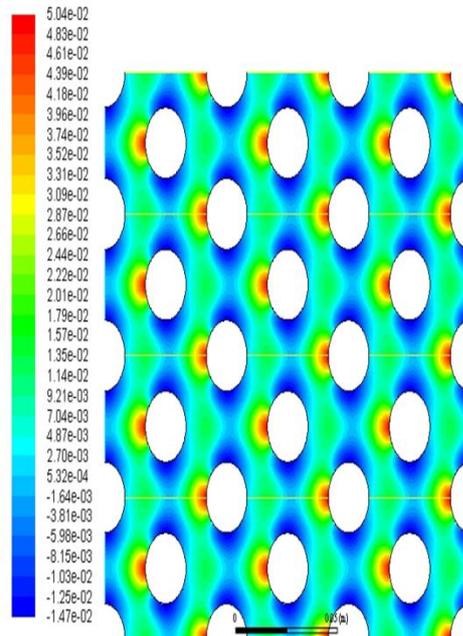


Figure IV.25: Contour de la pression dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a une concentration égale 0.5

Les figures (IV.22— IV.25) représentent les contours de la pression dans le faisceau de l'échangeur pour quatre matériaux sont aluminium, le cuivre. Oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration

Nous remarquons dans les contours lorsque la concentration augmente de 0,3 jusqu'à 0,5 que la pression à l'entrée d'un faisceau de tubes pour les quatre matériau aluminium, l'oxyde de l'aluminium, le cuivre et l'oxyde de cuivre est supérieure à la pression de sortie, car l'écoulement est chaud à l'entrée des tubes, et après avoir circulé autour des tubes il est refroidi, ce qui explique la chute de pression à la sortie d'un faisceau des tubes

### Le contour de la pression

a)0.025 b) 0.05 c)0.075 d) 0.1 e)0.3 f) 0.5

Après avoir effectué 6 différentes concentrations dans la simulation pour chaque choix soit représentée dans les contours nous avons 24 contours et elles sont représentées dans les figures précédente, nous remarquons que la pression à l'entrée d'un faisceau de tubes est supérieure à la pression de sortie, car l'écoulement est chaud à l'entrée des tubes, et après avoir circulé autour des tubes il est refroidi, ce qui explique la chute de pression à la sortie d'un faisceau des tubes

### IV. 3.2-La vitesse :

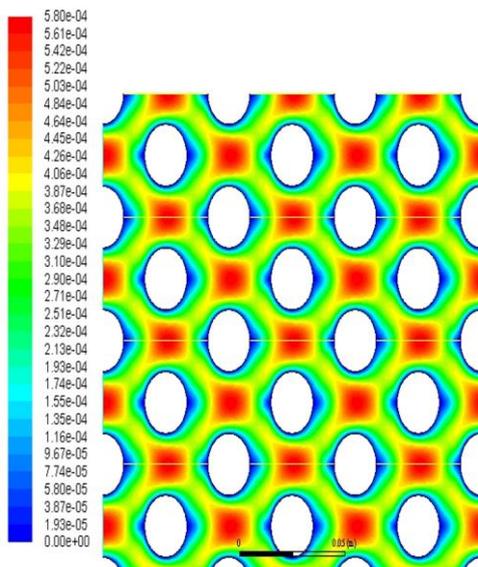


Figure IV.26: Contour de la vitesse dans le faisceau de

L'échangeur pour le cuivre Cu

a une concentration égale 0.025

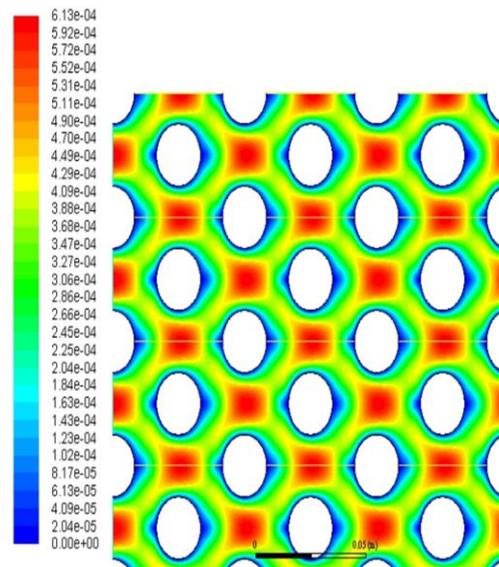


Figure IV.27: Contour de la vitesse dans les faisceaux

de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO

a une concentration égale 0.025

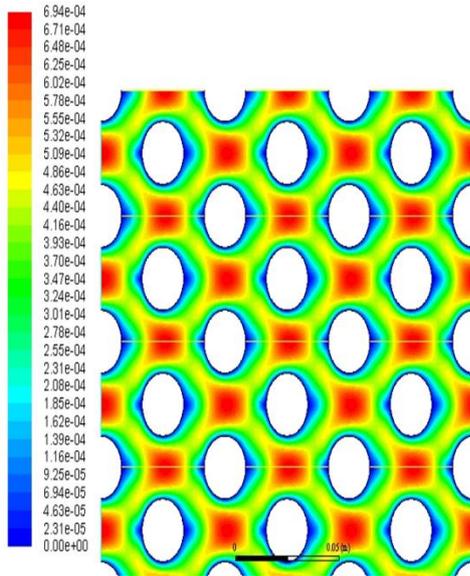


Figure IV.28: Contour de la vitesse dans le faisceau de L'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.025

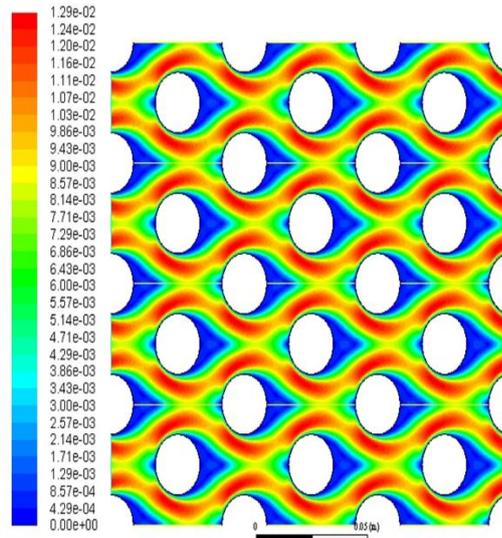


Figure IV.29: Contour de la vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$  a une concentration égale 0.025

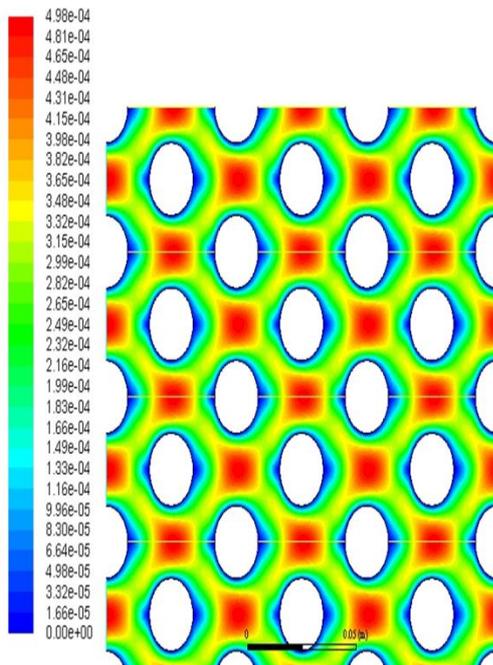


Figure IV.30: Contour de la vitesse dans le faisceau de L'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.05

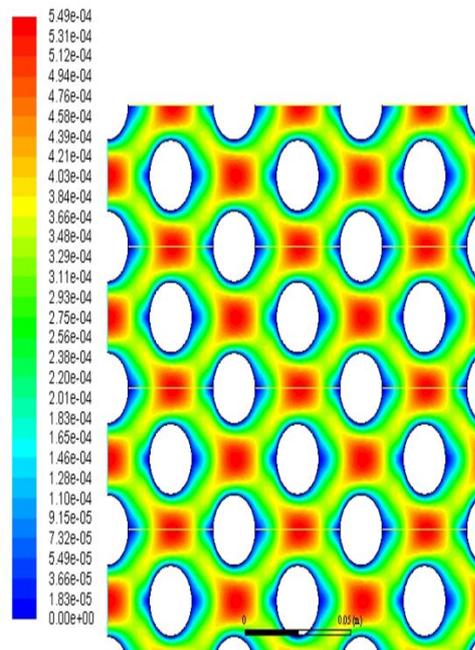


Figure IV.31: Contour de la vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre  $CuO$  a une concentration égale 0.05

