

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila  
Institut des Sciences et de Technologie  
Département Génie Mécanique & Electromécanique



No Ref : .....

## MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Analyse thermo énergétique de la convection  
thermique d'un écoulement des nanofluides  
dans des microcanaux

Présenté par :

- Rachid Benzerafa
- Hamza Chouia

Soutenu devant le jury :

Président	Salah SAOULI	Prof	Centre Universitaire Mila
Rapporteur	Ilhem ZEGHBID	MCA	Centre Universitaire Mila
Examineur	Amina DERDOURI	MAB	Centre Universitaire Mila

Année universitaire : 2021/2022

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*Mes parents :*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

*Tous ceux qui me sont chers Et tous qui vont lire ce mémoire.*

*Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce modeste.*



# *Remerciement*

D'abord et avant tout, nous remercions Allah qui nous a aidés à compléter ce mémoire.

Nous sommes très heureux d'avoir l'occasion de discuter le mémoire de master sous la direction et la supervision du **Dr. Ilhem Zeghid**, qui détermine d'abord ses très grands remerciements, et nous apprécions particulièrement ses encouragements, ses conseils et sa disponibilité pendant la réalisation de ce travail.

Nous remercions également **M. Salah SAOULI** et **Mlle. Amina DERDOURI** d'avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.

Nous remercions nos amis, nos collègues de l'institut des sciences et technologie ainsi que l'ensemble des enseignants et responsables.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à l'accomplissement de ce travail.

Merci beaucoup à tous.

# *Table de matières*

Dédicace .....	I
Remerciement.....	II
Table de matières .....	III
Liste des figures .....	VII
Liste des tableaux .....	X
Nomenclature .....	XI
Résumer .....	XIII
Introduction générale : .....	1

## *Chapitre I : Revue bibliographique*

I.1. Introduction : .....	3
I.2. Recherche bibliographique : .....	3
I.3. Conclusion : .....	12

## *Chapitre II : Généralités sur les nanofluides et le refroidissement des microcanaux*

II.1. Introduction : .....	13
II.2. Généralités sur la Nanotechnologie : .....	13
II.2.1. Définition d'un nanofluide : .....	13
II.2.2. Nanoparticules et les fluides porteurs : .....	14
• Les nanoparticules des oxydes métalliques : .....	14
• Les nanoparticules métalliques: .....	14
• Les nanoparticules non métalliques: .....	15
II.2.3. Préparation des nanofluides: .....	16
a. La méthode a une seule étape: .....	16
b. a méthode en deux étapes : .....	16
II.2.4. Les applications des nanofluides : .....	17
II.2.5. Caractéristiques thermo-physiques des nanofluides : .....	17
II.2.5.1. La Masse volumique $\rho$ : .....	18
II.2.5.2. La fraction volumique $\phi$ : .....	18
II.2.5.3. La conductivité thermique : .....	18
a. modèle de maxwell : .....	19
b. Modèle de Hamilton et Crosser : .....	19
c. Modèle de Yu et Choi : .....	19

d. Modèle de Bruggemen : .....	20
II. 2.5.4. Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ) : .....	20
II.2.5.5. La chaleur spécifique ( $C_p$ ) : .....	20
a. Modèle du Xuan et Roetzel : [29] .....	21
b. Modèle du Pak et Cho : [30] .....	21
II.2.5.6. La viscosité dynamique : .....	21
a. Modèle d'Einstein (1906) : .....	21
b. Modèle de Brinkman (1952) : .....	22
c. Modèle de Batchelor (1976) : .....	22
d. Modèle Maiga et al. (2005) : .....	22
e. Modèle Pack et Cho (1998) : .....	22
II.2.6. Les avantages des nanofluides : .....	22
II.2.7. Les inconvénients des nanofluides : .....	23
II.3. Généralités sur le transfert de chaleur : .....	23
II.3.1. Le transfert par conduction : .....	23
II.3.2. Le transfert par rayonnement : .....	24
II.3.3. Le transfert de chaleur par convection : .....	24
II.3.3.1. Convection forcée : .....	25
II.3.3.2. Convection naturelle (libre) : .....	25
II.3.3.3. Convection mixte : .....	25
II.3.4. Les nombres sans dimensions : .....	25
II.3.4.1. Nombre de Reynolds : .....	26
II.3.4.2. Nombre de Prandtl : .....	26
II.3.4.3. Le nombre de Nusselt : .....	26
a. Le nombre de Nusselt local : .....	27
b. Le nombre de Nusselt moyen : .....	27
II.3.4.4. Le nombre de Rayleigh : .....	27
II.3.4.5. Nombre de Grashof : .....	27
II.4. Le refroidissement des microcanaux par convection : .....	27
II.4.1. Introduction aux microcanaux : .....	27
II.4.2. Définition des microcanaux : .....	28
II.4.3. Classification des microcanaux basée sur le diamètre hydraulique : .....	29
II.4.4. Utilisation des microcanaux dans l'industrie : .....	29

II.5. Conclusion :	30
--------------------	----

### ***Chapitre III : Modélisation mathématique***

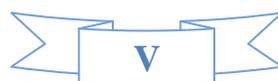
III.1. Introduction :	31
III.2. Description du problème :	31
III.2.1. La géométrie de problémé :	31
III.3. Formulations mathématique du problème :	33
III.3.1. les équations généralisées :	33
a. Equation de continuité :	33
b. Equation de quantité de mouvement :	33
c. Equation de conservation d'énergie :	34
III.3.2. les hypothèses de l'écoulement dans les microcanaux :	34
III.3.3. les équations du problème :	35
a. Equation de continuité :	35
b. Equation de quantité de mouvement :	35
c. Equation de l'énergie :	35
III.3.4. les conditions aux limites :	35
III.4. Conclusion :	36

### ***Chapitre IV : Simulation numérique***

IV.1. Introduction :	37
IV.2. Procédures du calcul :	37
IV.2.1. Menu principale de logiciel ANSYS Workbench :	38
IV.2.2 Création de la géométrie :	39
IV.2.3 maillage :	42
IV.2.4 Configuration :	44
a. Définissez les paramètres généraux de l'analyse CFD :	45
b. Réglage du Modèle d'écoulement :	45
c. Materials :	46
d. Mettre en place les conditions de la zone de la cellule pour la simulationCFD :	47
e. Les conditions aux limites (Boundry Conditions) :	47
IV.3. Conclusion :	48

### ***Chapitre V : Résultats et discussion***

V.1. Introduction :	49
V.2. Effet de maillage :	49



V.3. Interprétation et discussion des résultats :.....	50
V.3.1. Champs thermique :.....	50
a. La température : .....	50
b. Nombre de Nusselt moyen :.....	51
V.3.2. Champs dynamique : .....	53
a. Les lignes de courants:.....	53
b. Les vecteurs de vitesse :.....	54
c. La vitesse moyenne : .....	56
d. Profile de la vitesse moyenne : .....	57
e. la composante de la vitesse moyenne $U_x$ :.....	58
V.3.3. Effet de la géométrie :.....	59
a.La température : .....	60
b.Nombre de Nusselt moyen :.....	60
c.Les vecteurs de vitesse :.....	61
V.4. Conclusion :.....	61
Conclusion générale .....	62
Références bibliographie .....	64

# *Liste des Figures*

<b>Figure I.1</b> : Section transversale du microcanal carré avec ailettes longitudinales.....	3
<b>Figure I.2</b> :a. Vue de dessus du MCHS (plan Z-X) . b. Diagramme schématique de la disposition entrée/sortie de type V. c. dimensions de la MCHS (plan X-Y). .....	4
<b>Figure I.3</b> : Schéma d’installation de mesure.....	5
<b>Figure I.4</b> :Schéma montrant la description de la géométrie et les conditions aux limites pour les microcanaux rectangulaires. ....	5
<b>Figure I.5</b> : Boucle d’écoulement expérimentale à microcanaux ( $T_1$ et $T_2$ positionnées à 1 cm de distance)à partir des plénums d’entrée et de sortie reliant le bloc de réseau de microcanaux à tube PEEK). .....	6
<b>Figure I.6</b> : Géométrie du microcanal ondulé et domaine de calcul. ....	7
<b>Figure I.7</b> : La géométrie du pompage péristaltique à commande électrocinétique. ....	7
<b>Figure I.8</b> : La configuration schématique des microcanaux. ....	8
<b>Figure I.9</b> : Modèle schématique de la boîte de simulation pour nanofluide avec quatre cylindriques nanoparticulies.....	9
<b>Figure I.10</b> : a. Schéma du problème et b. Exemple de maillage FlexPDE généré. ....	9
<b>Figure I.11</b> :Géométrie du modèle de MCHS).....	10
<b>Figure I.12</b> : Configuration physique .....	11
<b>Figure I.13</b> : Schéma du MCHS.....	11
<b>Figure I.14</b> : Modèle géométrique du microcanal.....	12
<b>Figure II.1</b> : Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape (Ribeiro et Gruss).[20].	16
<b>Figure II.2</b> : Procédure de synthèse de nanofluide en deux étapes.[21] .....	17
<b>Figure II.3</b> : principe de la conduction thermique. [32].....	24
<b>Figure II.4</b> :Principe du rayonnement thermique. [33] .....	24
<b>Figure II.5</b> :Action de fluide en mouvement dans la convection. [34] .....	25
<b>Figure II.6</b> : Exemples des microcanaux. ....	28
<b>Figure II.7</b> : exemples sur le type des microcanaux.[26].....	29
<b>Figure III.1</b> : Géométrie du problème étudié.....	31
<b>Figure11 IV.1</b> : Fenêtre lancement du logiciel.....	37
<b>Figure IV.2</b> : Menu principal de Workbench.....	38
<b>Figure IV.3</b> : Création d’une analyse (projet) en mécanique de fluide. ....	38
<b>Figure IV.4</b> : Création d’un projet en mécanique de fluide. ....	39

<b>Figure IV.5</b> : Création d'un modèle géométrique (Design Modeler).....	40
<b>Figure IV.6</b> :Création d'un modèle (plan de vue). .....	40
<b>Figure IV.7</b> :Création d'esquisse.....	41
<b>Figure IV.8</b> : Création d'esquisse et Définition des côtes.....	41
<b>Figure IV.9</b> : Opération effectué .....	42
<b>Figure IV.10</b> : Schéma de projet. ....	42
<b>Figure IV.11</b> : Maillage.....	43
<b>Figure IV.12</b> : Configuration de la simulation sur fluent.....	44
<b>Figure IV.13</b> : ANSYS FLUENT.....	44
<b>Figure IV.14</b> : Paramètre générale de la CFD.....	45
<b>Figure IV.15</b> : Réglage du model d'analyse.....	45
<b>Figure IV.16</b> : Choix de matériaux. ....	46
<b>Figure IV.17</b> : sélection zone fluide.....	46
<b>Figure IV.18</b> : condition aux limites. ....	47
<b>Figure V.1</b> : Convergence du Nombre de Nusselt moyen le long de la partie chauffée. ....	49
<b>Figure V.2</b> : Les contours de température de deux nanofluides (Cu-eau et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -eau) pour différents nombre de Rayleigh avec une fraction volumique $\phi = 0.10$ .....	51
<b>Figure V.3</b> : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la fraction volumique $\phi$ pour différents nombres de Rayleigh avec deux nanofluides (Cu-eau et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -eau). ....	52
<b>Figure V.4</b> : Evolution du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes fractions volumiques $\phi$ avec deux nanofluides (Cu-eau et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -eau).....	52
<b>Figure V.5</b> : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la fraction volumique $\phi$ pour différents nanofluides (Cu-eau et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -eau) et différents nombre de Rayleigh .....	53
<b>Figure V.6</b> : Les ligne de courants pour différents nanofluides (Cu-eau et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -eau) avec une fraction volumique $\phi = 0.10$ et un nombre de Rayleigh $Ra = 10^3$ et $10^5$ .....	54
<b>Figure V.7</b> : Les ligne de courants pour différents nanofluides (Cu-eau et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -eau) avec une fraction volumique $\phi = 0.20$ et un nombre de Rayleigh $Ra = 10^3$ et $10^5$ .....	54
<b>Figure V.8</b> : Les vecteurs de vitesse pour une fraction volumique $\phi = 0.10$ avec différents nanofluides (Cu-eau et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -eau) et un nombre de Rayleigh $Ra = 10^3$ . ....	55
<b>Figure V.9</b> : Les vecteurs de vitesse pour une fraction volumique $\phi = 0.20$ avec différents nanofluides (Cu-eau et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -eau) et un nombre de Rayleigh $Ra = 10^5$ .....	55
<b>Figure V.10</b> : La vitesse moyenne pour une fraction volumique $\phi = 0.10$ avec différents nanofluides (Cu-eau et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -eau) et un nombre de Rayleigh $Ra = 10^3$ et $10^5$ .....	56

<b>Figure V.11</b> : La vitesse moyenne pour une fraction volumique $\phi = 0.20$ avec différents nanofluides (Cu-eau et $Al_2O_3$ -eau) et un nombre de Rayleigh $Ra = 10^3$ et $10^5$ .....	57
<b>Figure V.12</b> : Variation de la vitesse moyenne de deux nanofluides (Cu-eau et $Al_2O_3$ -eau) pour différentes nombre de Rayleigh avec une fraction volumique $\phi = 10\%$ .....	58
<b>Figure V.13</b> : Variation de la composante de vitesse moyenne ( $U_x$ ) de deux nanofluides (Cu-eau et $Al_2O_3$ -eau) pour différentes nombre de Rayleigh avec une fraction volumique $\phi = 0.10$ .....	59
<b>Figure V.14</b> : Les deux géométries étudiées. ....	60
<b>Figure V.15</b> : Les contours de température entre les géométries microcanal et ordinaire pour $Ra=10^5$ avec une fraction volumique $\phi = 10\%$ .....	60
<b>Figure V.16</b> : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la fraction volumique $\phi$ du nanofluide pour un nombre de Rayleigh $Ra=10^5$ .....	61
<b>Figure 17</b> : Les vecteurs de vitesse entre les géométries microcanal et ordinaire pour $Ra=10^5$ avec une fraction volumique $\phi = 10\%$ .....	61

## *Liste des tableaux*

<i>Tableau II.1</i> : Les propriétés thermophysiques de différents matériaux.[19].....	15
<i>Tableau II.2</i> : Classification des canaux par Mehendale et al.[41].....	29
<i>Tableau III.1</i> : Propriétés thermo physiques de l'eau et des nanofluides utilisées. ....	32
<i>Tableau III.2</i> : Conditions aux limites thermiques. ....	35
<i>Tableau V.1</i> : Effet maillage.....	49

# *Nomenclature*

## *Symboles latins*

$C_p$ : Chaleur spécifique	[kJ/Kg.K]
$g$ : Accélération de la pesanteur	[m.s <sup>-2</sup> ]
$h$ : coefficient de convection	[W/m <sup>2</sup> .k]
$M$ : la masse	[Kg]
$P$ : Pression	[Pa]
$T$ : Température	[k]
$T_s$ : Température de la surface	[k]
$T_a$ : Température du milieu environnant la surface	[k]
$T_s$ : La température de la paroi	[°C]
$T_\infty$ : La température du fluide loin de la paroi	[°C]
$S$ : La surface de contact solide/fluide	[m <sup>2</sup> ]
$V$ : La vitesse moyenne	[m/s]
$L$ : La longueur caractéristique	[m]

## *Symboles grecs*

$\alpha$ : Diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> /s]
$\mu$ : Viscosité dynamique	[Kg/(m. s)]
$\rho$ : la masse volumique	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi$ : Fraction volumique	
$\beta$ : Le coefficient de dilatabilité	
$\theta$ : Température adimensionnelles	
$\nu$ : Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\Psi$ : la sphéricité	
$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzmann	[Wk <sup>-4</sup> m <sup>-2</sup> ]
$\emptyset$ : Flux de chaleur	[w]
$\varepsilon$ : Facteur d'émission de la surface.	

$\lambda$ : Conductivité thermique

[W/m.K]

**Les nombres adimensionnels**

Nu : Nombre de Nusselt

Re : Nombre de Reynolds

$\overline{\text{Nu}}$  : Nombre de Nusselt moyen

$\text{Nu}_x$  : Nombre de Nusselt local

Ra : Nombres de Rayleigh

Pr : Nombre de Prandtl

Gr : Nombre de Grashof

**Les indices**

f : fluide de base

nf : nanofluide

np : nanoparticule

## ملخص

تم إجراء دراسة عددية على الحمل الحراري الطبيعي في قناة صغيرة ثنائية الأبعاد في تجويف مغلق مملوء بمزيج من الماء والجسيمات النانوية. تم تجهيز العلبة بحاجز مربع في وسط التجويف الساخن بتدفق ثابت. يتم إجراء عمليات محاكاة عددية لرقم راييلي مع كسور حجمية مختلفة من سائلين نانويين مختلفين. تمت دراسة تأثير تركيز الجسيمات النانوية وأنواع الجسيمات النانوية وكذلك أعداد راييلي. من أجل مقارنة تأثير تغيير نوع الجسيمات النانوية على توزيع السرعات ودرجة الحرارة، و بالتالي القيام بمقارنة بين السوائل النانوية على أساس التباين في رقم نيسالت المتوسط بدلالة ارقام راييلي وكسور حجمية في هذه الدراسة استخدمنا برنامج المحاكاة الرقمية Workbench Ansys و النتائج تمت مناقشتها بالتفصيل يتضح أن انتقال الحرارة يتأثر بالكسر الحجمي وعدد راييلي المرتفع وأنواع الموائع النانوية.

**كلمات مفتاحية :** انتقال الحرارة ، الحمل الحراري الطبيعي، تجويف، موائع النانو، قناة الصغيرة

## Résumer :

Dans ce travail, On a mené une étude numérique sur la convection naturelle laminaire dans un microcanal bidimensionnel dans une cavité fermée remplie d'un mélange d'eau et des nanoparticules. L'enceinte est équipée d'un bloc carre au centre de la cavité chauffée à un flux de constant  $Q''$ . Les simulations numériques sont effectuées pour des différentes nombres de Rayleigh avec différentes fractions volumiques de deux différentes nanofluides (Cu-eau,  $Al_2O_3$ -eau), L'effet de concentration des nanoparticules, types des nanoparticules ainsi les nombres de Rayleigh a été étudiée. Dans le but de comparer l'effet du changement le type des nanoparticules dans les nanofluides (Cu-eau,  $Al_2O_3$ -eau) sur la distribution des vitesses et de température. Ainsi une étude comparative des nanofluides (Cu-eau,  $Al_2O_3$ -eau) sur la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh et de fraction volumique. Les résultats sont également discutés en détail. Il est montrent que le transfert de chaleur est influencé par la fraction volumique, le nombre de Rayleigh élevé et par le types de nanofluide.

**Mots clés :** transfert de chaleur, convection naturelle, cavité, microcanal, nanofluides

## Abstract:

In this work, a numerical study was conducted on natural laminar convection in two-dimensional microchannel in a closed cavity filled with a mixture of water and nanoparticles. The enclosure is equipped with a square block in the center of the cavity heated to a flow of constant  $Q''$ . Numerical simulations are performed for different Rayleigh numbers with different volume fractions of two different nanofluids (Cu-water,  $Al_2O_3$ -water), The concentration effect of nanoparticles, types of nanoparticles as well as Rayleigh numbers was studied. in order to compare the effect of changing the type of nanoparticles in nanofluids (Cu-water,  $Al_2O_3$ -water) on the distribution of velocities and temperature. thus a comparative study of nanofluids (Cu-water,  $Al_2O_3$ -water) on the variation of the average Nusselt number as a function of the Rayleigh number and volumetric fraction. The results are also discussed in detail. It is shown that heat transfer is influenced by the volume fraction, the high Rayleigh number and the types of nanofluid.

**Keywords:** heat transfer, natural convection, cavity, microchannel, nanofluids

*Introduction*  
*Générale*

## **Introduction générale :**

Le transfert thermique est un processus physique d'une grande importance, qui est à la base de nombreux processus industriels. L'intensification de ces échanges et l'amélioration du rendement sont devenues aujourd'hui une problématique majeure dans le monde industriel, des organismes de réglementation mais aussi de la société dans son ensemble, qui prend conscience de l'épuisement progressif des ressources énergétiques et qui se soucie de l'avenir en matière énergétique.

Dans la plupart des systèmes de transfert de chaleur, le fluide de travail est mis en circulation par une pompe, et l'amélioration de l'efficacité du transfert de chaleur peut réduire la consommation d'énergie associée. Il existe plusieurs méthodes pour améliorer l'efficacité de transfert de chaleur. L'utilisation de surfaces étendues, l'application des vibrations sur les surfaces de transfert de chaleur, et l'utilisation de microcanaux sont parmi ces méthodes. L'efficacité du transfert de chaleur peut également être améliorée en augmentant la conductivité thermique du fluide caloporteur.

La conductivité thermique des fluides couramment utilisés dans le transfert de chaleur, tels que l'eau, l'éthylène glycol, et les huiles est relativement faible, par rapport à la conductivité thermique des matières solides. À cet égard, diverses techniques ont été proposées pour modifier les propriétés thermophysiques des fluides. Parmi ces techniques, on peut citer celle qui consiste à augmenter la conductivité thermique des fluides de base (tels que l'éthylène glycol, l'eau et les huiles) par mise en suspension de nanoparticules solides dans ces fluides. Ces techniques ont donné naissance à une nouvelle classe de fluides caloporteurs, appelés nanofluides. Au cours des dernières années, les nanofluides ont attiré l'attention de nombreux chercheurs, ingénieurs et concepteurs de systèmes thermiques pour leur qualité d'amélioration du transfert de chaleur. Leur utilisation pour le refroidissement dans diverses applications industrielles comme le refroidissement des composants électroniques, le refroidissement des véhicules, le refroidissement des transformateurs, dans les réacteurs nucléaires, les applications solaires etc... [1]

Les fluides purs ont des faibles conductivités thermiques, tous simplement l'ajout des nanoparticules d'un matériau à un fluide de base augmentent la conductivité et l'amélioration de refroidissement.

Les nanofluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés.

L'utilisation des nanofluides en tant que fluide thermique est un nouveau domaine qui est encore en phase de recherche.

## *Introduction générale*

---

Des améliorations d'échange thermique de l'ordre de plusieurs dizaines de pour-cent semblent possibles, notamment pour certaines applications : moteurs thermiques et refroidissement électronique. Néanmoins, compte tenu de l'augmentation de viscosité due aux nanoparticules, le bilan énergétique reste encore mitigé. [2]

Dans ce travail, on s'intéresse sur l'étude numérique de la convection naturelle d'un écoulement laminaire de nanofluide à travers des microcanaux. On utilise une cavité fermée qui est remplie de deux nanofluides différents (Cu-eau,  $AL_2O_3$ -eau), et un bloc carré chauffé est installée au centre de la cavité. Notre objectif est de comprendre l'influence des nanofluides sur le mécanisme de convection naturelle dans la coquille. Dans ce cas, nous avons étudié l'impact des paramètres thermophysiques et géométriques sur le champ thermique et dynamique.

Ce mémoire est divisé comme suit :

Le premier chapitre représente une synthèse bibliographique des études effectuée par le passé rencontres lors de l'étude de convection par les nanofluides, pour une compréhension le domaine de notre problématique en question.

Le deuxième chapitre consacré à une modélisation thermophysique, consiste un rappel sur les nanofluides (préparation, application, et les propriétés thermophysiques des nanofluides), le transfert par convection et le refroidissement par microcanaux.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une modélisation mathématique consiste des équations de problème avec les hypothèses et les conditions aux limites utilisant dans la configuration en question par logiciel de simulation (Ansys Workbench version 2022).

Le quatrième chapitre, nous illustrons une description de la méthode de la résolution numérique par l'utilisation de l'Ansys.

Le cinquième chapitre, traite les résultats de la simulation numérique obtenus pour les deux nanofluides utilisés dans cette étude, de refroidissement par convection des microcanaux de la configuration 2D.

Enfin, une conclusion générale clarifier les points essentiels et les résultats finales de notre étude.

# *Chapitre I*

---

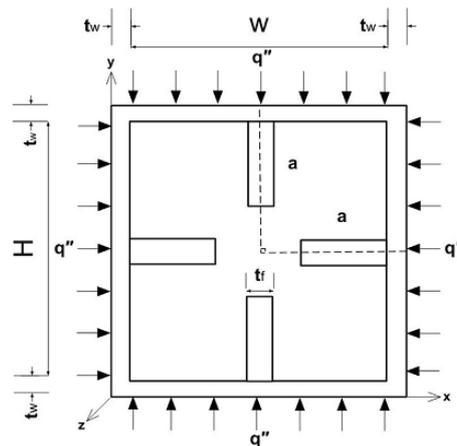
## *Revue bibliographique*

### I.1.Introduction :

Au cours des dernières années plusieurs études ont été réalisées sur la convection d'un nanofluide dans des microcanaux. Ce chapitre s'intéresse de présenter une synthèse bibliographique de certaines des études effectuées précédemment et qui sont en relation directe avec notre cas d'étude.

### I.2. Recherche bibliographique :

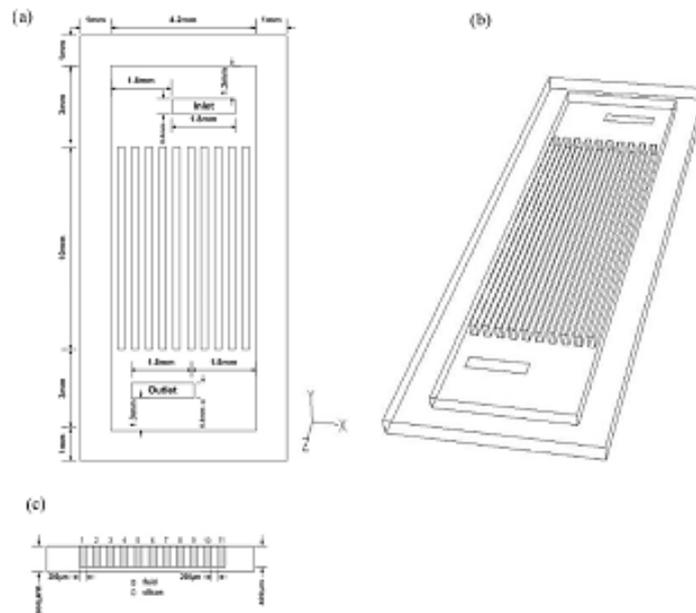
**A. Abdollahi et al.(2018)[3]** Ont traité numériquement les caractéristiques thermiques et hydrauliques d'un écoulement laminaire des nanofluides dans un microcanal carré avec des ailettes internes longitudinales. Les parois externes du microcanal sont chauffées à un flux de chaleur constant et quatre ailettes rectangulaires sont fixées sur les parois internes. Ils ont utilisés quatre type de nanofluides comme fluides de travail sont : ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZnO}$ -eau), avec différentes fractions volumiques de 1 à 2 % et différents diamètres de nanoparticules de 30 à 60 nm . Ils ont observés à partir des résultats que le nanofluide  $\text{SiO}_2$  à le taux de transfert de chaleur le plus élevé. L'augmentation de la taille et la diminution du diamètre des nanoparticules augmentent la valeur du nombre de Nusselt. En outre, les résultats suggèrent que les fluides à l'échelle nanométrique peuvent améliorer les performances du microcanal avec des ailettes longitudinales.



**Figure I.1 :** Section transversale du microcanal carré avec ailettes longitudinales.

**A. Abdollahi et al.(2017)[4]** présente un écoulement d'une convection forcée avec le transfert de chaleur de l'écoulement laminaire des nanofluides dans le dissipateur thermique microcanal (MCHS) avec disposition entrée/sortie de type V avec une condition aux limites de flux de chaleur constant est appliquée sur la plaque de base du MCHS et les autres

surfaces du MCHS sont isolées, ont étudiées numériquement le SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO et CuO comme fluides de travail, Trois fractions volumiques différentes et trois diamètres de nanoparticules. Les résultats précisent que le nanofluid SiO<sub>2</sub> à le taux de transfert de chaleur le plus élevé par rapport aux autres. L'augmentation de la fraction volumique ainsi que la diminution du diamètre des nanoparticules améliorent la valeur du nombre de Nusselt. Le coefficient de perte de charge n'a pas changé de manière significative.