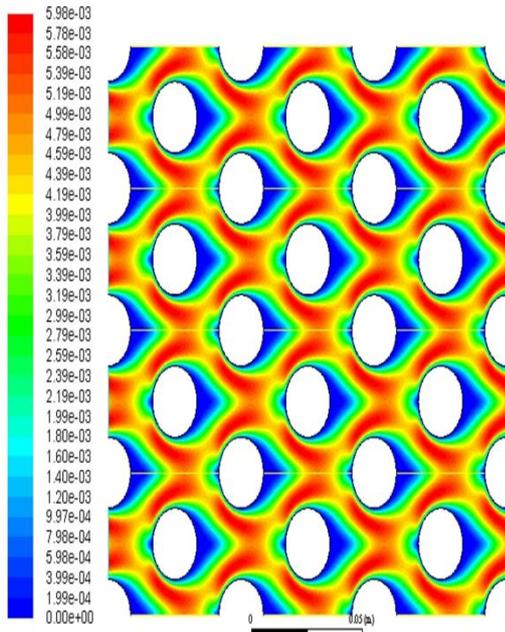


Figure IV.32: Contour de la vitesse dans le faisceau de

L'échangeur pour l'aluminium Al

a une concentration égale 0.05

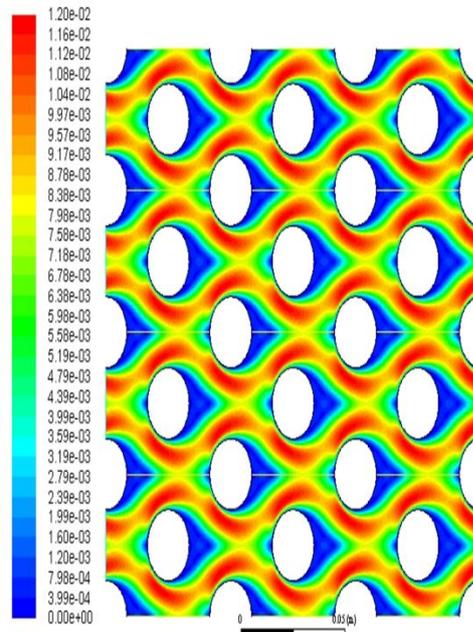


Figure IV.33: Contour de la vitesse dans les faisceaux

de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$

a une concentration égale 0.05

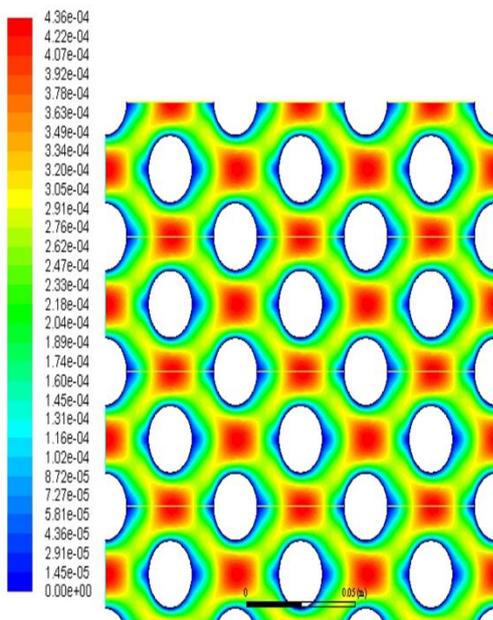


Figure IV.34: Contour de la vitesse dans le faisceau de

L'échangeur pour le cuivre Cu

a une concentration égale 0.075

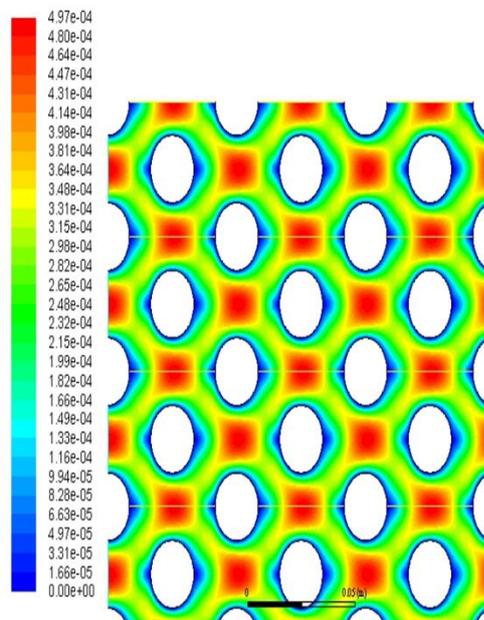


Figure IV.35: Contour de la vitesse dans les faisceaux

de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO

a une concentration égale 0.075

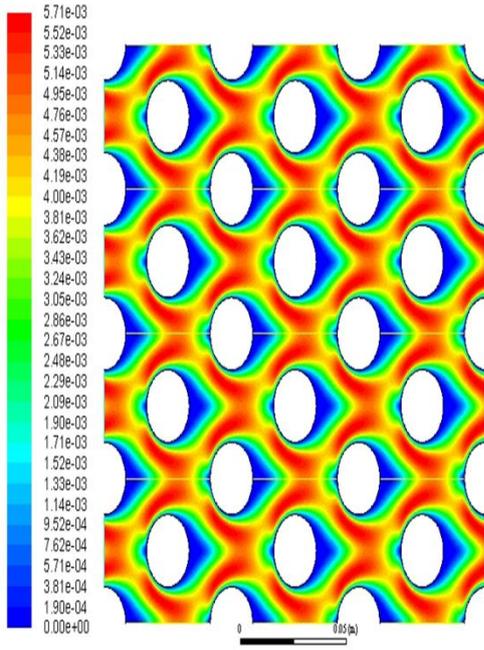


Figure IV.36: Contour de la vitesse dans le faisceau de L'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.075

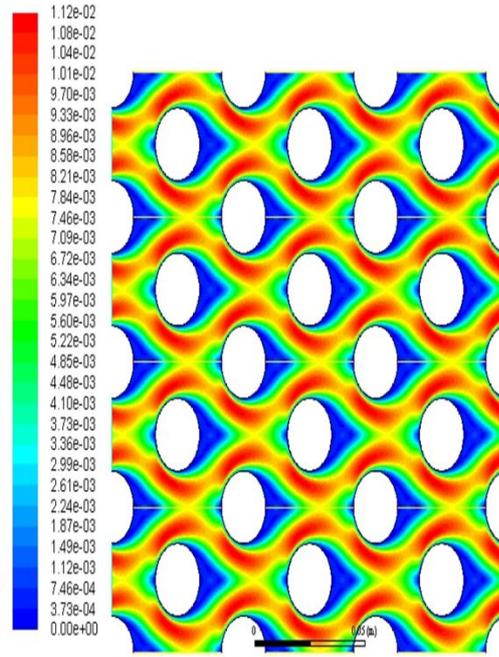


Figure IV.37: Contour de la vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$  a une concentration égale 0.075

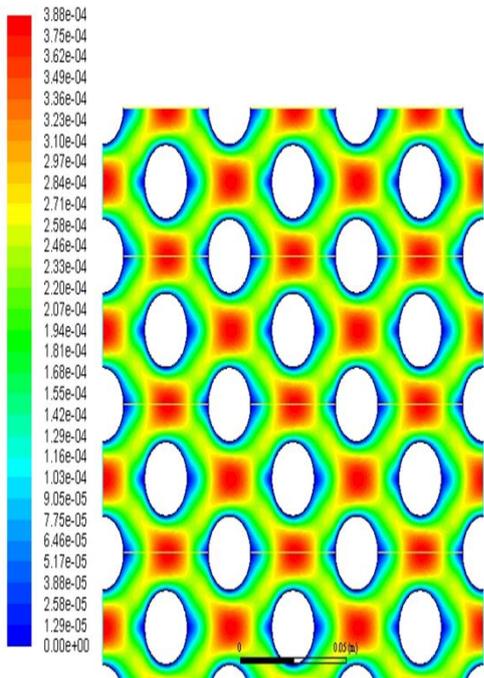


Figure IV.38: Contour de la vitesse dans le faisceau de L'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.1

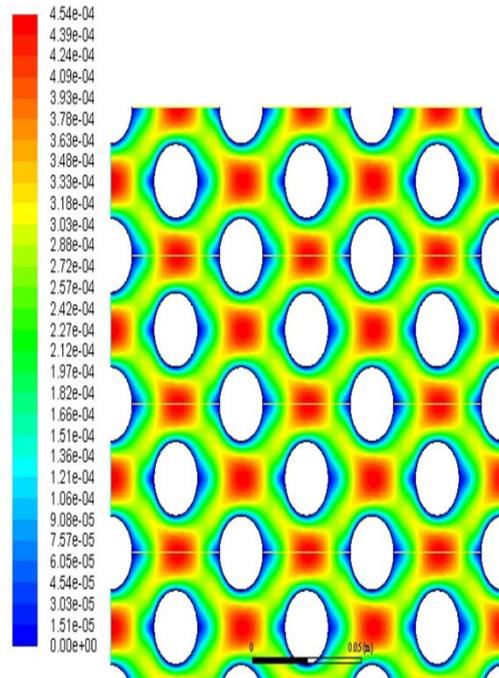


Figure IV.39: Contour de la vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre  $CuO$  a une concentration égale 0.1

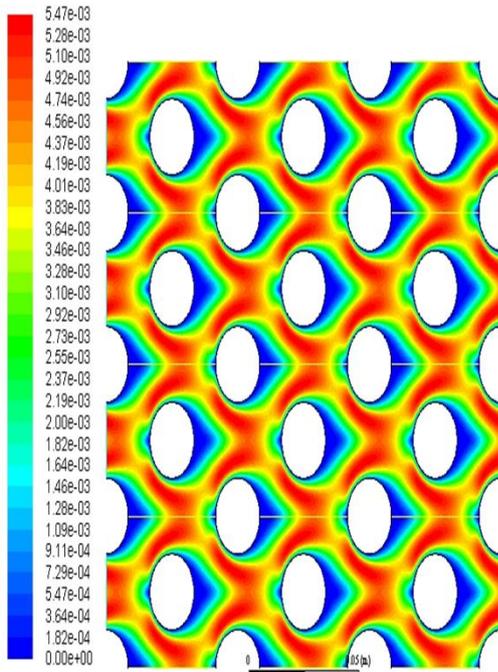


Figure IV.40: Contour de la vitesse dans le faisceau de

L'échangeur pour l'aluminium Al

a une concentration égale 0.1

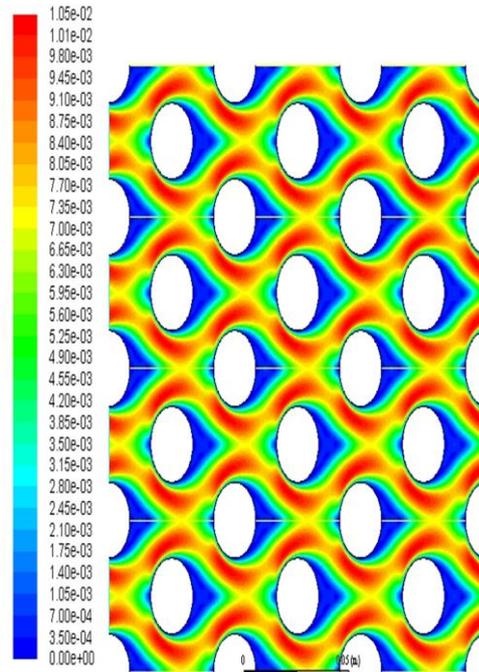


Figure IV.41: Contour de la vitesse dans les faisceaux

de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$

a une concentration égale 0.1

Les figures (IV.26 — IV.41) représentent les contours de la vitesse dans le faisceau de l'échangeur pour quatre matériaux sont aluminium, le cuivre, oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration

Nous remarquons dans les contours lorsque la concentration augmente de 0,025 jusqu'à 0,1 que la vitesse de l'écoulement qui contient les nano fluide suivante : le cuivre, l'oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium diminue progressivement par contre la vitesse de l'écoulement qui contient l'aluminium augmente rapidement.

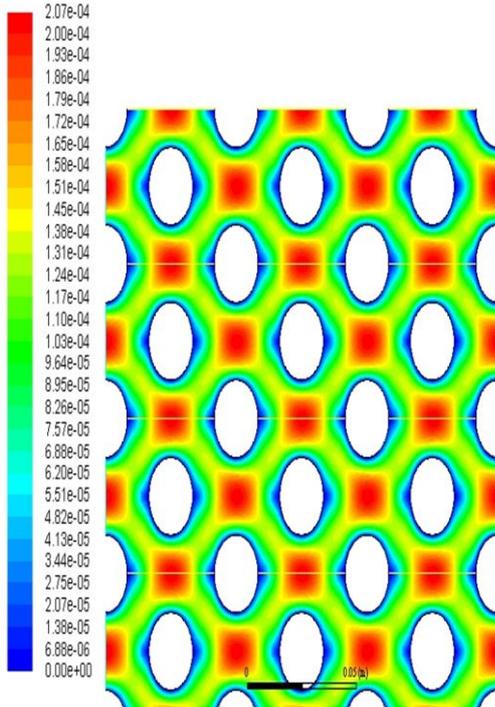


Figure IV.42: Contour de la vitesse dans le faisceau de L'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.3

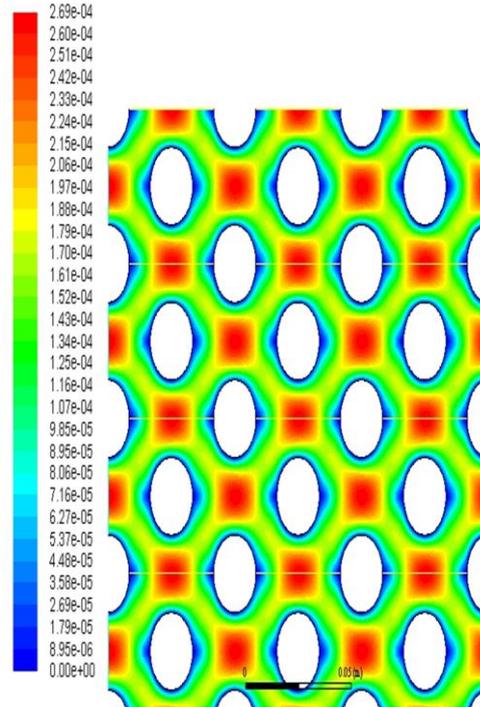


Figure IV.43: Contour de la vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO a une concentration égale 0.3

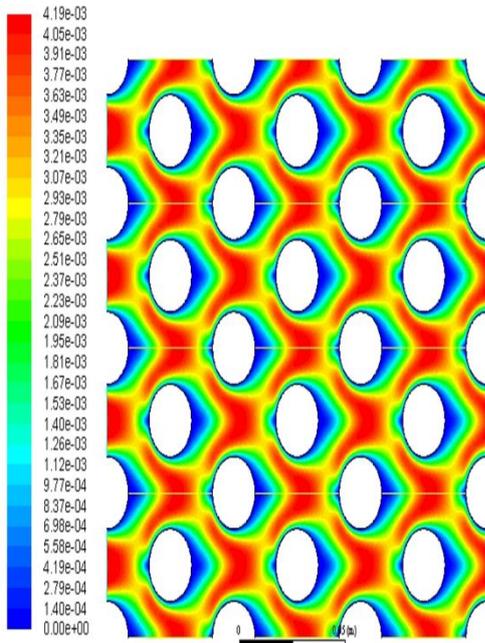


Figure IV.44: Contour de la vitesse dans le faisceau de L'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.3

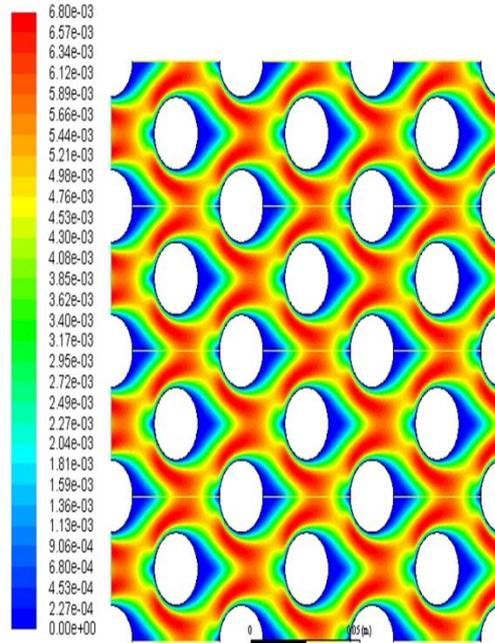


Figure IV.45: Contour de la vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a une concentration égale 0.3

Les figures (IV.42.— IV.45) représentent les contours de la vitesse dans le faisceau de l'échangeur pour quatre matériaux sont aluminium, le cuivre. Oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration

Nous remarquons dans les contours lorsque la concentration augmente de 0,1 jusqu'à 0,3 que la vitesse de l'écoulement qui contient les nano fluide aluminium, le cuivre, l'oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium diminue progressivement en fonction d'augmentation de concentration

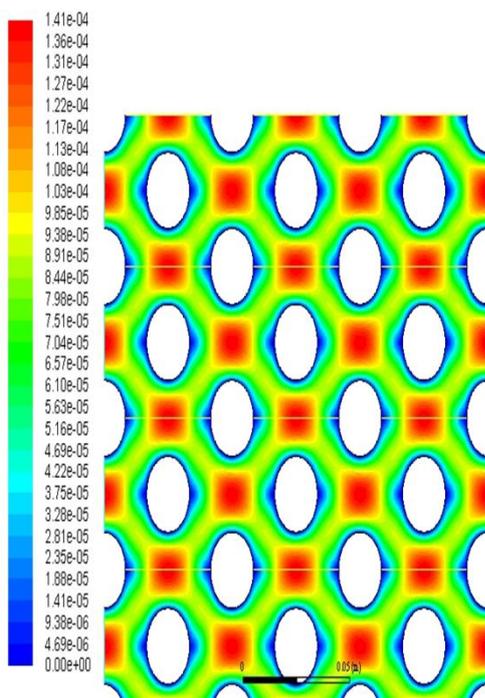


Figure IV.46: Contour de la vitesse dans le faisceau de L'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.3

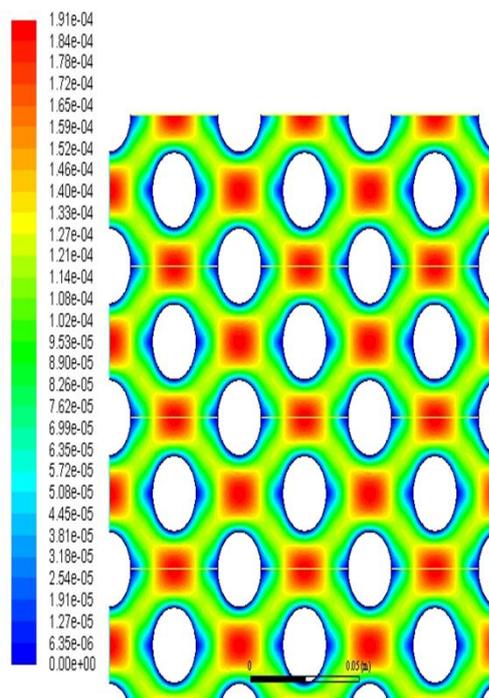


Figure IV.47: Contour de la vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO a une concentration égale 0.3

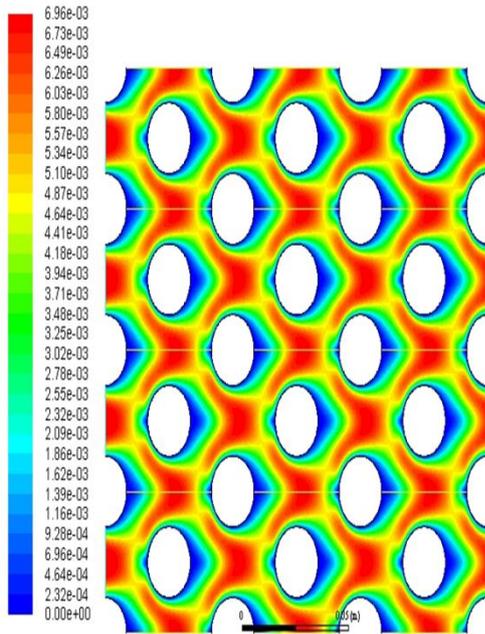


Figure IV.48: Contour de la vitesse dans le faisceau de l'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.5

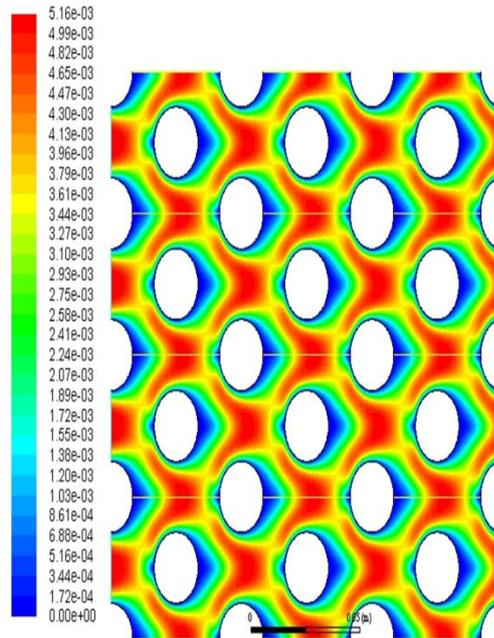


Figure IV.49: Contour de la vitesse dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$  a une concentration égale 0.5

Les figures (IV.45 — IV.49) représentent les contours de la vitesse dans le faisceau de l'échangeur pour quatre matériaux sont aluminium, le cuivre. Oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration

Nous remarquons dans les contours lorsque la concentration augmente de 0,3 jusqu'à 0,5 que la vitesse de l'écoulement qui contient les nano fluide le cuivre et l'oxyde de cuivre diminue progressivement par rapport a l'augmentation concentration et la vitesse de l'oxyde de l'aluminium diminue progressivement par contre l'aluminium augmente progressivement

### Contour de La vitesse :

a) 0.025 b) 0.05 c) 0.05 d) 0.075 e) 0.1 f) 0.3 g) 0.5

les contours de la vitesse nous donnera une idée de l'écoulement pour le travail, nous avons 6 modes différent de concentration et (4matériau) sont Aluminium , l'oxyde de l'aluminium ,le Cuivre, l'oxyde de cuivre la structure de l'écoulement est indiqué sur les

figures, nous notons à partir des résultats numériques que les valeurs de la vitesse de l'écoulement du Cu, diminue progressivement par contre elle augmente progressivement dans l'oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$ , avec montée rapide de la vitesse de l'oxyde de cuivre CUO et diminution rapide de la vitesse de d'aluminium Al et revenir à sa hauteur, la cause de ses différent résulta et le fort et le faible gradient de friction.