**Figure I.2 : a.** Vue de dessus du MCHS (plan Z-X) . **b.** Diagramme schématique de la disposition entrée/sortie de type V. **c.** dimensions de la MCHS (plan X-Y).

**D.V. Guzei et al. (2019)[5]** Ont réalisé une étude expérimentale de la convection forcée lors d'un écoulement laminaire des nanofluides avec des nanoparticules d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> et diamond. La concentration en volume des nanoparticules variait de 0,25 à 6%. La taille des nanoparticules variait de 5 à 150 nm. L'étude s'est appuyée sur La dépendance du transfert de chaleur et de la perte de charge par rapport à la concentration, à la taille et au matériau des nanoparticules. Les résultats obtenus ont montré que l'ajout de nanoparticules au liquide de refroidissement influence de manière significative le coefficient de transfert de chaleur dans le régime d'écoulement laminaire, l'augmentation de la concentration en nanoparticules, les coefficients de transfert de chaleur locaux et moyens à un nombre de Reynolds fixe. Ils ont été démontrés l'effet des propriétés du fluide de base sur les nanofluides.

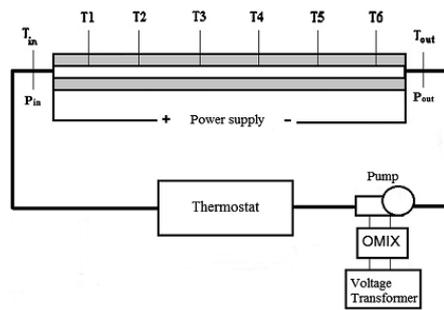


Figure I.3 : Schéma d'installation de mesure.

**F. S. Alkasmoul et al. (2022)[6]** Ont travaillé sur l'étude de l'effet combiné des performances thermiques et hydrauliques de différents nanofluides avec diverses concentrations de nanoparticules dans un dissipateur thermique à microcanaux rectangulaires dans un écoulement laminaire. L'évaluation est basée sur différents nombres de Reynolds, débit et puissance de pompage avec la température maximale du dissipateur thermique. Les résultats indiquent que la présentation de la performance thermique du nanofluide par rapport au nombre de Reynolds est trompeuse. L'adoption de cette approche a amélioré les performances thermiques du dissipateur thermique du microcanal. Cependant, les résultats en termes de quantité de leurs dimensions en termes de débit ou de puissance de pompage, montrent que l'utilisation de nanofluide dans un microcanaux précis réduit les performances thermiques.

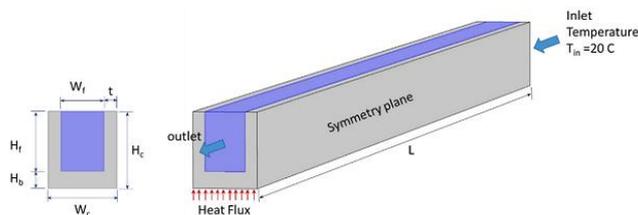
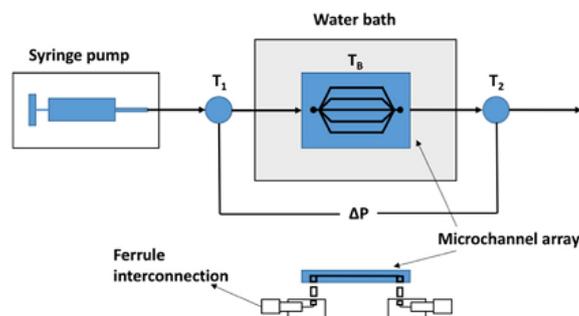


Figure I.4 : Schéma montrant la description de la géométrie et les conditions aux limites pour les microcanaux rectangulaires.

**J. Bowers et al. (2018)[7]** Ont étudiés expérimentalement l'écoulement et le transfert de chaleur des nanofluides de silice et d'alumine à base d'eau dans des microcanaux. Les facteurs de frottement mesurés étaient plus élevés que les prédictions des modèles conventionnels à de faibles nombres de Reynolds, en particulier avec des concentrations élevées de nanoparticules. Une diminution du facteur de frottement a été observée avec l'augmentation du nombre de Reynolds, peut être en raison de l'augmentation de la forme de l'agrégat de nanoparticules résultant du cisaillement du fluide et de l'altération de la concentration locale de nanoparticules. Les conductivités thermiques mesurées des

nanofluides de silice étaient en accord approximatif avec le modèle maxwell-Crosser, tandis que les nanofluides d'alumine ne présentaient que de légères améliorations. Un transfert de chaleur par convection amélioré a été observé pour les deux nanofluides, par rapport à leurs fluides de base (eau) à de faibles concentrations de particules. L'amélioration du transfert de chaleur a augmenté avec l'augmentation du nombre de Reynolds et de diamètre hydraulique des microcanaux. Cependant, la majorité des expériences ont montré une augmentation plus importante des besoins en puissance de pompage par rapport aux améliorations du transfert de chaleur, ce qui peut entraver l'adoption industrielle des nanofluides, en particulier dans l'environnement confiné, tels que les microsystèmes électromécaniques (MEMS).



**Figure I.5 :** Boucle d'écoulement expérimentale à microcanaux ( $T_1$  et  $T_2$  positionnées à 1 cm de distance) à partir des plenums d'entrée et de sortie reliant le bloc de réseau de microcanaux à le tube PEEK).

**J.Rostami et al.(2018)[8]** Ont traité Le pompage de liquides de refroidissement à travers des microcanaux aux structures bien définies le long de dispositifs micro-électroniques est une approche typique pour éliminer la chaleur. Ils ont constaté récemment que les soidisant nanofluides, c'est-à-dire les suspensions diluées d'eau-Cu ou d'eau- $Al_2O_3$  avec un diamètre de particules de 100-150 nm, sont des fourmis froides très efficaces. Les simulations numériques peuvent aider à optimiser les structures des microcanaux. Une autre approche consiste en des modèles biphasés basés sur une approche eulérienne pour le fluide de base et une description lagrangienne des particules en suspension. Nous nous concentrons sur une structure de microcanaux ondulés et démontrons que le désaccord entre les deux approches de simulation est dû à la non-homogénéité de la structure.

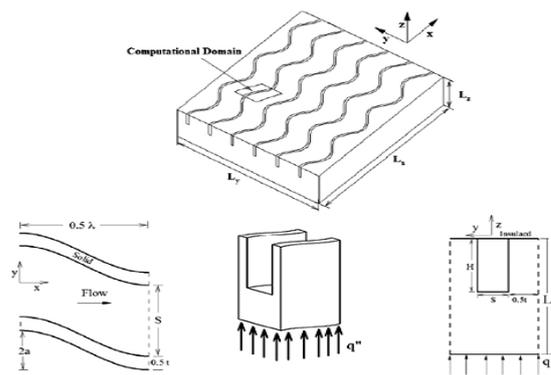


Figure I.6 : Géométrie du microcanal ondulé et domaine de calcul.

**J. Akram et al.(2020)[9]** Ont travaillé sur l'étude théorique et numérique du pompage péristaltique du nanofluide d'argent à base d'eau dans un microcanal asymétrique soumis à l'influence d'une convection mixte et d'une dissipation visqueuse. Les conditions aux limites sans glissement pour la vitesse, la température et la fraction volumique des nanoparticules sont imposées. La température et la fraction volumique des nanoparticules en utilisant le logiciel mathématique conductivité thermique du nanofluide prédite par le modèle de Corcione et le modèle de Maxwell. Ils ont observé que la conductivité thermique du nanofluide (argent-eau) augmente avec la fraction volumique des nanoparticules et avec les paramètres d'écoulement, ainsi que la température. En outre, la température du nanofluide est directement liée au paramètre de la longueur de Debye.

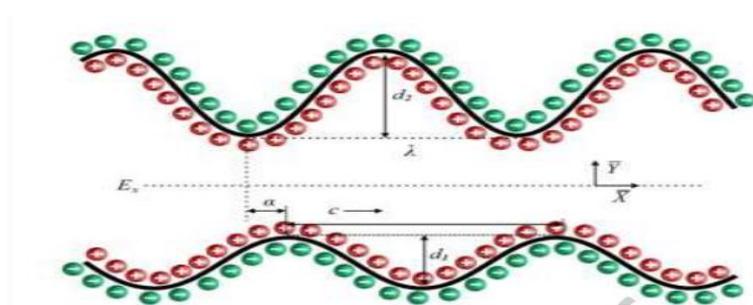
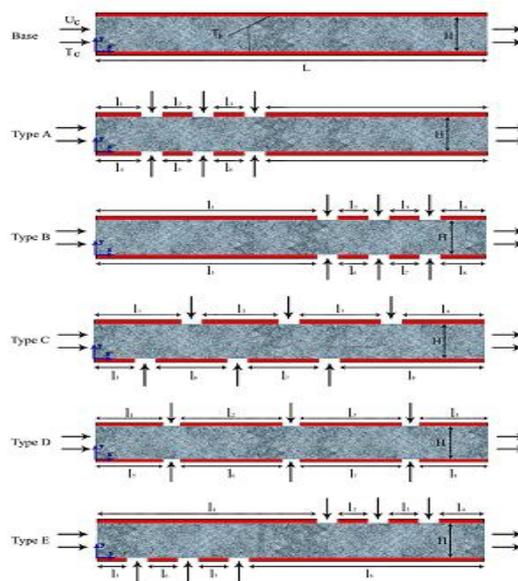


Figure I.7 : La géométrie du pompage péristaltique à commande électrocinétique.

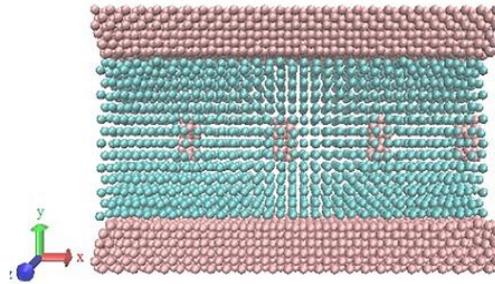
**L.Yang et K.Du . (2019)[10]** Ont menée dans cette étude à simulé le transfert de chaleur par convection forcée d'un nanofluide eau/alumine dans un microcanal rectangulaire. Trois techniques ont été utilisées pour améliorer le transfert de chaleur. Tout d'abord, trois points d'injection de fluide supérieurs et trois points inférieurs ceux (six injections au total) ont été ajoutés au microcanal de base. Différentes configurations d'injection de fluide et leur l'effet

sur l'amélioration des performances thermiques du microcanal ont été étudiés. Les résultats ont appuyé l'effet substantiel de la disposition de l'injection de fluide sur le transfert de chaleur, car le nombre moyen de Nusselt a été augmenté d'un maximum de 25% (meilleure disposition) dans les nombres de Reynolds élevés. La deuxième technique consistait à ajouter du nanofluide au fluide de base. Les résultats ont montré que l'ajout des nanofluides au microcanal de base augmentait le nombre de Nusselt d'un maximum de 3,5 %. Dans la troisième technique, l'injection de fluide ont été ajoutée à un microcanal contenant du nanofluide. Les résultats ont montré que l'injection en présence d'un nanofluide améliorerait le nombre de Nusselt de 28%. Les trois techniques ont entraîné à la fois un effet positif (augmentation du transfert de chaleur) et un effet négatif (augmentation de la perte de charge). Dans la technique la plus efficace, la perte de charge était 40% plus élevée que le microcanal de base au point avec transfert de chaleur maximal.



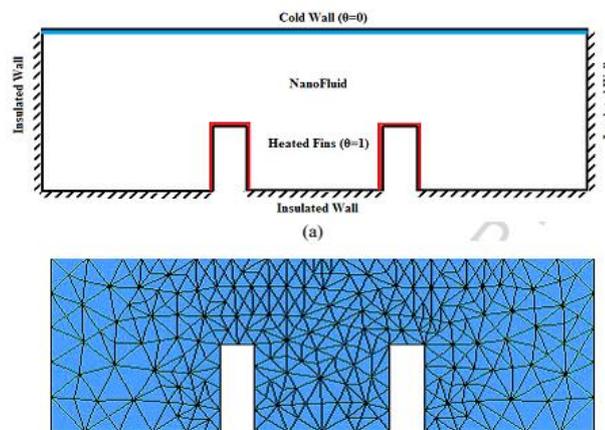
**Figure I.8 :** La configuration schématique des microcanaux.

**M. Bagheri Motlaghet et M. Kalteh.(2020)[11]** Ont étudiée le transfert de chaleur par convection d'un nanofluide argon-cuivre dans un nanocanal de cuivre dans des conditions d'écoulement de Poiseuille a été étudié sous l'effet de la forme des nanoparticules et de leur agrégation, ainsi que l'effet de la rugosité de la paroi sur le nombre de Nusselt. Ils ont travaillé sur la forme des nanoparticules, cylindriques et sphériques. De plus, l'effet de rugosité montre qu'il améliore le transfert de chaleur entre le fluide à l'échelle nanométrique et la paroi. Cela est dû à une augmentation de l'épaisseur de la couche dure adjacente à la paroi et à une augmentation du mouvement des atomes de nanofluides.