**IV. 3.3- La température :**

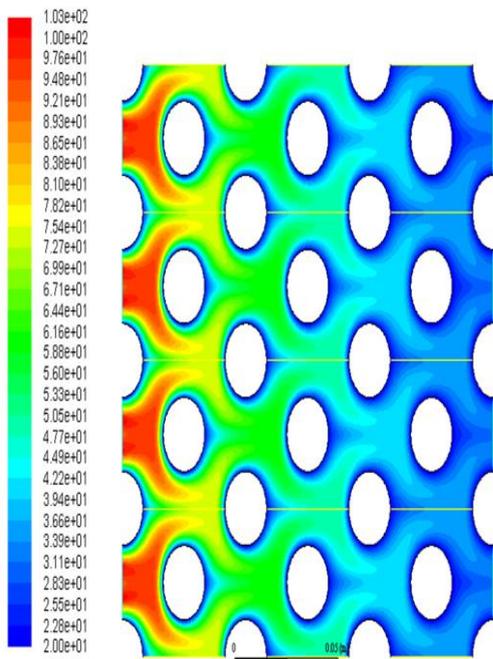


Figure IV.50: Contour de la température dans le faisceau de L'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.025

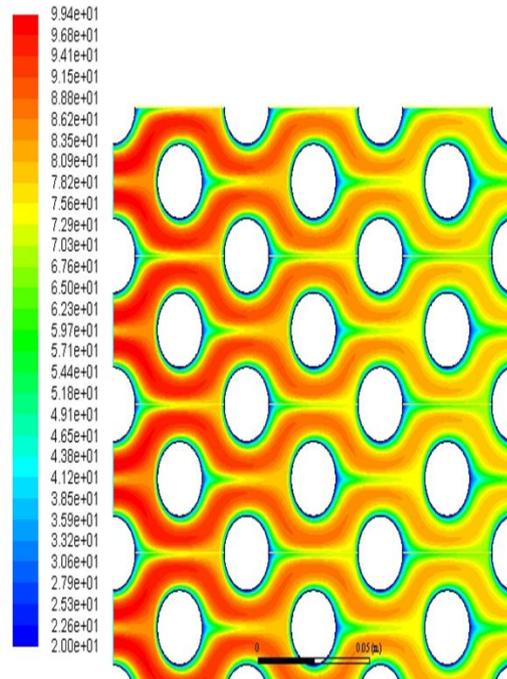


Figure IV.51: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO a une concentration égale 0.025

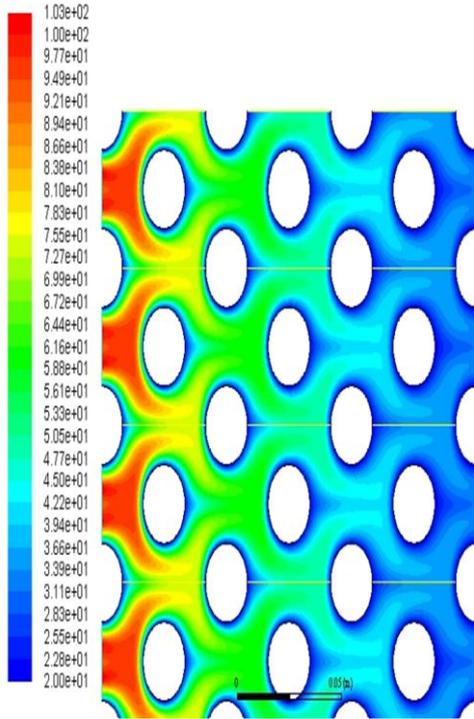


Figure IV.52: Contour de la température dans le faisceau de L'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.025

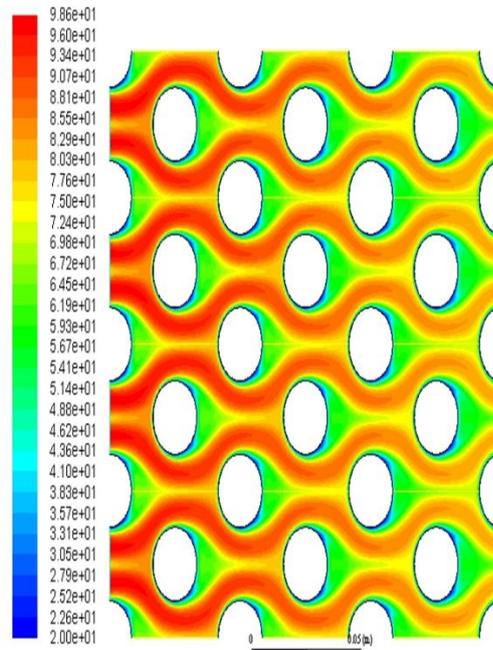


Figure IV.53: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$  a une concentration égale 0.025

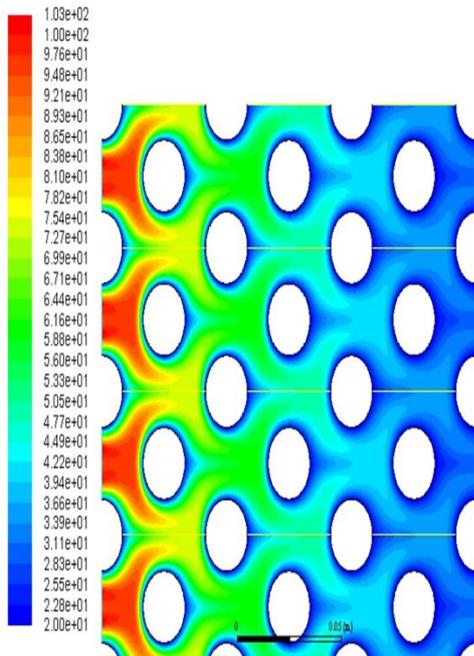


Figure IV.54: Contour de la température dans le faisceau de L'échangeur pour le cuivre Cu a une concentration égale 0.05

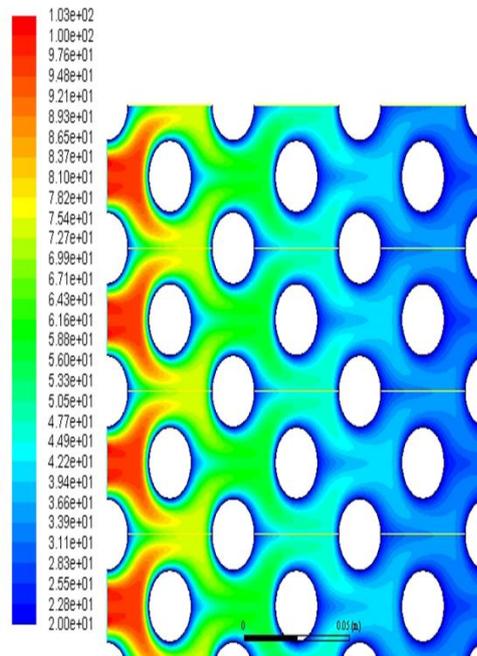


Figure IV.55: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre  $CuO$  a une concentration égale 0.05

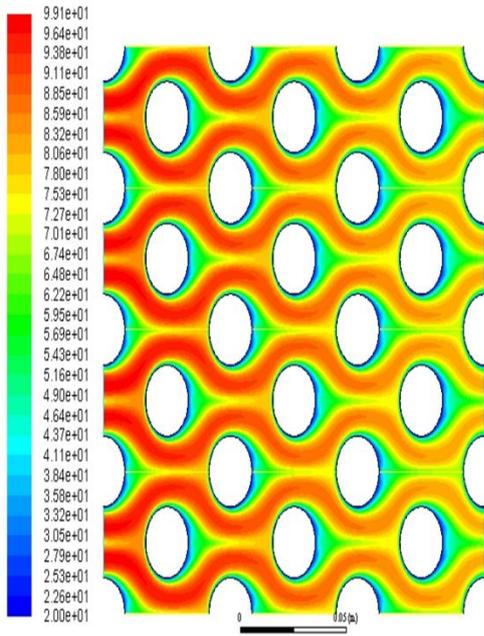


Figure IV.56: Contour de la température dans le faisceau de l'échangeur pour l'aluminium Al à une concentration égale 0.05

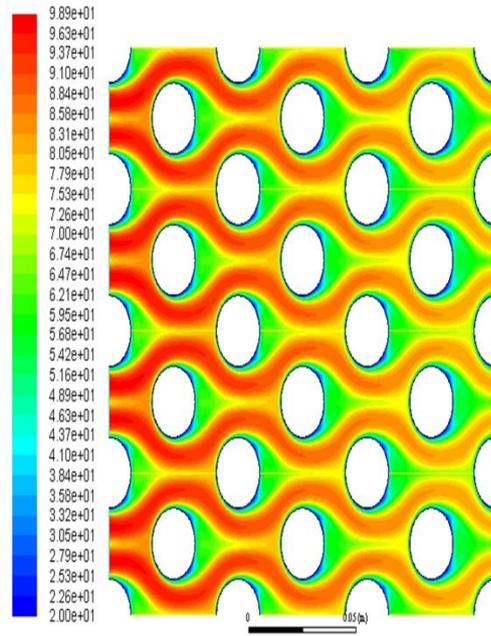


Figure IV.57: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$  à une concentration égale 0.05

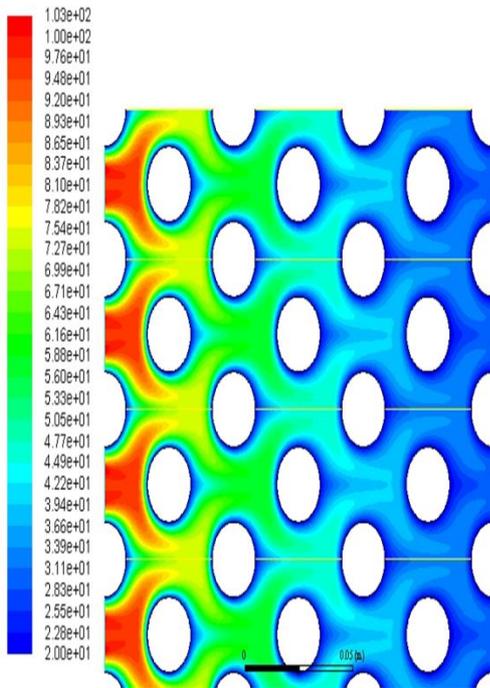


Figure IV.58: Contour de la température dans le faisceau de l'échangeur pour le cuivre Cu à une concentration égale 0.075

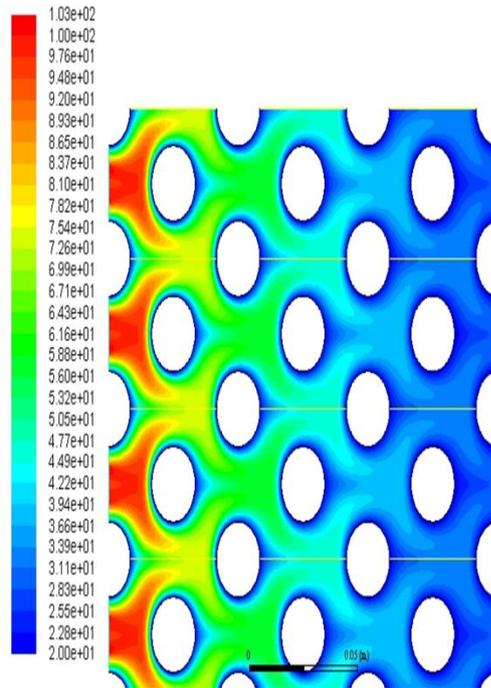


Figure IV.59: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO à une concentration égale 0.075

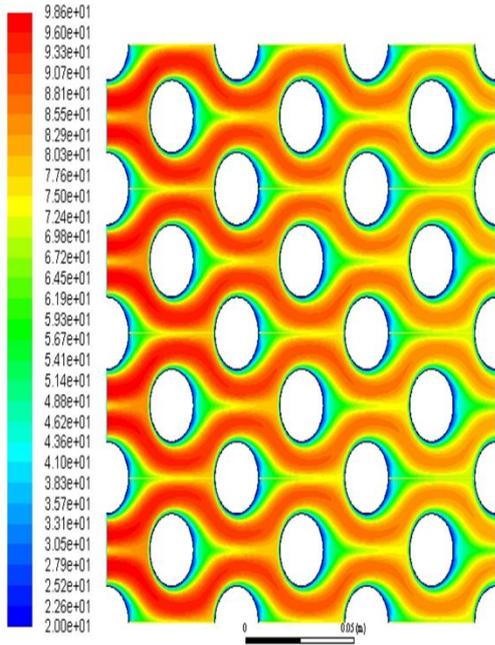


Figure IV.60: Contour de la température dans le faisceau de L'échangeur pour l'aluminium Al à une concentration égale 0.075

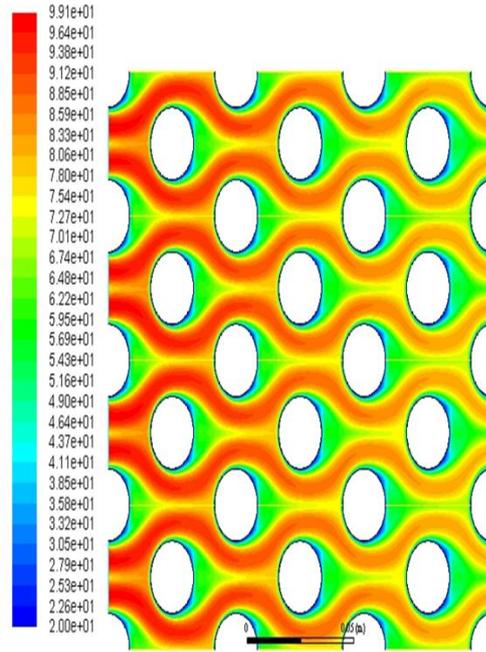


Figure IV.61: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$  à une concentration égale 0.075

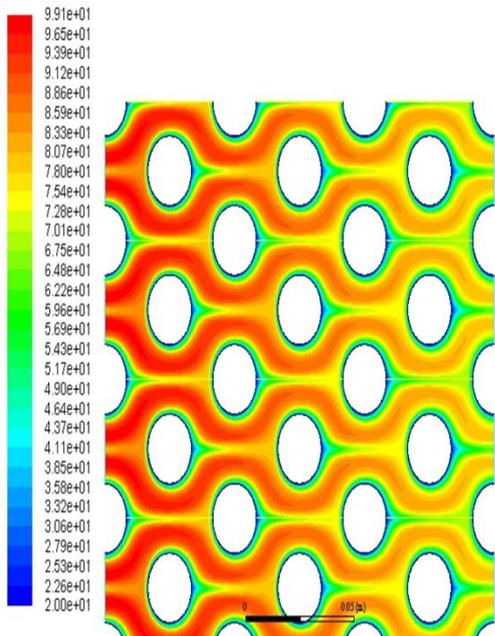


Figure IV.62: Contour de la température dans le faisceau de L'échangeur pour le cuivre Cu à une concentration égale 0.1

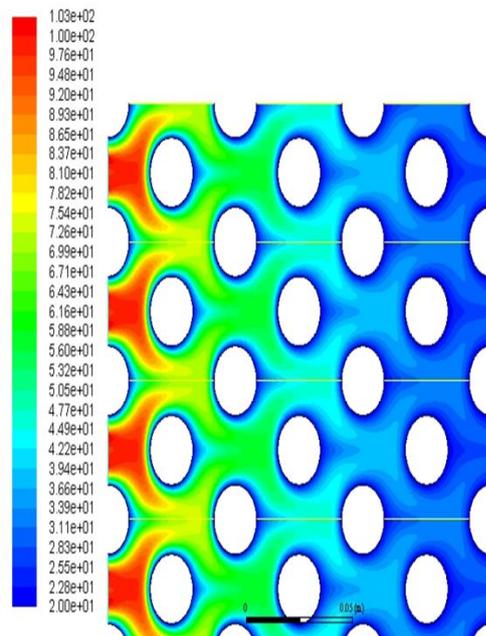


Figure IV.63: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre  $CuO$  à une concentration égale 0.1

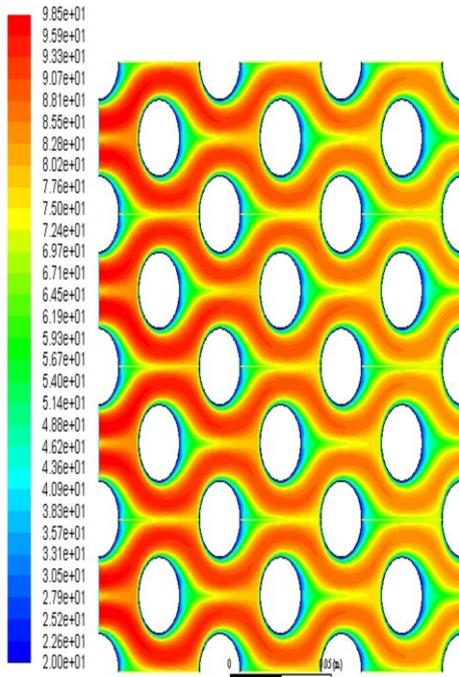


Figure IV.64: Contour de la température dans le faisceau de L'échangeur pour l'aluminium Al a une concentration égale 0.1

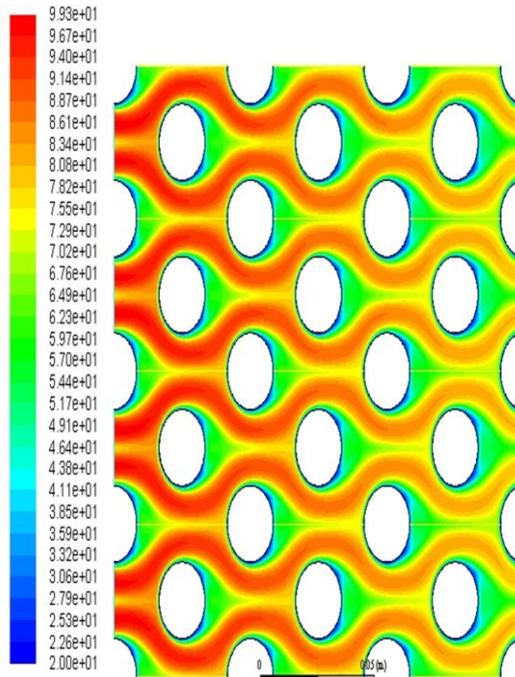


Figure IV.65: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$  a une concentration égale 0.1

Les figures (IV.50 — IV.65) représentent les contours de la température statique dans le faisceau de l'échangeur pour quatre matériaux sont aluminium, le cuivre. Oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration

Nous remarquons dans les contours lorsque la concentration augmente de 0,025 jusqu'à 0,1 que la température de l'écoulement qui contient le nano fluide le cuivre, l'aluminium et l'oxyde de l'aluminium augmente progressivement par contre la température de l'oxyde de l'aluminium diminue en fonction d'augmentation de concentration

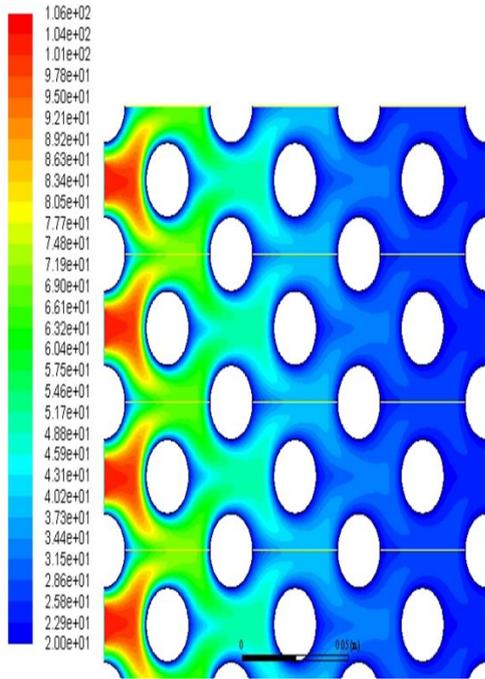


Figure IV.66: Contour de la température dans le faisceau de l'échangeur pour le cuivre Cu à une concentration égale 0.3

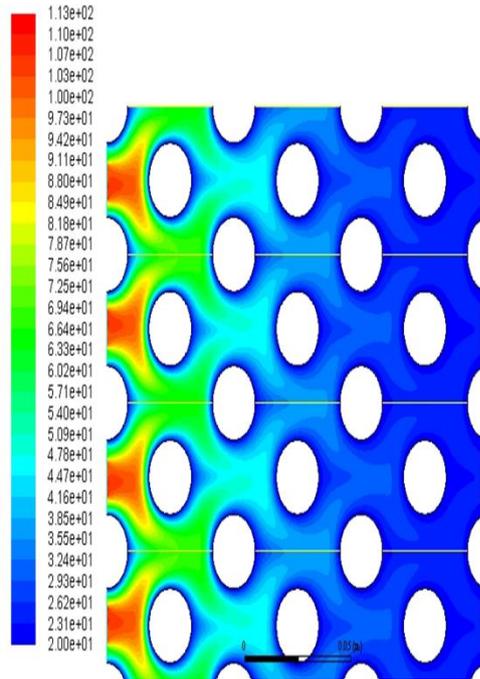


Figure IV.67: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO à une concentration égale 0.3