**Figure I.9 :** Modèle schématique de la boîte de simulation pour nanofluide avec quatre cylindriques nanoparticules.

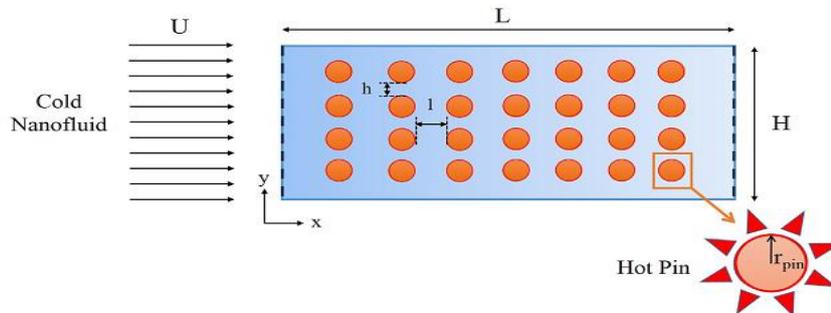
**M. Hatami. (2017)[12]** Ont traité numériquement le problème de la convection naturelle dans une cavité chauffée est résolu pour différentes fractions volumiques de nanoparticules et hauteurs d'ailettes afin d'étudier l'effet de ces paramètres sur la température locale. L'effet de ces paramètres sur les nombres de Nusselt locaux et moyens. Le point maximum des nombres de Nusselts locaux pour le  $\text{TiO}_2$  est plus grand que celui de l' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sauf lorsque le  $\phi=0.09$ . De plus, le  $\text{TiO}_2$  conduit à un nombre de Nusselt moyen plus élevé ainsi qu'à une hauteur d'ailettes plus grande dans la plupart des cas, ainsi qu'une plus grande hauteur d'ailettes dans la plupart des cas.



**Figure I.10. a.** Schéma du problème et **b.** Exemple de maillage FlexPDE généré.

**M. Zargartalebiet et J .Azaiez. (2018)[13]** En dehors de ces aspects géométriques, il y a un manque d'études sur les effets des propriétés des nanoparticules sur l'amélioration du transfert de chaleur. Dans cette étude, les effets des propriétés des nanoparticules sur les performances d'élimination de la chaleur sont modélisés en utilisant un puits de carbone nanométrique. La distribution des nanoparticules joue un rôle important dans le transfert de chaleur et contrairement aux modèles des nanofluides homogènes, les schémas d'écoulement dans le

système ne sont pas pris en compte. L'influence des nanoparticules sur le transfert de chaleur dépend à la fois de la taille de la particule et du régime d'écoulement. Par conséquent, sur la base des propriétés des nanoparticules, une courbe caractéristique est introduite, à l'aide de laquelle les nanoparticules peuvent améliorer en toute sécurité le transfert de chaleur.



**Figure I.11** : Géométrie du modèle de MCHS).

**T. Balaji et al.(2020)[14]** Ont examiné les propriétés de transfert de chaleur par convection des f-GnP (nanoparticules fonctionnelles) en suspension dans l'eau distillée. L'effet du débit massique (5 à 30 g/s) et la concentration en volume de GnP est (0 à 0,2% ) sur divers paramètres de transfert de chaleur tels que les facteurs de transfert de chaleur, la basse température, le nombre de Nusselt et la basse pression dans cette étude ont été discutés. Des expériences à l'échelle nanométrique à base de GnP dans le dispersant thermique réduisent la température du dispersant thermique de 10 °C et améliorent le coefficient de transfert de chaleur par convection et le nombre de Nusselt de 71% et 60% avec un petit incrément de la perte de charge d'environ 12% plus élevée par rapport à l'eau. Les résultats prouvent que les nanofluides fonctionnalisés à base de GnP remplaceraient efficacement les nanofluides existants qui améliorent les performances des puces électroniques en raison de l'amélioration de la conductivité thermique et du coefficient de transfert de chaleur par convection.

**T. Mahalakshmi et al. (2018)[15]** Ont menée une étude numérique sur le transfert de chaleur par convection naturelle à l'intérieur de l'enceinte avec chauffage central utilisant un nanofluide ont été réalisée, L'effet de différentes longueurs de chauffage central sur les champs de débit et de température est analysé pour différents nombres de Rayleigh. Les résultats numériques révèlent que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la longueur de l'élément chauffant à la fois en position verticale et horizontale pour des valeurs croissantes des nombres de Rayleigh. En particulier, une augmentation plus importante du transfert de chaleur est obtenue avec un réchauffeur situé en position verticale de longueur maximale.

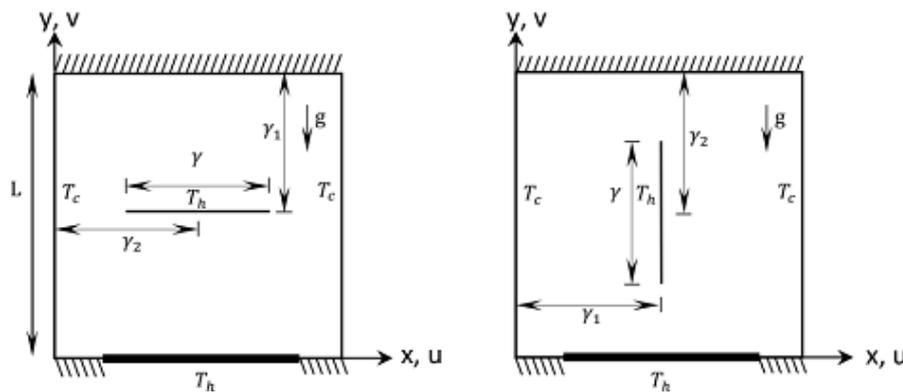


Figure I.12 : Configuration physique.

V. M. Krishna et M. S. Kumar.(2019)[16] ont analysé numériquement le transfert de chaleur par convection forcée. La chaleur générée doit être éliminée par la conception d'un système de gestion thermique approprié pour un fonctionnement fiable du dispositif électronique. s'ils ne sont pas correctement conçus et contrôlés, les taux élevés de production de chaleur entraînent des températures de fonctionnement élevées pour les équipements électroniques, ce qui met en danger la sécurité des utilisateurs. La chaleur générée par le composant électronique est transférée au liquide de refroidissement par convection forcée. L'effet du nombre de Reynolds sur le transfert de chaleur dans le microcanal à également été étudié. Une amélioration significative du transfert de chaleur a été trouvée avec le dissipateur de chaleur à microcanaux en raison de la diminution de la résistance au transfert de chaleur par convection lorsque la taille de la couche limite thermique augmente.

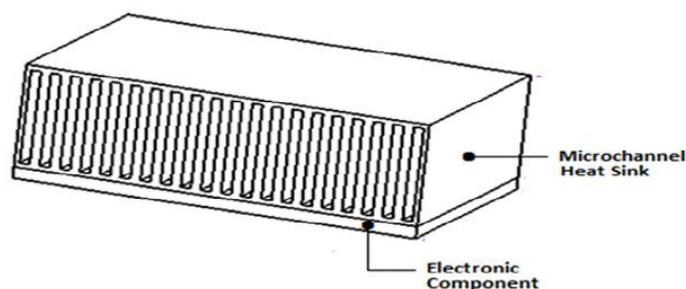
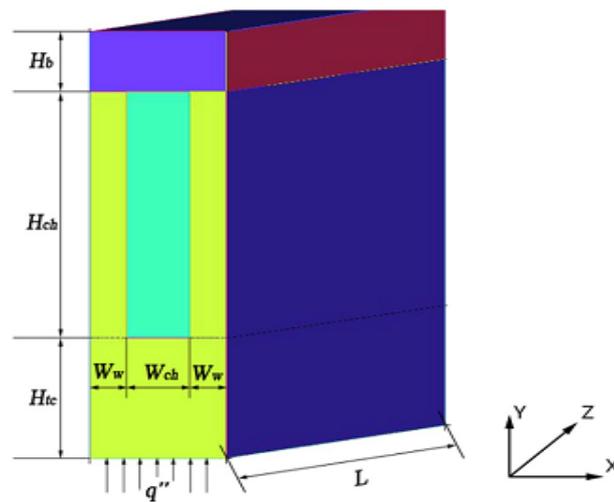


Figure I.13 : Schéma du MCHS.

X. Shi ,et al .(2017)[17] ont utilisé les propriétés thermophysiques des nanofluides, les caractéristiques d'écoulement et de transfert de chaleur d'un microcanal rectangulaire avec des dimensions hydrauliques de  $341 \mu\text{m}$  ont été analysées à l'aide du modèle de simulation proposé. Les résultats sont les suivants : les nanoparticules sont enrichies à proximité de la paroi pour la région entièrement développée ; la non-uniformité de la distribution du

coefficient de conductivité thermique des nanofluides à la section transversale du canal augmente avec l'augmentation du débit massique. L'amplitude de l'amélioration et la concentration ; le coefficient de transfert de chaleur du nanofluide avec une concentration de nanoparticules d'alumine de 1 et 2 % n'est pas linéaire. 1 et 2 % de nanoparticules d'alumine est supérieur d'environ 5,86 et 8,49 % à celui de l'eau désionisée, respectivement ; l'effet de conduction axiale ne peut être ignoré pour le microcanal, ce qui affecte de manière significative les régions d'entrée et de sortie du microcanal.



**Figure I.14 :** Modèle géométrique du microcanal.

### **I.3. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous présentons une recherche bibliographique des différents travaux effectués dans le domaine d'une convection thermique d'un écoulement laminaire des nanofluides à travers des microcanaux.

## *Chapitre II*

---

# *Généralités sur les nanofluides et le refroidissement des microcanaux*

## **II.1. Introduction :**

Ces dernières années, le domaine de refroidissement des composants électroniques a connu un développement d'une nouvelle technologie nanofluidique pour améliorer les propriétés thermophysiques des fluides caloporteurs par agitation des nanoparticules dans le but d'augmenter l'efficacité et la surface d'échange entre le fluide et la paroi. Les systèmes de refroidissement par convection des échangeurs de chaleur à microcanaux est une méthode efficace et innovante de transfert de grandes quantités de chaleur à des très petites surfaces de l'ordre du micromètre aux fluides caloporteurs, puis aux milieux environnant.

Ce chapitre présente des notions de base sur les nanofluides et le transfert de chaleur par convection, ainsi qu'un petit rappel sur le refroidissement par convection des microcanaux.

## **II.2. Généralités sur la Nanotechnologie :**

Le développement technologique dans le XXI<sup>e</sup> siècle est déjà connu de nombreux changements dans presque tous les secteurs. La célèbre phrase du physicien Richard Feynman lauréat du prix Nobel en 1959, suggère le concept de micromachines, il s'inspire à une nouvelle technologie appelé nanosciences. En 1974, le terme «nanotechnologie» a été utilisé pour la première fois par le scientifique Norio Taniguchi. Après cela, en 1995, le scientifique Choi of Argonne Laboratoire (États-Unis) a préparé avec succès un nanofluide. Après l'établissement d'un tel point de repère dans l'histoire de la nanoscience, les nanofluides retiennent l'attention de la plupart des chercheurs du monde entier. Le terme «nanofluide» a été utilisé dans près de 10000 articles. Montre une croissance exponentielle de la recherche sur les nanofluides.[18]

### **II.2.1. Définition d'un nanofluide :**

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de nanoparticules En suspension dans un liquide. L'étude de ces fluides composites a montré des capacités particulièrement intéressantes par rapport aux liquides traditionnels, notamment l'eau, car ils ont une meilleure conductivité thermique et son coefficient d'échange par convection est de manière significatif important. L'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides non seulement en raison de la plus grande conductivité thermique des nanoparticules en suspension, cette amélioration provient d'une combinaison de plusieurs facteurs physiques simultanés. Choisir les fluides de base est très important pour les nanofluides. Il peut garantir

la stabilité du système pause opportun. Le choix de ce fluide se fera en fonction des propriétés des nanoparticules.

Les solvants les plus couramment utilisés sont :

- l'eau
- l'éthylène glycol, EG
- les huiles.
- Toluène.
- Les fluides de réfrigération (R12, R22,...etc.).

### **II.2.2. Nanoparticules et les fluides porteurs :**

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelque milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins une des dimensions est de taille nanométrique (1-100 nm), les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental, appliqué et sont très étudiées actuellement.

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont :

#### **• Les nanoparticules des oxydes métalliques :**

- L'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).
- L'oxyde de cuivre ( $\text{CuO}$ ).
- L'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ).
- L'oxyde de Titanium ( $\text{TiO}_2$ ).

#### **• Les nanoparticules métalliques:**

- L'aluminium (Al).
- Le cuivre (Cu).
- L'or (Au).
- L'argent (Ag).

- **Les nanoparticules non métalliques:**

- Les nanotubes de carbone (CNT).
- Le diamant (C).

Les suspensions de nanoparticules dans un fluide, souvent appelées nanofluides, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels.

**Tableau II.1 : Les propriétés thermophysiques de différents matériaux.[19]**

	<b>Nanoparticules et fluide de base</b>	<b>K(w/m k)</b>	<b><math>\rho</math> (k g/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cp(J/kg k)</b>	<b><math>\mu</math> (Pa.s)</b>
<b>Métallique (solides)</b>	Cu	400	8954	383	
	Fe	80.2	7870	447	
	Ni	90.7	8900	444	
	Au	317	19.3	129	
	Ag	429	10.5	235	
	C(diamant)	2300	3500	509	
<b>Oxyde Métallique (solides)</b>	SiO <sub>2</sub>	1.38	2220	745	
	TiO <sub>2</sub>	8.4	4157	710	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
<b>Liquides non métallique</b>	Eau	0.613	1000	4183	0.0008
	Ethylène-glycol(EG)	0.258	1132	2349	0.0157

**Caractéristiques des nanoparticules :[19]**

- Une dimension < 100nm
- Formes : Sphériques, cylindriques, ...
- Types de nanoparticules
  - Métalliques : Cu, Ag, Au, ...
  - Oxydes : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> ...
  - Nanotubes de carbone (CNT).

### II.2.3. Préparation des nanofluides:

Il existe de nombreux procédés de fabrication de nanoparticules. Ils peuvent être classés en deux catégories :

- ✚ Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.
- ✚ Les procédés chimique, comme la pyrolyse laser ou la précipitation chimique.

#### a. La méthode a une seule étape:

Y compris la production de nanoparticules dans le fluide de base. Le caractère industriel est faible, il ne peut être utilisé que dans certains nanofluides, mais il permet d'éviter l'agglomération et l'oxydation des nanoparticules.

Un exemple du procédé consiste à condenser de la vapeur métallique sous forme de nanoparticules sur un film liquide à basse pression de vapeur dans un réacteur.[20]

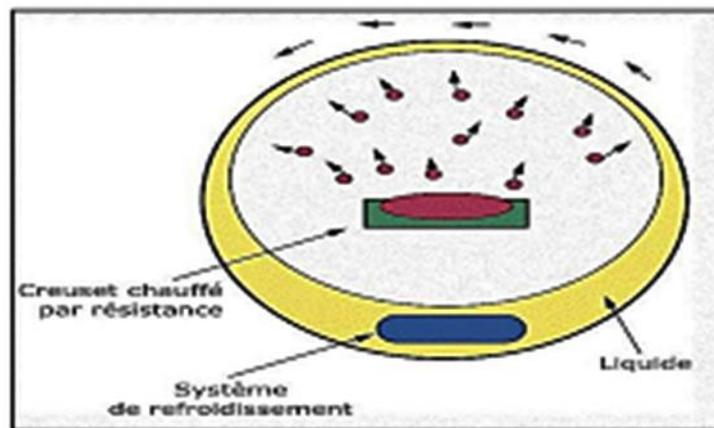
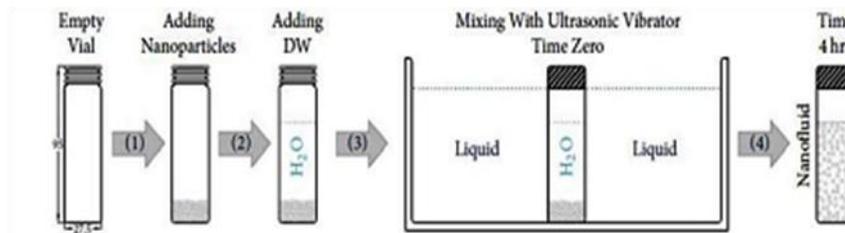


Figure II.1 : Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape (Ribeiro et Gruss).[20]

#### b. La méthode en deux étapes :

Il s'agit d'abord de produire des nanoparticules puis de les dispersées dans le fluide de base. Afin d'obtenir une bonne dispersion, il est généralement nécessaire d'utiliser un agitateur rotatif ou des ondes ultrasonores pour une forte action mécanique pour briser les agglomérats.

De plus, afin d'éviter l'agglomération causée par la force d'attraction entre les particules, la surface des particules est chargée en ajustant la valeur du pH, utilisant ainsi la répulsion électrostatique. La répulsion spatiale peut également être utilisée pour adsorber ou greffer des molécules en surface. [21]



**Figure II.2 :** Procédure de synthèse de nanofluides en deux étapes.[21]

#### II.2.4. Les applications des nanofluides :

Les nanofluides peuvent être employés pour améliorer le transfert de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques. Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications :

- le refroidissement des systèmes thermiques.
- La biomédecine.
- L'échangeur de chaleur.
- le refroidissement des systèmes électroniques
- Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs (formulations de lubrifiants et liquides de refroidissement mélangés avec des nanoparticules pourraient entraîner une augmentation de l'efficacité énergétique des réfrigérateurs)
- Aéronautique et spatial.
- Refroidissement des systèmes nucléaire.
- Transport (gestion de refroidissement / véhicule moteur thermique).
- Autres applications (caloducs, piles à combustible, le chauffage solaire d'eau, forage, stockage thermique).[22]

#### II.2.5. Caractéristiques thermo-physiques des nanofluides :

Les propriétés thermophysiques qui caractérisent les nanofluides sont différentes selon la nature des nanoparticules. Ces caractéristiques sont :

- La masse volumique  $\rho$
- La fraction volumique  $\phi$

- La conductivité thermique K
- Le coefficient d'expansion volumique  $\beta$
- La chaleur spécifique Cp
- La viscosité dynamique  $\mu$

### **II.2.5.1. La Masse volumique $\rho$ :**

Pour calculer la masse volumique d'un nanofluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide de base) en fonction de la fraction volumique a une température T donnée. La masse volumique de ce mélange est définie comme suite : [23]

$$\rho_{nf} = \left( \frac{m_{nf}}{v_{nf}} \right) = \frac{m_f + m_{np}}{v_f + v_{np}} = \frac{\rho_f v_f + \rho_{np} v_{np}}{v_f + v_{np}} \quad (\text{II.1})$$

On déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_{np} \quad (\text{II.2})$$

### **II.2.5.2. La fraction volumique $\phi$ :**

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour les nanofluides, puisque les calculs de toutes les autres propriétés sont basés sur la fraction volumique. On peut la définir comme étant le rapport sans dimension entre deux volumes, le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base). La valeur de la fraction volumique est variée entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivant :

$$\phi = \frac{\text{Volume solide}}{\text{Volume totale du nanofluide}} = \frac{v_{np}}{v_f + v_{np}} \quad (\text{II.3})$$

### **II.2.5.3. La conductivité thermique :**

La conductivité thermique généralement est une propriété importante, principalement dans notre étude parce qu'elle joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur, elle peut indiquer clairement l'efficacité du transfert de chaleur du fluide ou du solide, la conductivité dépend de la température.

La conductivité thermique est définie comme une variation de température et une conductivité thermique différente due à la fraction volumique et aux nanofluides, en fonction des nanoparticules, la conductivité thermique d'un nanofluide est calculée selon les modèles suivants :

**a. Modèle de Maxwell :**

Maxwell (1873) [24] à présenter son modèle pour calculer la conductivité thermique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique de nanofluide, mais ce modèle est acceptable uniquement dans le cas des nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, est donné par la formule suivante :

$$K_{nf} = \frac{k_{np} + 2(k_{np} - k_f)\phi}{k_{np} + k_f - (k_{np} - k_f)\phi} K_f \quad (\text{II.4})$$

**b. Modèle de Hamilton et Crosser :**

Le modèle de Hamilton-Crosser (1962) [25] est une extension du modèle de Maxwell, qui tient compte de la forme des particules. En effet, pour prendre en compte la non-sphéricité des particules La conductivité thermique est donnée dans la relation suivante :

$$K_{nf} = \frac{k_{np} + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_{np})\phi}{k_{np} + (n-1)k_f + (k_f - k_{np})\phi} K_f \quad (\text{II.5})$$

Où :

n : facteur de forme empirique donné par  $n = 3\Psi$

n=3 pour les particules sphériques.

n=6 pour les particules cylindriques.

Avec  $\Psi$  est la sphéricité définit comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule, Pour ( $\Psi=1$ ) (particules sphériques) le modèle de Hamilton et Crosser est identique au modèle de Maxwell.

**c. Modèle de Yu et Choi :**

Une autre expression pour calculer la conductivité thermique a été introduite par Yu et Choi (2003). Ils ont proposé de modéliser les nanofluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique. Cette couche agit comme un pont

thermique entre le fluide et les nanoparticules. De plus, ils ont supposé que la conductivité thermique de la couche nanométrique est plus grande que la conductivité thermique de liquide. Le modèle de Yu et Choi est donné par la formule suivante :

$$K_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)(1 + \beta)^3 \phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)(1 + \beta)^3 \phi} k_f \quad (\text{II.6})$$

Où  $\beta$  est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.[26]

**d. Modèle de Bruggeman :**

Le modèle proposé par Bruggeman (1935) semble mieux approximer certains résultats expérimentaux comparés aux autres modèles pour le cas des nanoparticules sphériques avec aucune limitation concernant les concentrations des nanoparticules.[27]

$$K_{nf} = \frac{(3\phi - 1)\frac{k_{np}}{k_f} + \{3(1 - \phi) + \sqrt{\Delta}\}}{4} k_f \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$\Delta = \left[ (3\phi - 1) \left( \frac{k_{np}}{k_f} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9 - 9\phi^2) \left( \frac{k_{np}}{k_f} \right) \right] \quad (\text{II.8})$$

**II. 2.5.4. Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ) :**

Pour calculer la valeur de ce coefficient pour les nanofluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides et par analogie avec la relation :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_{np} \quad (\text{II.9})$$

On déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \phi)\beta_f + \phi\beta_{np} \quad (\text{II.10})$$

**II.2.5.5. La chaleur spécifique ( $C_p$ ) :**

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène. 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 nanofluide, on a retrouvé suivant les auteurs l'une ou l'autre des deux relations suivantes. [28]

Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on peut citer les deux modèles suivants :

**a. Modèle du Xuan et Roetzel : [29]**

Xuan et Roetzel (2000) ont utilisé la formule suivante :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_{np} \quad (\text{II.11})$$

**b. Modèle du Pak et Cho : [30]**

Pak et Cho (1998) ont utilisé la formule suivante :

$$(C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(C_p)_{np} \quad (\text{II.12})$$

**II.2.5.6. La viscosité dynamique :**

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nanofluide, mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées afin d'estimer ou de mesurer la viscosité dynamique des nanofluides et de quantifier l'importance des principaux paramètres qui l'influencent. Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux modèles les plus utilisés dans le cas des nanofluides.

**a. Modèle d'Einstein (1906) :**

Einstein a déterminé l'énergie dissipée autour d'une seule particule dans un fluide en associant son énergie au travail réalisé pour la faire avancer relativement au fluide à partir de ce résultat, il a déterminé l'expression décrivant une dépendance linéaire de la viscosité des suspensions dans un fluide avec la concentration :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\phi) \quad (\text{II.13})$$

La formule d'Einstein a depuis été vérifiée expérimentalement et est considérée satisfaisante pour des suspensions très diluées de particules sphériques (browniennes ou non browniennes), typiquement pour des concentrations volumiques inférieures à 1%. Il est à noter que ce modèle ne tient pas compte des effets de la taille des particules et des interactions interparticules.

**b. Modèle de Brinkman (1952) :**

La formule de Brinkman (1952) complète le modèle d'Einstein jusqu'à une concentration volumique inférieure à 4% :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (\text{II.14})$$

On remarque que cette relation décrit une évolution non linéaire de la viscosité dynamique avec la concentration volumique mais ne tient pas compte de la collision entre les particules.

**c. Modèle de Batchelor (1976) :**

En effet, l'écoulement autour de chaque particule est influencé par la présence éventuelle d'autres particules à proximité et par les collisions entre particules. Ainsi, cela se traduit par la prise en compte d'un terme  $\phi^2$  dans le modèle de Batchelor (1976),

$$\mu_{nf} = (1 + \eta\phi + K_H\phi^2) \mu_f \quad (\text{II.15})$$

$\eta$  : est la viscosité intrinsèque et  $K_H$  est le coefficient de Huggins. La valeur de  $\eta$  et  $K_H$  est de 2.5 et 6.5 respectivement pour des particules sphériques.

**d. Modèle Maiga et al. (2005) :**

D'autres relations ont été proposées dans la littérature limitée à des applications bien précises. Maiga et al. (2005) à partir de résultats de mesures ont proposé la corrélation :

$$\mu_{nf} = \mu_f(123\phi^5 + 7.3\phi + 1) \quad (\text{II.16})$$

En comparant cette corrélation aux modèles d'Einstein et de Brinkman, on trouve que ces deux dernières approches sous-estiment les valeurs expérimentales de la viscosité des nanofluids.

**e. Modèle Pack et Cho (1998) :**

Pack et Cho (1998) ont proposé, quant à eux une corrélation pour les nanoparticules  $\text{Al}_2\text{O}_3$  disperses dans l'eau donnée par : [26]

$$\mu_{nf} = \mu_f(533.9\phi^5 + 39.11\phi + 1) \quad (\text{II.17})$$

**II.2.6. Les avantages des nanofluides :**

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominance mouvement brownien des particules.

- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du 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.2.7. Les inconvénients des nanofluides :**

- Fortes pertes de charge.
- Erosion.
- Sédimentation.
- Bouchons dans les écoulements.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production. [22]

### **II.3. Généralités sur le transfert de chaleur :**

Le transfert de chaleur entre deux corps est l'interaction énergétique provoquée par gradient de température entre deux corps, ce qui permet le transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond en fait à un transfert d'agitation thermique entre particules, dépendant des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique. [26]

Il existe généralement trois modes de transfert de chaleur :

#### **II.3.1. Le transfert par conduction :**

Ce mode d'échange tend à une distribution homogène, c'est la propagation de la chaleur d'une molécule à une autre ou d'un corps ou plusieurs contigus sans qu'il y ait mouvement de ce milieu, contigus sans qu'il y ait mouvement de ce milieu, c'est le mode le plus simple. Le mécanisme de transfert de chaleur par conduction à lieu à l'échelle microscopique. La loi de Fourier est la loi principale qui décrit le processus de dégagement de chaleur. La relation est donnée comme suit : [31]

$$\phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.18})$$

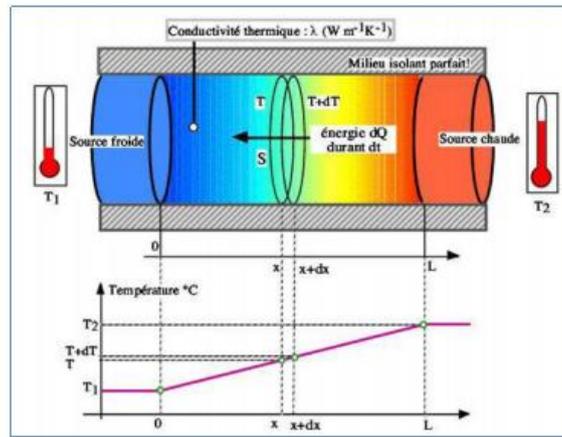


Figure II.3 : principe de la conduction thermique. [32]

**II.3.2. Le transfert par rayonnement :**

Tout corps, quel que soit son état (solide, liquide ou gazeux) émet un rayonnement de nature électromagnétique, dès que celui-ci est à une température supérieure au zéro degrés Kelvin.