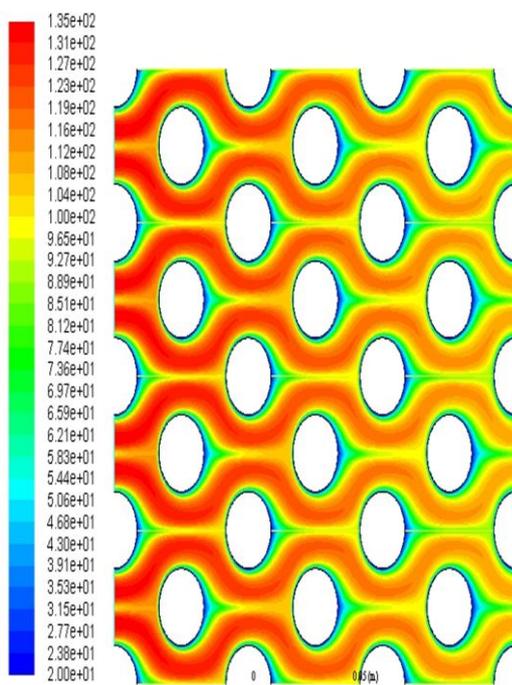


Figure IV.68: Contour de la température dans le faisceau de l'échangeur pour l'aluminium Al à une concentration égale 0.3

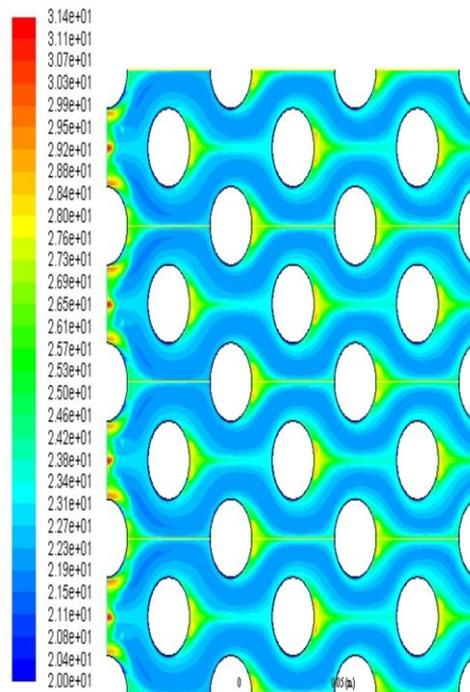


Figure IV.69: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$  à une concentration égale 0.3

Les figures (IV.66— IV.69) représentent les contours de la température statique dans le faisceau de l'échangeur pour quatre matériaux sont aluminium, le cuivre. Oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration

Nous remarquons dans les contours lorsque la concentration augmente de 0,1 jusqu'à 0,3 que la température de l'écoulement qui contient le nano fluide l'aluminium et l'oxyde de l'aluminium diminue progressivement par contre la température de l'oxyde de cuivre et le cuivre augmente en fonction d'augmentation de concentration

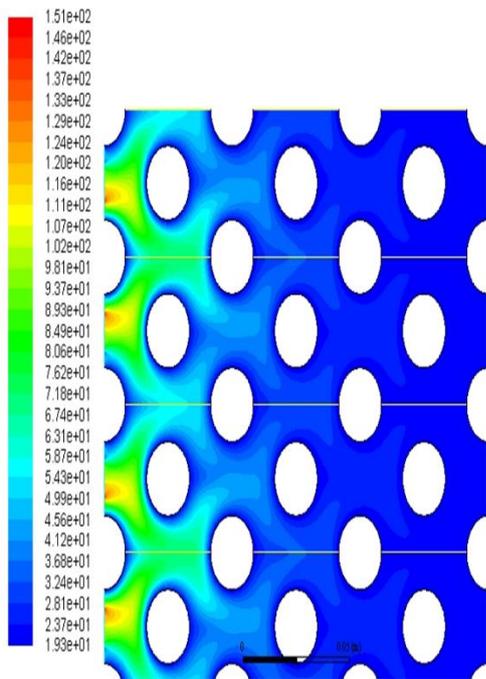


Figure IV.70: Contour de la température dans le faisceau de

L'échangeur pour le cuivre Cu

a une concentration égale 0.5

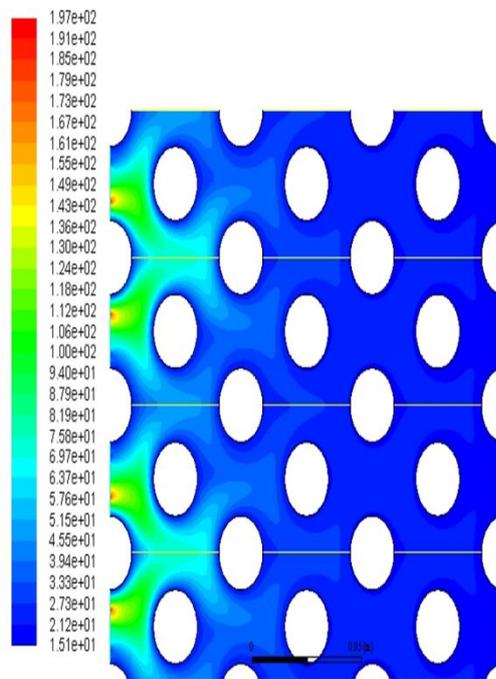


Figure IV.71: Contour de la température dans les faisceaux

de l'échangeur pour l'oxyde du cuivre CuO

a une concentration égale 0.5

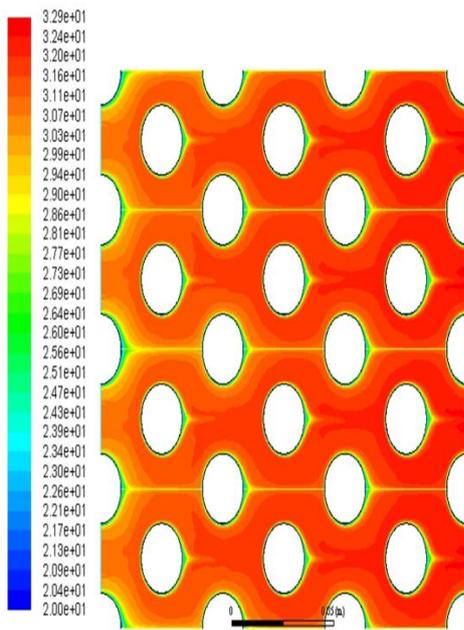


Figure IV.72: Contour de la température dans le faisceau de l'échangeur pour l'aluminium Al à une concentration égale 0.5

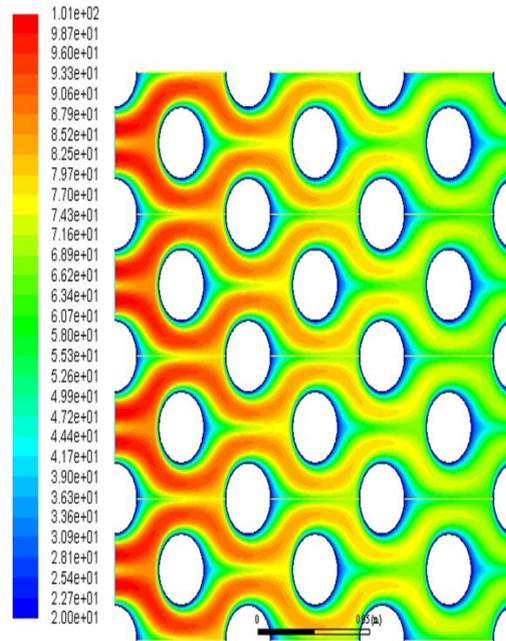


Figure IV.73: Contour de la température dans les faisceaux de l'échangeur pour l'oxyde de l'aluminium  $Al_2O_3$  à une concentration égale 0.5

Les figures (IV.70— IV.73) représentent les contours de la température statique dans le faisceau de l'échangeur pour quatre matériaux sont aluminium, le cuivre. Oxyde de cuivre et l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration

Nous remarquons dans les contours lorsque la concentration augmente de 0,3 jusqu'à 0,5 que la température de l'écoulement qui contient le nano fluide l'aluminium augmente rapidement le rencontrer une lente augmentation de température d'oxyde de l'aluminium par contre l'augmentation de la température statique de l'écoulement qui contient l'oxyde de cuivre et le cuivre presque négligeable en fonction d'augmentation de concentration et avec cela nous disons qu'il Ya une transfert de chaleur a travers la connexion entre la paroi externe et interne la différence de température dépend du mode de transfert de chaleur et du mode de contact

Contour de la température :

a)0.025 b) 0.05 c)0.075 d) 0.1 e)0.3 f) 0.5

Après avoir effectué 6 différents concentrations dans la simulation pour chaque choix soit représentée dans le contour nous avons 24 contours et elles sont représentées dans les figures

ci-dessus, nous remarquons qu'il y a une augmentation dans la température de l'écoulement de Aluminium et le Cuivre après le Al elle va diminuer progressivement et lentement mais le Cu diminue rapidement, compensée par une baisse de température de l'écoulement  $Al_2O_3$ , la température de CUO diminue progressivement et avec cela nous disons qu'il y a un transfert de chaleur à travers la connexion entre la paroi externe et interne la différence de température dépend du mode de transfert de chaleur et du mode de contact.

Dans les tableaux suivants : on a les valeurs de la température de sortie, la vitesse maximale, la pression, le flux de chaleur, coefficient de transfert de chaleur et nombre de Nusselt qui sont déterminées à la sortie du faisceau de tubes sont affichées dans les contours de sorte que nous faisons un clic droit sur la position de la sortie et nous avons sa concentration et quatre matériaux les valeurs que nous avons prises pour chaque contour à chaque itération nous avons fait un changement dans les valeurs de concentration.

Tableau IV.1 : la température de sortie, la vitesse maximale, coefficient de transfert de chaleur, nombre de Nusselt, le flux de chaleur de cuivre en fonction de concentration.

Cu	La température De sortie T2(K) *10	La vitesse maximale Vmax (m/s) *10 <sup>-4</sup>	Coefficient de transfert de chaleur *10	le nombre de Nusselt Nu	Flux de chaleur *10
<b>0.025</b>	3.25	5.8	8.03	124	71.8
<b>0.05</b>	3.25	4.98	8.50	122	76
<b>0.075</b>	2.97	4.36	8.96	120	80.1
<b>0.1</b>	7.94	3.36	1.88	237	16.8
<b>0.3</b>	2.44	1.79	0.14	102	125
<b>0.5</b>	2.15	1.22	0.25	105	223

Tableau IV.2 : la température de sortie, la vitesse maximale, coefficient de transfert de chaleur, nombre de nusselt, le flux de chaleur de l'aluminium en fonction de concentration.