Exprimer la relation suivante : [33]

$$\phi = \epsilon\sigma S(T_s^4 - T_a^4) \tag{II.19}$$

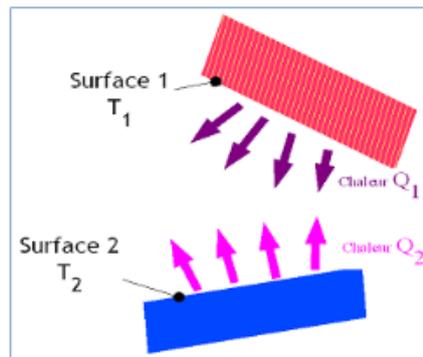


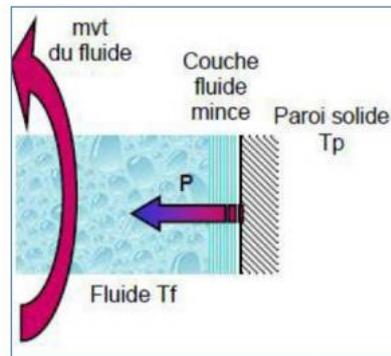
Figure II.4:Principe du rayonnement thermique. [33]

**II.3.3. Le transfert de chaleur par convection :**

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et de mouvement de milieu, elle est considérée comme le mécanisme le plus important de transport de l'énergie entre une surface solide et un liquide ou gaz.

Le flux de chaleur entre la surface chaude et le liquide est proportionnel. Le coefficient d'échange thermique s'appelle la convection et est noté h. Considérant la relation suivante :

$$\phi = h S(T_H - T_S) \tag{II.20}$$



**Figure II.5 :** Action de fluide en mouvement dans la convection. [34]

On distingue trois types de convection par la suite :

#### II.3.3.1. Convection forcée :

La convection forcée dans laquelle le mouvement est provoqué par un procédé mécanique (pompe, ventilateur, etc.) indépendant des phénomènes thermiques, c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide.[31]

#### II.3.3.3. Convection naturelle (libre) :

En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densité due au non uniformité du champ de température. Les couches chaudes, donc de poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, suivant un mécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions à température élevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant. Le phénomène inverse de courants descendants se produit pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud.[35]

#### II.3.3.2. Convection mixte :

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convections sont considérées séparément, du même ordre de grandeur. [22]

#### II.3.4. Les nombres sans dimensions :

Une grandeur sans dimension (ou grandeur adimensionnelle) est une quantité permettant de décrire une caractéristique physique sans dimension ni unité explicite d'expression. Elle est constituée du produit ou rapport de grandeurs à dimensions, de telle façon que le rapport des unités équivaut à un. Ces grandeurs sans dimension interviennent particulièrement en mécanique des fluides et pour la description de phénomène de transfert lorsqu'on utilise la similitude de modèles réduits ou théorie des maquettes et construit l'interprétation des

résultats d'essais. Elles portent le nom de nombres sans dimension, nombres adimensionnels, ou encore de nombres caractéristiques.[35]

Les nombres adimensionnels les plus utilisés dans le domaine de la convection sont :

#### **II.3.4.1. Nombre de Reynolds :**

Le nombre de Reynolds est proportionnel au rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Il peut être exprimé comme :

$$\frac{F_a}{F_\mu} = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{forces de viscosité}} = \frac{\rho L^2 V^2}{\mu L V} = \frac{\rho V L}{\mu} = Re \quad (\text{II.21})$$

Le nombre de Reynolds permet de quantifier les écoulements laminaires et turbulents. Les écoulements à nombre de Reynolds élevé sont généralement turbulents, alors que les écoulements où les forces d'inertie sont faibles par rapport aux forces visqueuses sont plus souvent laminaires. [36]

#### **II.3.4.2. Nombre de Prandtl :**

Le nombre de Prandtl qui est le rapport de la viscosité cinématique  $\nu$  et la diffusivité thermique  $\alpha$ , il caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux, Ce nombre porte le nom de Ludwig Prandtl, physicien allemand :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{II.22})$$

Le nombre de Prandtl compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Un nombre de Prandtl élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. Un nombre de Prandtl faible indique que la conduction thermique est tellement rapide que le profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température. [35]

#### **II.3.4.3. Le nombre de Nusselt :**

Le nombre de Nusselt est proportionnel au rapport entre le transfert thermique total et le transfert par conduction. Il peut être exprimé comme :

$$Nu = \frac{h L}{K} \quad (\text{II.23})$$

On distingue deux différentes formes du nombre de Nusselt :

**a. Le nombre de Nusselt local :**

Représente les taux de transfert locaux de chaleur. Il est défini par :

$$Nu_x = \frac{qL}{k((T_c(x) - T_f))} \quad (\text{II.24})$$

**b. Le nombre de Nusselt moyen :**

Représente le taux moyen. Il est défini par :

$$\overline{Nu} = \frac{\int_0^L Nu_x dx}{\int_0^L dx} \quad (\text{II.25})$$

**II.3.4.4. Le nombre de Rayleigh :**

Est proportionnel entre l'importance relative de la poussée d'Archimède et le produit de la traînée visqueuse par le taux de diffusion thermique. Il peut être exprimé comme :

$$Ra = \frac{g}{\nu\alpha}(T_s - T_\infty)L^3 \quad (\text{II.26})$$

Le nombre de Rayleigh donné en fonction de flux de chaleur  $q$  s'écrit comme suit : [37]

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L \cdot D^4 \cdot q''}{\nu \cdot \alpha \cdot k} \quad (\text{II.27})$$

**II.3.4.5. Nombre de Grashof :**

Le nombre de Grashof est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection naturelle dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. Ce nombre porte le nom de Franz Grashof, ingénieur allemand. On le définit de la manière suivante :

$$Gr = \frac{g\beta\theta L^3}{\nu^2} \quad (\text{II.28})$$

**II.4. Le refroidissement des microcanaux par convection :**

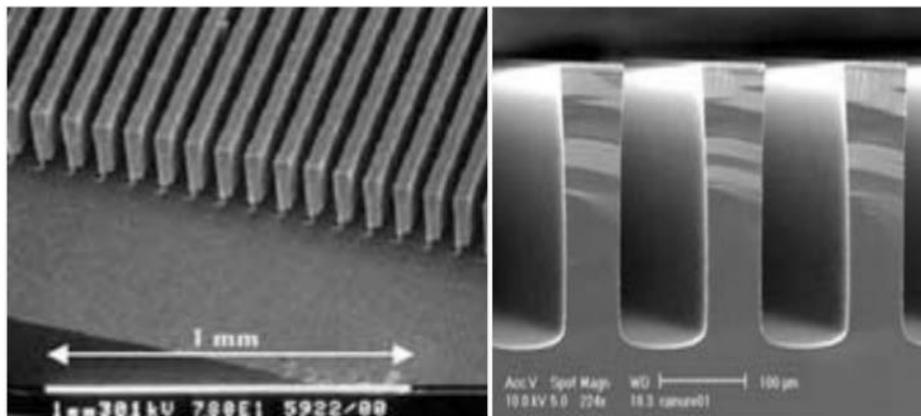
**II.4.1. Introduction aux microcanaux :**

Les systèmes de refroidissement par des échangeurs à microcanaux constituent une méthode innovante efficace pour le transfert de grandes quantités de chaleur à partir de très petites surfaces de l'ordre du centimètre carré vers un fluide caloporteur puis vers le milieu

environnant [38]. Le concept des microcanaux n'est pas nouveau puisqu'il a été introduit vers 1980 par les chercheurs Tuckerman et Pease. Les échangeurs à microcanaux/microstructures constituent donc une méthode innovante pour le transfert de grosses puissances thermiques issues de petites surfaces vers un fluide caloporteur. L'échangeur est couramment fabriqué dans un matériau à haute conductivité thermique comme l'aluminium, le cuivre ou le silicium. Ces canaux sont réalisés par microusinage et autres techniques complexes de micro-fabrication tel que l'ablation laser, le plasma, l'épithaxie, la gravure chimique, l'érosion, le dépôt de vapeur, etc...

Ils ont des dimensions de passage qui varient de 0.01mm à 0.1mm dans lesquels circulera un fluide chargé d'évacuer la puissance absorbée vers un radiateur ou un condenseur.

Ces échangeurs combinent à la fois une énorme surface d'échange par rapport à leurs dimensions générales (rapport surface/volume important), un très grand coefficient d'échange convectif, un faible encombrement, une faible masse et enfin un faible besoin en débit (de quelques mL/min à 1L/min en général). Toutes ses caractéristiques attrayantes les rendent tout à fait adaptés pour être intégrés facilement et pour refroidir efficacement les processeurs, les lasers, les gros électro-aimants, etc. [39]

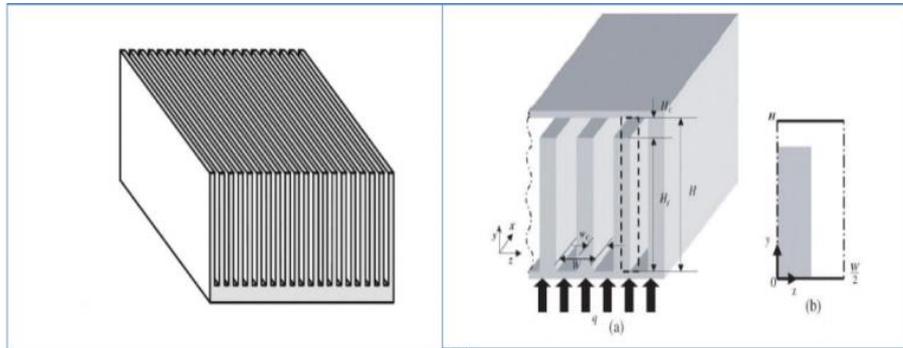


**Figure II.6 :** Exemples des microcanaux.

#### **II.4.2. Définition des microcanaux :**

Le terme « microcanal » désigne des canaux dont le diamètre hydraulique est compris entre 10 et 100µm<sup>2</sup> carré, ce sont des échangeurs de petites surfaces qui mènent à un transfert de grosses puissances thermiques vers un fluide caloporteur. Ils sont constitués d'un dissipateur de chaleur fabriqué d'un solide de grande conductivité thermique tel que le silicium ou le cuivre avec les microcanaux usinés au sein du solide. Un dissipateur de chaleur à

microcanaux contient généralement un grand nombre de microcanaux parallèles. Le liquide de refroidissement est forcé à passer à travers ces canaux pour évacuer la chaleur générée dans la surface chaude en contact avec la paroi inférieure du dissipateur.[40]



**Figure II.7 :** exemples sur le type des microcanaux.[26]

**II.4.3. Classification des microcanaux basée sur le diamètre hydraulique :**

Quelle que soit la forme du canal (circulaire, rectangulaire, etc.), Mehendale et al. Ont proposé, selon la taille du diamètre hydraulique, une classification des canaux en quatre catégories, voir Tableau

**Tableau II.2 :** Classification des canaux par Mehendale et al.[41]

Canal	Diamètre hydraulique
Macro-canaux (conventionnel)	$D_H > 6mm$
Canaux compacts	$1mm \leq D_H < 6mm$
Meso-canaux	$100\mu m \leq D_H < 1mm$
Micro-canaux	$1\mu m \leq D_H < 100\mu m$

**II.4.4. Utilisation des microcanaux dans l'industrie :**

Dans les années actuelles, les principales industries telles que l'aéronautique, l'automobile et électronique sont le moteur du développement de la technologie de gestion thermique compacte et efficace pour les dispositifs électroniques de pointe capables d'augmenter la vitesse de traitement des données.

Les microcanaux sont des éléments de refroidissement compacts qui peuvent fournir une augmentation des taux de dissipation de la chaleur et une réduction des gradients de température ausein des composants électroniques. En raison des performances à dissiper les

quantités importantes de chaleur produites par les processeurs ou d'autres petits appareils électroniques, le dissipateur de chaleur à microcanaux (DCMC) a reçu l'attention de nombreuses études au cours des dernières décennies. [40]

### **II.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous présentons en détail les nanofluides utilisés au cours de la dernière décennie, leur préparation, leurs propriétés thermophysiques, ces avantages et ces inconvénients, et leurs applications dans de nombreux problèmes, ainsi que des généralités sur le transfert de chaleur dans les microcanaux.

# *Chapitre III*

---

## *Modélisation mathématique*

### III.1. Introduction :

L'étude d'un phénomène physique passe par la formulation des lois sous forme d'équations mathématiques reliant les différentes variables intervenant dans le déroulement du phénomène.

En général, ces équations sont : l'équation de continuité qui traduit le principe de conservation de masse, les équations de Navier-Stokes qui traduisent le principe de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie qui représente le principe de conservation de l'énergie. La description d'un problème donné passe aussi par la définition d'un certain nombre de conditions aux frontières et si le processus est stationnaire par des conditions initiales.

### III.2. Description du problème :

#### III.2.1. La géométrie de problémé :

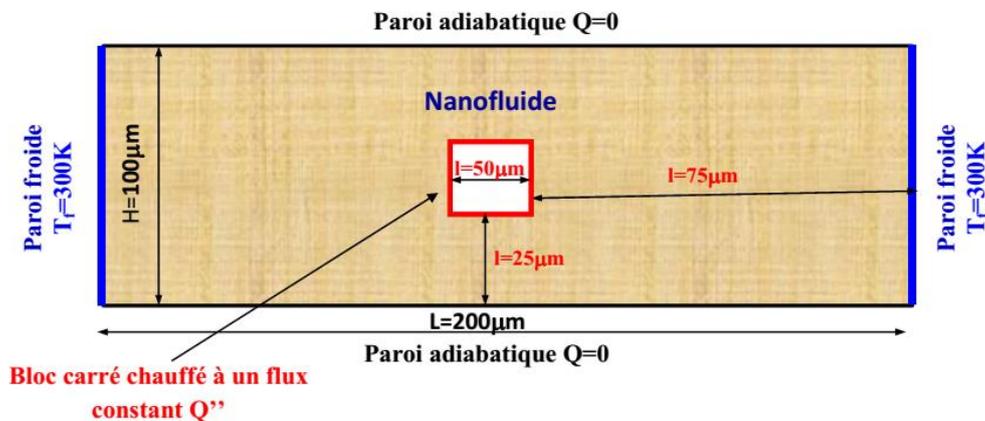


Figure III.1 : Géométrie du problème étudié.