Al	La température De sortie T2(K) *10	La vitesse maximale V max (m/s) *10 <sup>-4</sup>	Coefficient de transfert de chaleur *10	le nombre de Nusselt Nu	Flux de chaleur *10
<b>0.025</b>	3.25	6.94	7.63	127	68.2
<b>0.05</b>	8.19	0.598	24.7	356	221
<b>0.075</b>	8.16	0.571	27.6	370	247
<b>0.1</b>	8.15	0.547	30.4	381	272
<b>0.3</b>	11	0.419	34.6	254	309
<b>0.5</b>	8.14	0.696	164	356	1470

Tableau IV.3 : la température de sortie, la vitesse maximale, coefficient de transfert de chaleur, nombre de nusselt, le flux de chaleur de l'oxyde de cuivre en fonction de concentration.

CuO	La température De sortie T2(K)*10	La vitesse maximale Vmax (m/s) *10 <sup>-4</sup>	Coefficient de transfert de chaleur *10	le nombre de Nusselt Nu	Flux de chaleur *10
<b>0.025</b>	7.95	6.41	1.53	237	13.6
<b>0.05</b>	2.97	5.49	8.41	122	75.2
<b>0.075</b>	2.97	4.97	8.82	119	78.9
<b>0.1</b>	2.97	3.93	8.94	116	82.6
<b>0.3</b>	2.47	2.33	13.2	272	118
<b>0.5</b>	1.82	1.65	25.5	111	228

Tableau IV.4 : la température de sortie, la vitesse maximale, coefficient de transfert de chaleur, nombre de nusselt, le flux de chaleur de l'oxyde de l'aluminium en fonction de concentration.

A2L3	La température De sortie T2(K) *10	La vitesse maximale Vmax (m/s)*10 <sup>-4</sup>	Coefficient de transfert de chaleur 10	le nombre de Nusselt Nu	Flux de chaleur *10
0.025	8.16	0.0129	25.2	391	225
0.05	8.13	0.01202	26.2	380	235
0.075	8.15	0.012	27.4	371	245
0.1	7.45	0.0105	28.6	362	255
0.3	2.16	0.680	20.4	154	182
0.5	6.57	0.516	53.2	238	476

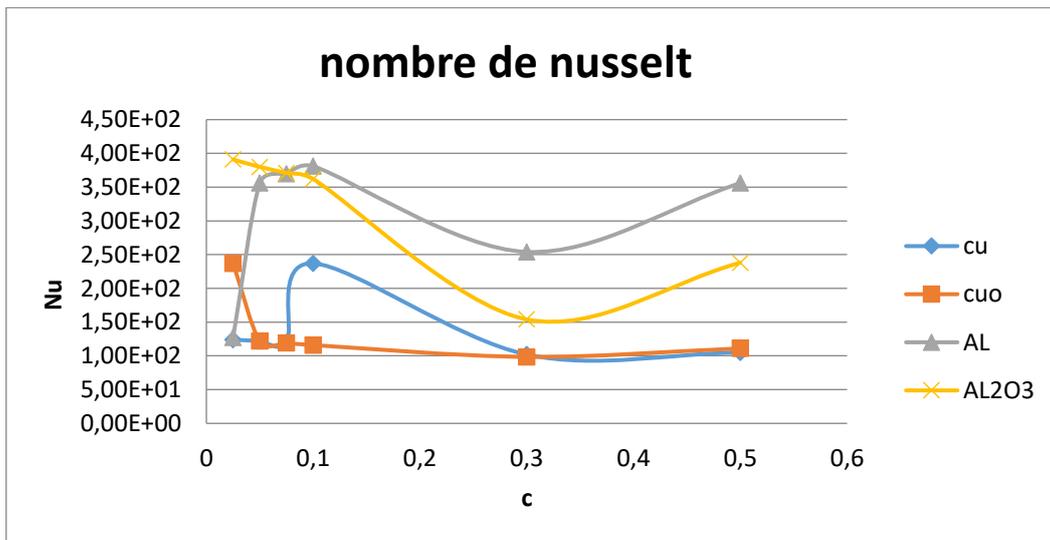


Figure IV.75 : nombre de nusselt en fonction de concentration

La figure IV.75 représente le nombre de nusselt en fonction de concentration nous remarquons sur la figure que le nombre de Nusselt augmente et diminue pour chaque matériau en fonction de l'augmentation des valeurs du concentration, et comme nous le savons que le nombre de nusselt cela traduit la qualité et L'échange de chaleur se traduit par une augmentation de ce nombre grande contribution de Flux sur un échange chauffé avec le mur.

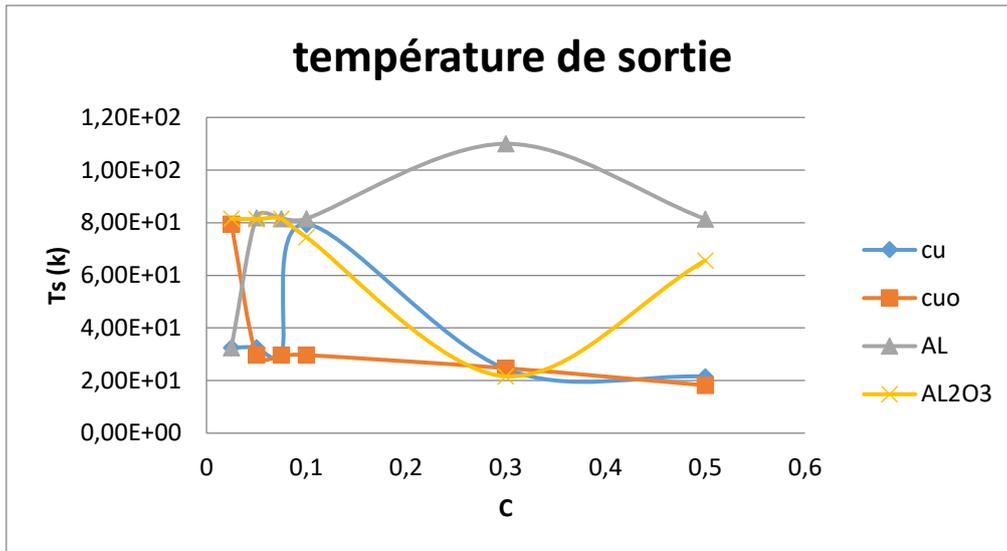


Figure IV.76 : température de sortie  $k$  en fonction de concentration

La figure IV.76 représente la température de sortie en fonction de concentration

Nous remarquons dans la figure précédente que la température de sortie de cuivre et l'aluminium augmente par rapport d'augmentation de concentrations par contre les oxyde de cuivre et l'aluminium sont entraînés de diminuer, on en déduit qu'il existe une relation positive

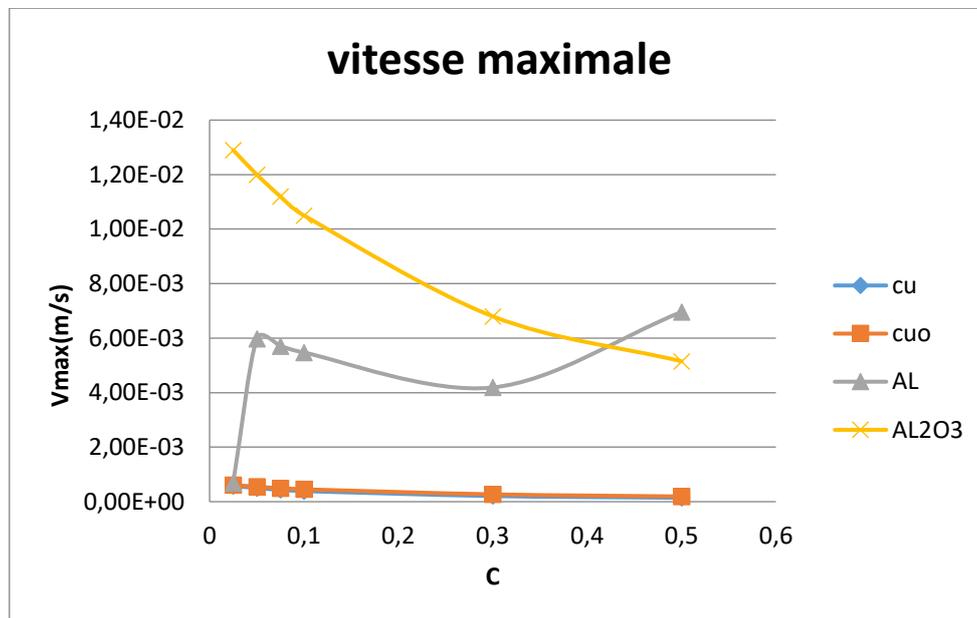


Figure IV.77 : la vitesse max  $m/s$  en fonction de concentration

La figure IV.77 représente la vitesse maximale en fonction de concentration nous remarquons dans le courbe qu'il y a une variation de vitesse pour chaque matériau. Le Cuivre est progressivement réduit et leur oxyde diminue rapidement après elle va augmenter et la

vitesse d'aluminium diminue après stabiliser et  $Al_2O_3$  augmente la cause de ses différent résulta et le fort et le faible gradient de friction.

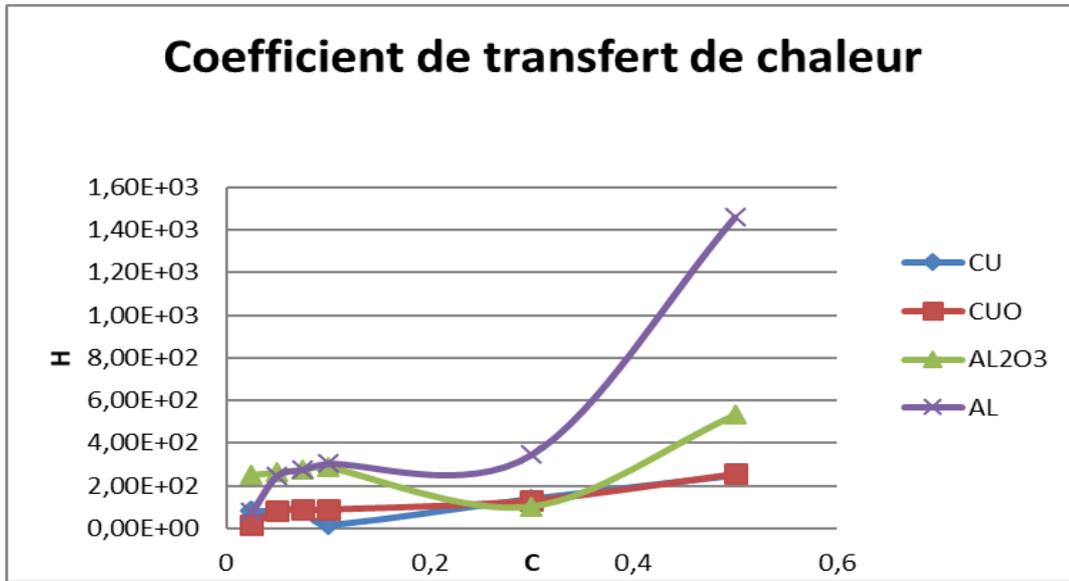


Figure IV.78 : Coefficient de transfert de chaleur  $w/m^2k$  en fonction de concentration

La figure IV.78 représente le coefficient de transfert de chaleur en fonction de concentration nous remarquons dans cette figure qu'il Ya une augmentation dans la variation de coefficient de transfert de chaleur tel que l'augmentation de coefficient de transfert de chaleur de l'aluminium est rapide par rapport à les autres matériaux en fonction de concentration, cette augmentation revenue à la variation de température.

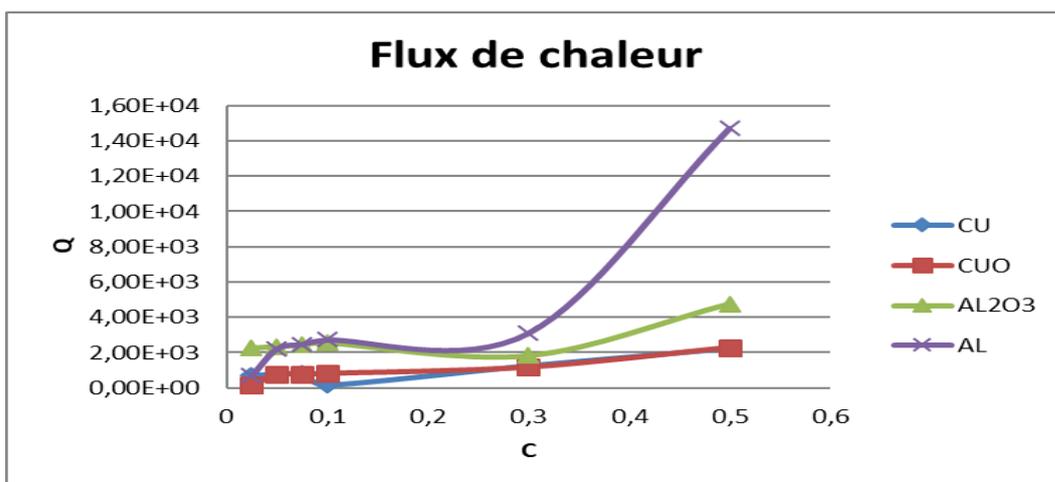


Figure IV.79 : Flux de chaleur  $w$  en fonction de concentration

La figure IV.79 représente le flux de chaleur en fonction de concentration nous remarquons dans la figure précédent qu'il y a une augmentation dans la variation de flux de chaleur en fonction de concentration pour chaque matériau. En voit que le flux de chaleur de l'aluminium augmente plus rapide par rapport à son oxyde et le flux de chaleur de l'oxyde de cuivre augmente légèrement mais plus rapide par rapport au cuivre.

## **Conclusion :**

Dans ce mémoire, on a présente une simulation numérique sur l'écoulement et le transfert de chaleur dans un faisceau d'un échangeur thermique. Pour les nano fluides utilisés dans cette étude nous avons considéré quatre différentes nano particules le Cuivre (Cu) et l'aluminium (Al). Oxyde de l'aluminium ( $Al_2O_3$ ), oxyde de cuivre (CUO) dans un fluide de base, comme l'eau. L'effet de certains paramètres tels que, le type des nanoparticules et la fraction volumique en nanoparticules, sur le champ dynamique et le transfert de chaleur a été étudié. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- Ajout de nano particules permet d'améliorer le transfert thermique.
- Dans la construction des échangeurs de chaleur, il faut choisir une géométrie qui donne un bon échange thermique et une minimum perte de charge.
- Le flux thermique et la chute de pression augmentent avec l'augmentation du nombre de rangées de tubes. Cependant, le transfert de chaleur devient presque constant lorsque le nombre de rangs est supérieur à cinq.

## LES RÉFÉRENCES :

- [1] CARLSLAW H.S. et JAEGER J.C., *Conduction of Heat in Solid*, 2e édition, Clarendon Press (1959)
- [2] CHAPMAN A., *Heat Transfer*, 3e édition, Collier Mc Millan Int. Édition (1974)
- CRABOL J., *Transfert de chaleur*, Masson (1989)
- [3] DE VRIENDT A.B., *La Transmission de la chaleur*, Gaetan Morin Éditeur (1984)
- GOSSE J., *Guide de Thermique*, Dunod (1981)
- [4] GRIGULL U. et Sandner H., *Heat Conduction*, Springer Verlag (1984)
- [5] INCROPERA F.P., DEWITT D.P., BERGMAN T.L., LAVINE A., *Introduction to Heat Transfer*, 5e édition révisée John Wiley & Sons Inc (2006).
- [6] LUIKOV, *Analytical Heat Diffusion Theory*, Academic Press (1968)
- [7] MARTINET J., *Éléments de thermocinétique*, Lavoisier (1989)
- [8] MORAN M.J., SHAPIRO H.N., MUNSON B.R., DEWITT D.P., *Introduction to Thermal*
- [9] *Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*, John Wiley & Sons Inc (2003) OUIN J., *Transferts thermiques*, Éducalivre Éditions Casteilla (1998)
- [10] OZISICK N., *Heat Conduction*, Wiley Interscience (1980) TAINÉ J., IACONA E. et PETIT J.-P.,
- [11] *Transferts thermiques : introduction aux transferts d'énergie*, Dunod (2008)
- [12] Lin, "Copper-oxide brake nanofluid manufactured using arcsubmerged nanoparticle synthesis system," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 434-435, pp. 672–674, 2007.
- [13] W. Yu, D. M. France, J. L. Routbort, and S. U. S. Choi, "Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements," *Heat Transfer Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 432–460, 2008.
- [14] S.M. S.Murshed, S.-H. Tan, and N.-T. Nguyen, "Temperature dependence of interfacial properties and viscosity of nanofluids for droplet-based microfluidics," *Journal of Physics D*, vol. 41, no. 8, Article ID 085502, 5 pages, 2008.
- [15] J. Routbort, et al., Argonne National Lab, Michellin North America, St. Gobain Corp., 2009, [.gov/industry/nanomanufacturing/pdfs/nanofluids industrial cooling.pdf](http://www.osti.gov/industry/nanomanufacturing/pdfs/nanofluids_industrial_cooling.pdf).
- [16] Z. H. Han, F. Y. Cao, and B. Yang, "Synthesis and thermal characterization of phase-changeable indium/polyalphaolefin nanofluids," *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 24, Article ID 243104, 3 pages, 2008.
- [17] G. Donzelli, R. Cerbino, and A. Vailati, "Bistable heat transfer in a nanofluid," *Physical Review Letters*, vol. 102, no. 10, Article ID 104503, 4 pages, 2009.

- [18] S. J. Kim, I. C. Bang, J. Buongiorno, and L. W. Hu, "Study of pool boiling and critical heat flux enhancement in nanofluids," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences—Technical Sciences*, vol. 55, no. 2, pp. 211–216, 2007.
- [19] S. J. Kim, I. C. Bang, J. Buongiorno, and L. W. Hu, "Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 19-20, pp. 4105–4116, 2007.
- [20] J. Buongiorno, L.-W. Hu, S. J. Kim, R. Hannink, B. Truong, and E. Forrest, "Nanofluids for enhanced economics and safety of nuclear reactors: an evaluation of the potential features issues, and research gaps," *Nuclear Technology*, vol. 162, no. 1, pp. 80–91, 2008.
- [21] J. Buongiorno, L. W. Hu, G. Apostolakis, R. Hannink, T. Lucas, and A. Chupin, "A feasibility assessment of the use of nanofluids to enhance the in-vessel retention capability in light-water reactors," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 239, no. 5, pp. 941–948, 2009.
- [22] "The Future of Geothermal Energy," MIT, Cambridge, Mass, USA, 2007.A
- [23] M. Chopkar, P. K. Das, and I. Manna, "Synthesis and characterization of nanofluid for advanced heat transfer applications," *Scripta Materialia*, vol. 55, no. 6, pp. 549–552, 2006.
- [24] D. Singh, J. Toutbort, G. Chen, et al., "Heavy vehicle systems optimization merit review and peer evaluation," Annual Report, Argonne National Laboratory, 2006.
- [25] B. Shen, A. J. Shih, S. C. Tung, and M. Hunter, "Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding," *Tribology and Lubrication Technology*.
- [26] M. J. Kao, C.H. Lo, T. T. Tsung, Y. Y. Wu, C. S. Jwo, and H. M. Lin, "Copper-oxide brake nanofluid manufactured using arcsubmerged nanoparticle synthesis system," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 434-435, pp. 672–674, 2007.
- [27] M. J. Kao, H. Chang, Y. Y. Wu, T. T. Tsung, and H. M. Lin, "Producing aluminum-oxide brake nanofluids using plasma charging system," *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, vol. 28, no. 2, pp. 123–131, 2007.
- [28] H. B. Ma, C. Wilson, B. Borgmeyer, et al., "Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe," *Applied Physics Letters*, vol. 88, no. 14, Article ID 143116, 3 pages, 2006.
- [29] H. B. Ma, C. Wilson, Q. Yu, K. Park, U. S. Choi, and M. Tirumala, "An experimental investigation of heat transport capability in a nanofluid oscillating heat pipe," *Journal of Heat Transfer*, vol. 128, no. 11, pp. 1213–1216, 2006.
- [30] K. Sefiane, J. Skilling, and J. MacGillivray, "Contact line motion and dynamic wetting of nanofluid solutions," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 138, no. 2, pp. 101–120, 2008.
- [31] Y. H. Jeong, W. J. Chang, and S. H. Chang, "Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 11-12, pp. 3025–3031, 2008.

[32] YONG-GANG LEI, YA-LING HE, PAN CHU, RUI LI, « Design and optimization of Heat exchangers with helical baffles », Chemical Engineering Science 63, p (4386-4395), 2008. Gambit

[33] [www.fluentusers.com](http://www.fluentusers.com) . 2008, FLUENT 6.1 Documentation.