La géométrie du problème considérée est représentée sur la Figure (III.1). Elle est basée sur une cavité fermée avec des dimensions ( $200 \times 100 \mu\text{m}^2$ ), où les parois verticales sont maintenues à une température constante froide  $T_f=300\text{K}$ , les autres parois sont isolées thermiquement, l'enciente est remplie de deux différents nanofluides (Cu-eau) et ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) équipée d'un bloc carré au centre de la cavité chauffée à un flux constant  $Q''$ . Les simulations numériques sont effectuées pour des nombres de Rayleigh,  $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$  et  $10^6$ , avec différentes fractions volumiques  $\phi = 0.00, 0.05, 0.10, 0.15$  et  $0.20$ . Enfin, nous

avons résumés dans le tableau (III.1), Tous les propriétés thermique et physique de différents constituants pour chaque nanofluide utilisé dans notre simulation numérique.

**Tableau III.1 :** Propriétés thermo physiques de l'eau et des nanofluides utilisées.

	eau pur	Cu	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
$\rho_{nf}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f=997.1$	$\rho_p=8933$	$\rho_p=3970$
$\beta_{nf}$	$\beta_f=0.00021$	$\beta_p=1.67 \cdot 10^{-5}$	$\beta_p=0.85 \cdot 10^{-5}$
$CP_{nf}$ (j/kg.k)	$CP_f=4179$	$CP_p=385$	$CP_p=765$
$K_{nf}$ (w/mk)	$K_f=0.613$	$K_p=401$	$K_p=40$
$\mu_{nf}$	$\mu_f=0.001$	$\mu_p= /$	$\mu_p= /$
$\nu_{nf}$ (m <sup>2</sup> /s)	$\nu_f=1.00 \cdot 10^{-6}$	$\nu_p= /$	$\nu_p= /$

Les propriétés thermophysiques des nanofluides sont exprimées par les expressions ci-dessous :

**Densité :**

$$\rho_{nf}=(1-\phi)\rho_f+\phi\rho_p \quad (III.1)$$

**Coefficient d'expansion :**

$$\beta_{nf} = \frac{(1-\phi)(\rho_f \cdot \beta_f) + \phi(\rho_p \cdot \beta_p)}{\rho_{nf}} \quad (III.2)$$

**Chaleur spécifique :**

$$CP_{nf} = \frac{(1-\phi)(\rho_f \cdot CP_f) + \phi(\rho_p \cdot CP_p)}{\rho_{nf}} \quad (III.3)$$

**Conductivité thermique :**

$$K_{nf} = K_f \left( \frac{(K_p + 2K_f) - 2\phi(K_f - K_p)}{(K_p + 2K_f) + \phi(K_f - K_p)} \right) \quad (III.4)$$

**Viscosité dynamique :**

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} = \rho_{nf} \cdot Pr_{nf} \cdot \alpha_{nf} \quad (III.5)$$

**Diffusivité thermique :**

$$\alpha_{nf} = \frac{K_{nf}}{\rho_{nf} \cdot C p_{nf}} \quad (\text{III.6})$$

**Viscosité cinématique :**

$$\nu_{nf} = \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \quad (\text{III.7})$$

### III.3. Formulations mathématique du problème :

#### III.3.1. les équations généralisées :

##### a. Equation de continuité :

En mécanique des fluides, la loi de conservation de masse pour un volume de contrôle matériel peut exprimer par l'équation de continuité. L'équation s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{III.8})$$

$\vec{V}$ : le vecteur de vitesse.

##### b. Equation de quantité de mouvement :

En mécanique des fluides, Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. L'équation s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{d}{dt} (\rho V) = \rho F - \frac{dp}{dx} + \mu \text{div}(\overrightarrow{\text{grad}} V) \quad (\text{III.9})$$

$\frac{d}{dt} (\rho V)$  : Taux de variation de la quantité de mouvement pendant l'unité de temps.

$F$  : Forces du volume .

$\frac{dp}{dx}$  : Forces de pression.

$\mu \text{div}(\overrightarrow{\text{grad}} V)$ : Force de viscosité.

**c. Equation de conservation d'énergie:**

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique.

Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\frac{d}{dt}(\rho C_p T) = \Delta(K \cdot T) + q + \beta T \frac{dp}{dt} + \mu \phi \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$\frac{d}{dt}(\rho C_p T)$  : La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(K \cdot T)$  : La variation d'énergie par conduction.

$q$  : Puissance volumique dissipée.

$\frac{dp}{dt} \beta T$  : La variation d'énergie due à la compressibilité.

$\mu \phi$  : La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

**III.3.2. les hypothèses de l'écoulement dans les microcanaux :**

Afin d'établir un modèle mathématique simplifié de contrôle de la convection naturelle dans les nanofluides, nous avons adopté les hypothèses suivantes :

- ❖ Écoulement bidimensionnel (suivant les coordonnées cartésiennes  $x$  et  $y$ ).
- ❖ Le nanofluide est visqueux, newtonien et incompressible.
- ❖ Régime stationnaire et laminaire.
- ❖ Les propriétés physiques des nanofluides sont constantes.
- ❖ Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable.
- ❖ Les propriétés thermophysiques prises en considération sont constantes pour le nanofluide, à l'exception de la variation de densité dans les forces de flottabilité ( $\rho g$ ) qui est déterminée par l'approximation de Boussinesq. Elle considère que les variations de masse volumique sont négligeables au niveau de tous les termes des équations de quantité de mouvement ( $\rho = \rho_0$ ), sauf au niveau du terme de gravité. La variation de  $\rho$  en fonction de la température est donnée comme suit :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (\text{III.11})$$

**III.3.3. les équations du problème :**

**a. Equation de continuité:**

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \tag{III.12}$$

**b. Equation de quantité de mouvement :**

Equation de la conservation de quantité de mouvement suivant x :

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[ -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \right] \tag{III.13}$$

Equation de la conservation de quantité de mouvement suivant y :

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[ -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - g(\beta\rho)_{nf}(T - T_0) \right] \tag{III.14}$$

**c. Equation de l'énergie:**

L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le principe de la conservation de l'énergie dans la direction x et y comme suit :

$$U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{III.15}$$

**III.3.4. Les conditions aux limites :**

La condition de non-glissement des parois permet d'écrire :

$$U=0, V=0 \text{ En } x=L \text{ et } y=0$$

$$U=0, V=0 \text{ En } x=0 \text{ et } y=H$$

**Tableau III.2.** Conditions aux limites thermiques.

Limite suivant		Conditions thermiques
x	y	
$x=0$ $\forall y,$ $x=L$	$0 \leq y \leq H$	$T = T_f = 300$
$0 \leq x \leq L$	$\forall x,$ $y=0$ $y=H$	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ , Système adiabatique (Q=0)
$\forall y, \begin{cases} x = 125 \mu m \\ x = 75 \mu m \end{cases}$ $75 \mu m \leq x \leq 125 \mu m$	$25 \mu m \leq y \leq 75 \mu m$ $\forall x, \begin{cases} y = 25 \mu m \\ y = 75 \mu m \end{cases}$	" un flux constant Q"

**III.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons exposé le modèle physique examiné et les équations qui régissent ce modèle physique, ensuite nous avons spécifié les conditions aux limites de tous la frontière du domaine de l'écoulement pour résoudre les équations de la mécanique des fluides qui se font par l'utilisation des méthodes numériques où intervient le concept de la discrétisation.

# *Chapitre IV*

---

## *Simulation numérique*

### IV.1. Introduction :

Après des années le développement des ordinateurs a encouragé les scientifiques à résoudre des problèmes de plus en plus complexes pour lesquelles les solutions analytiques ne peuvent être trouvées. Ces types de problèmes sont généralement modélisés par des équations aux dérivées partielles (E.D.P) non-linéaires.

Ce chapitre est dédié à la modélisation de l'écoulement et du transfert thermique. On traite de l'étude du refroidissement des microcanaux par convection naturelle, principalement à l'aide du logiciel Workbench ANSYS qui est spécialement destiné à la dynamique des fluides numérique (CFD), CFD «computational fluid dynamics» ensemble des méthodes numériques pour obtenir une solution approchée pour des problèmes de la dynamique des fluides et transfert de chaleur. Les équations de la mécanique des fluides sur ceux resaluent par des méthodes numériques. Les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie sont résolues par la méthode des volumes finis, en utilisant le code de calcul FLUENT.

### IV.2. Procédures du calcul :

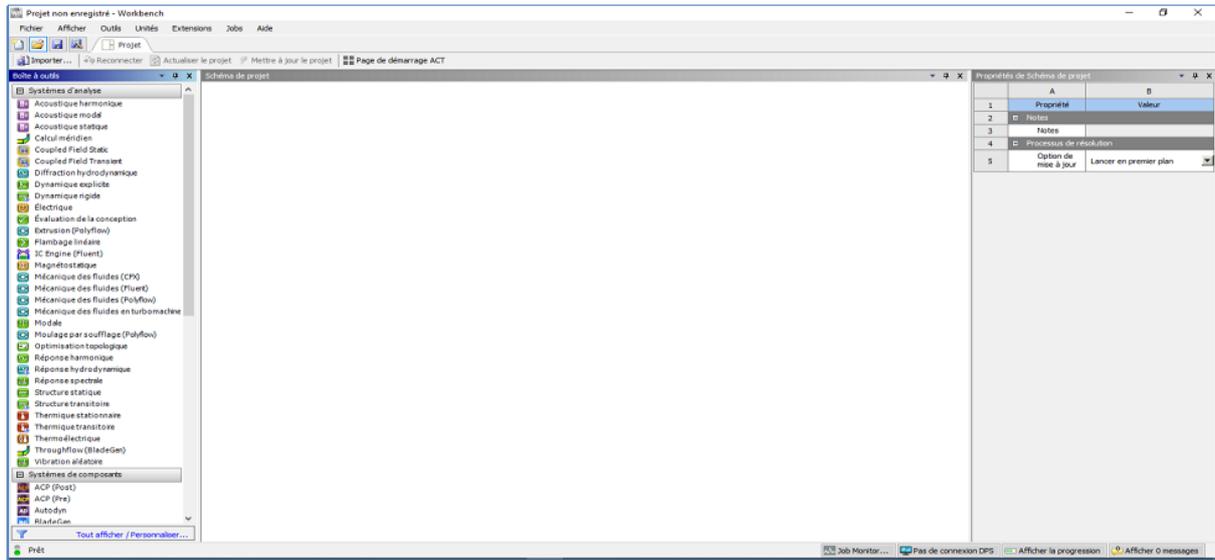
Le Workbench est un logiciel permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique.



**Figure IV.1.** Fenêtre lancement du logiciel.

La structure générale du logiciel est présentée ci-dessous :

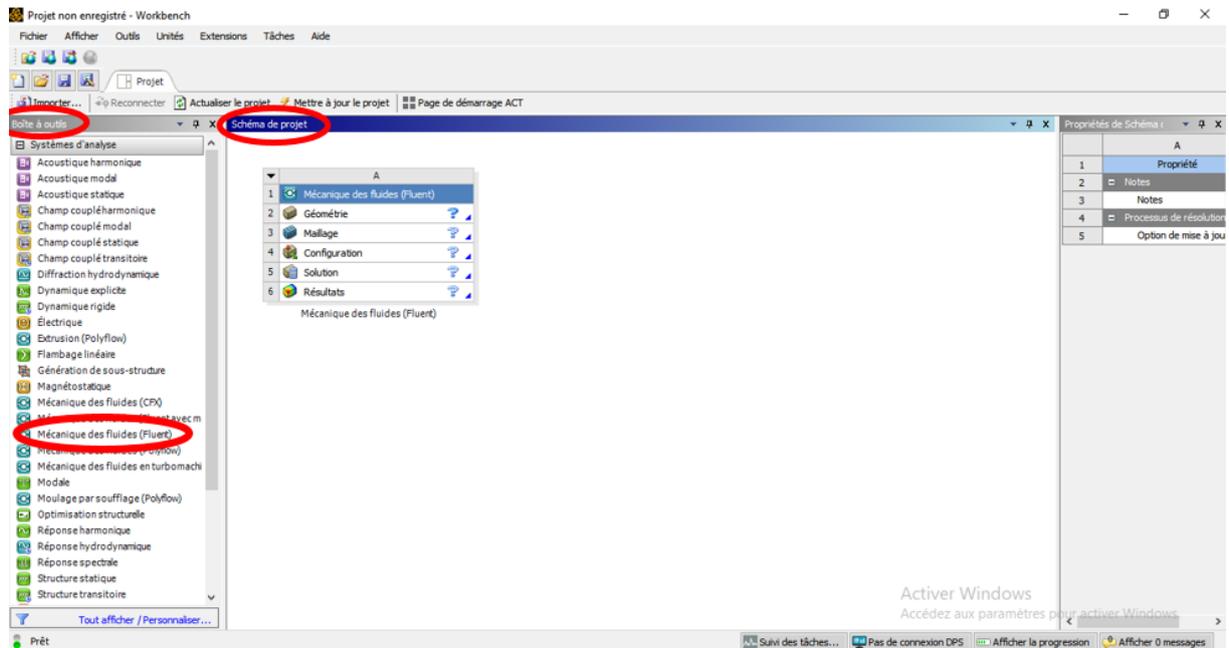
**IV.2.1. Menu principale de logiciel ANSYS Workbench :**



**Figure IV.2.** Menu principal de Workbench.

L'ouverture du logiciel fait apparaître le menu principal ci-dessous :

La barre d'outils donne accès à plusieurs systèmes pour l'analyse. Pour commencer à glisser une analyse en mécanique du fluide (fluent) au schéma de projet.



**Figure IV.3.** Création d'une analyse (projet) en mécanique de fluide.

Les étapes de calcul se composent de 5 étapes :

**1. Géométrie** : utilisé pour importer ou de créer ou de modifier ou de mettre à jour un modèle qui peut être utilisé pour l'analyse.

**2. Maillage** : cette cellule est liée à la définition de la géométrie, systèmes de coordonnées et réseau de communication et du maillage dans le module de simulation mécanique, En plus de déclarer des certaines propriétés physiques des certains matériaux.

**3. Configuration** : permet de définir les charges et conditions aux limites et une autre configuration pour l'analyse.

**4. Solution** : cette cellule permet d'accéder aux données de résolution.

**5. Résultats** : cette cellule combine les résultats de l'analyse.

#### IV.2.2. Création de la géométrie :

Pour créer une géométrie avec ANSYS Workbench double-clique sur la géométrie pour ouvrir le module de création géométrique « **Design Modeler** » figures : ( IV.4), (IV.5), (IV.6)

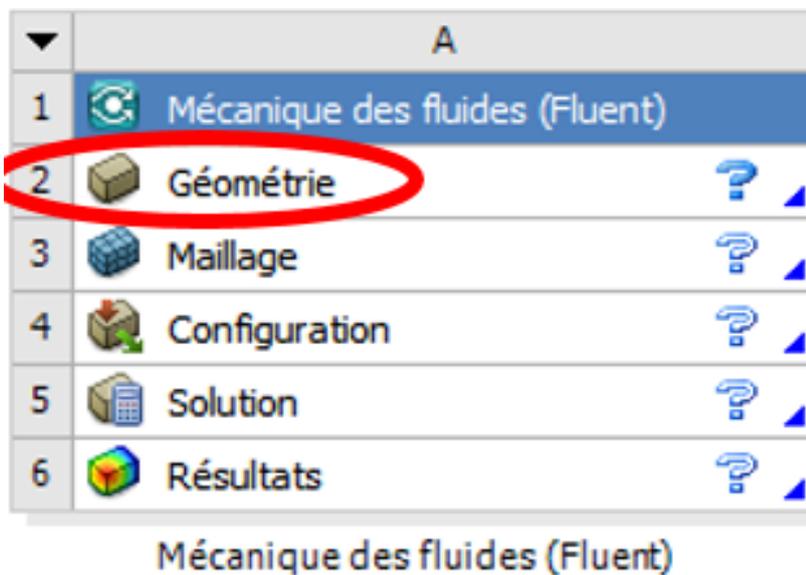


Figure IV.4. Création d'un projet en mécanique de fluide.

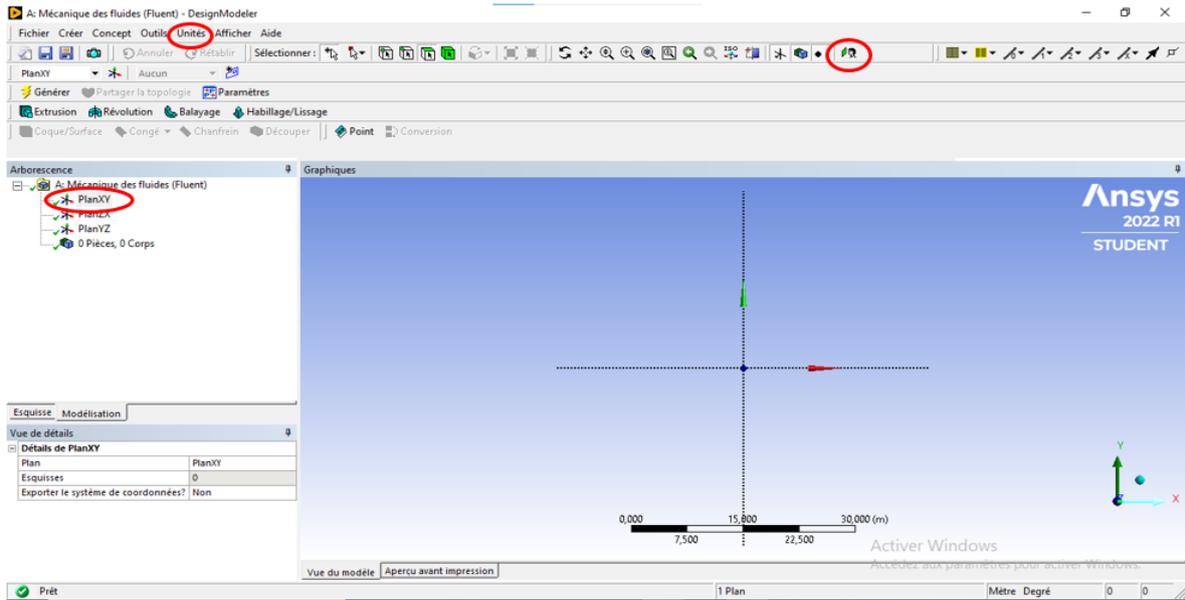


Figure IV.5. Création d'un modèle géométrique (Design Modeler).

Il faut choisir le type d'analyse 2D OU 3D.

Après l'ouverture du module de création une géométrie, nous sélectionnons à partir la liste du « Unités » le micromètre ( $\mu\text{m}$ ) comme unité de dimension. Par la suite, On choisit le plan et la vue sur laquelle on va travailler. En cliquant sur le plan XY, et sur dans la barre d'outils.

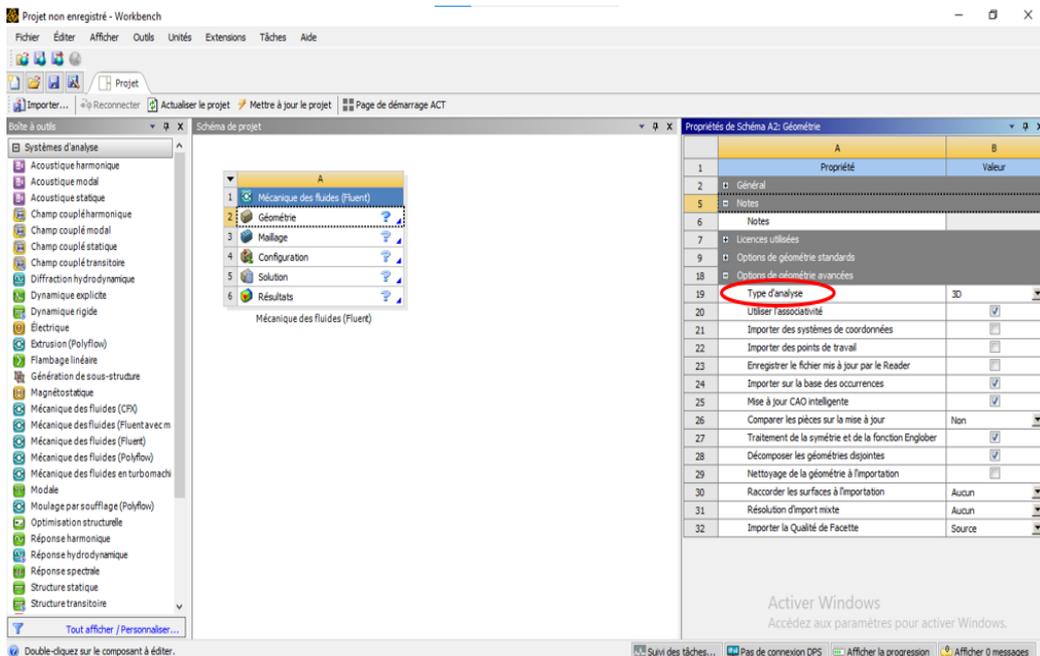


Figure IV.6. Création d'un modèle (plan de vue).

Pour dessiner la géométrie étudiée on clique sur la boîte à outils esquisse qui va permettre de créer la géométrie d'ajouter des dimensions et la contraindre :

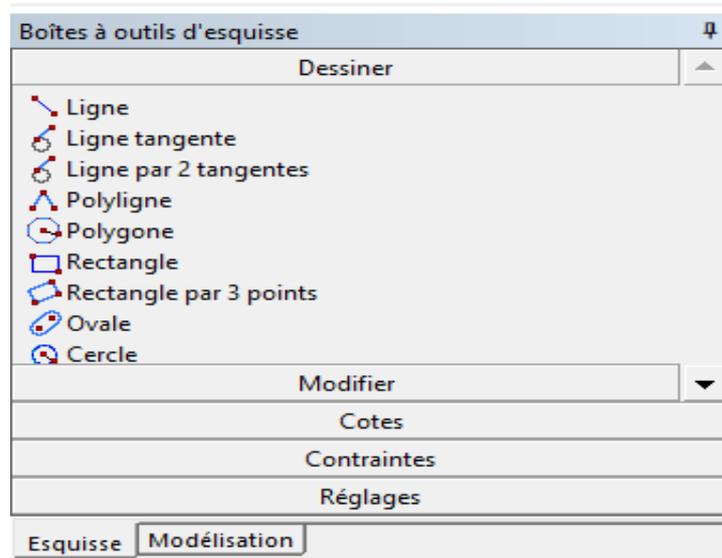


Figure IV.7. Création d'esquisse.

Dans la boîte à outils esquisse on clique sur la forme du rectangle et fait le dessin dans le plan que nous avons choisi, puis sélectionnons les cotes à la géométrie comme suit :

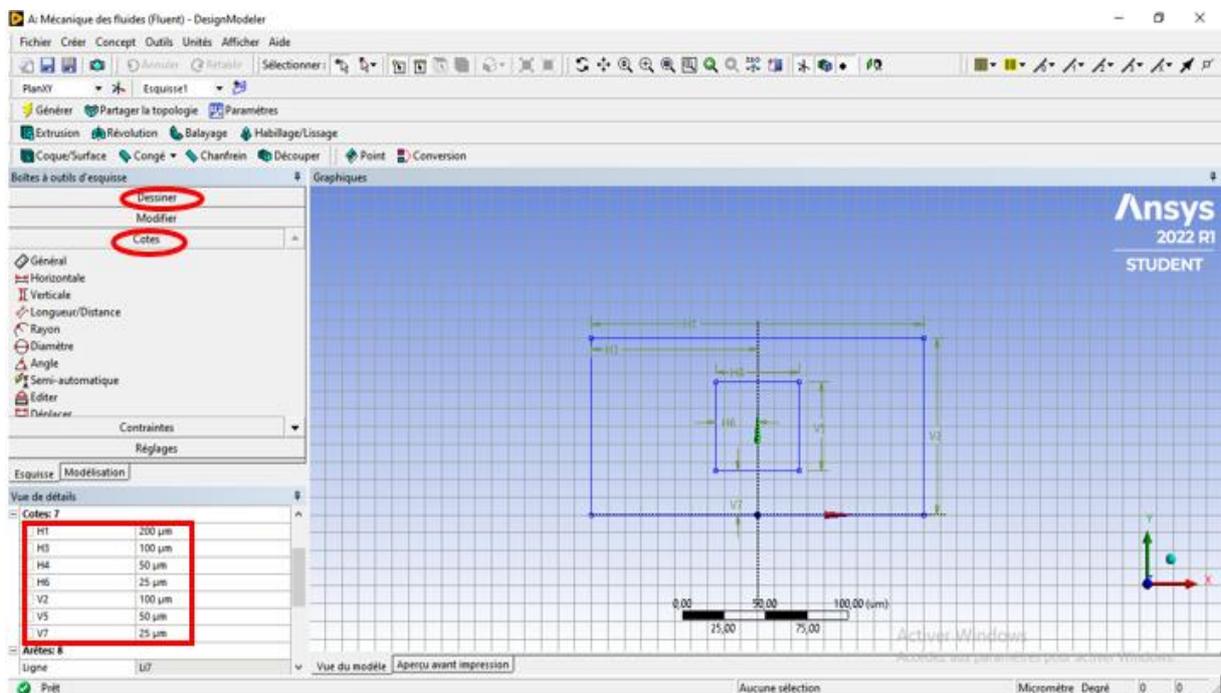


Figure IV.8. Création d'esquisse et Définition des côtes.

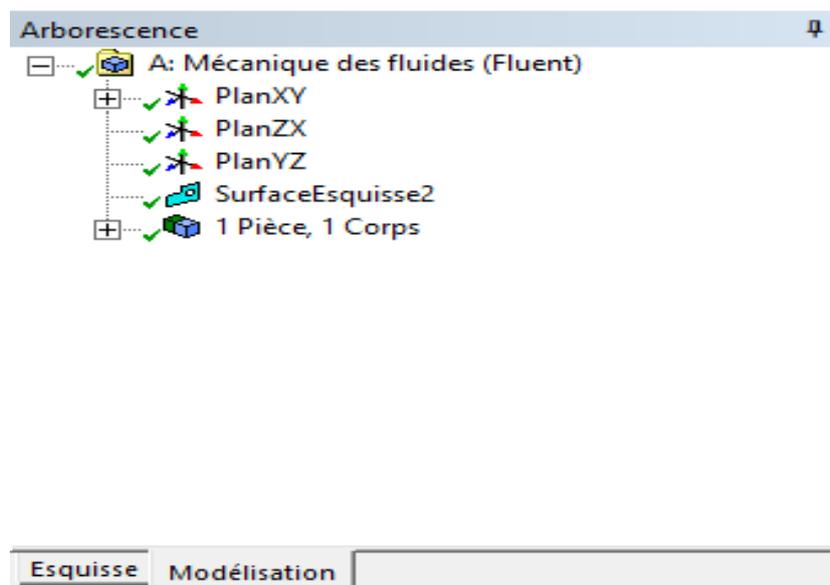


Figure IV.9. Opération effectué.

Dans le schéma de projet après réaliser et terminer d'exécuter tous les opérations, on aura cette notification que la création dans design modeler à réussi.

L'option signifier que notre géométrie réaliser est prêt pour le maillage.

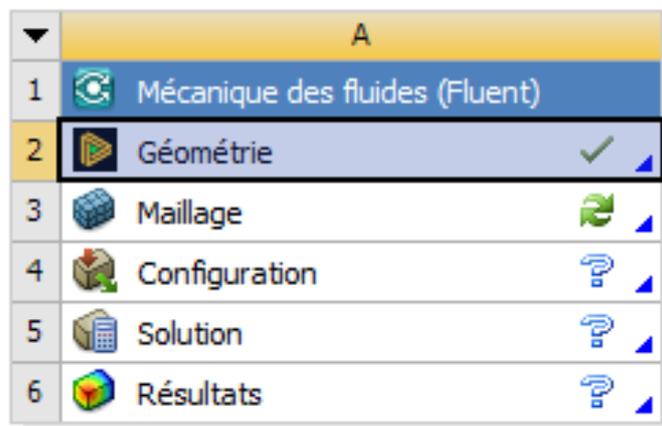


Figure IV.10. Schéma de projet.

### IV.2.3. Le maillage :

Dans le schéma de projet ANSYS Workbench, double-clique sur la cellule maillage dans le système d'analyse mécanique des fluides.

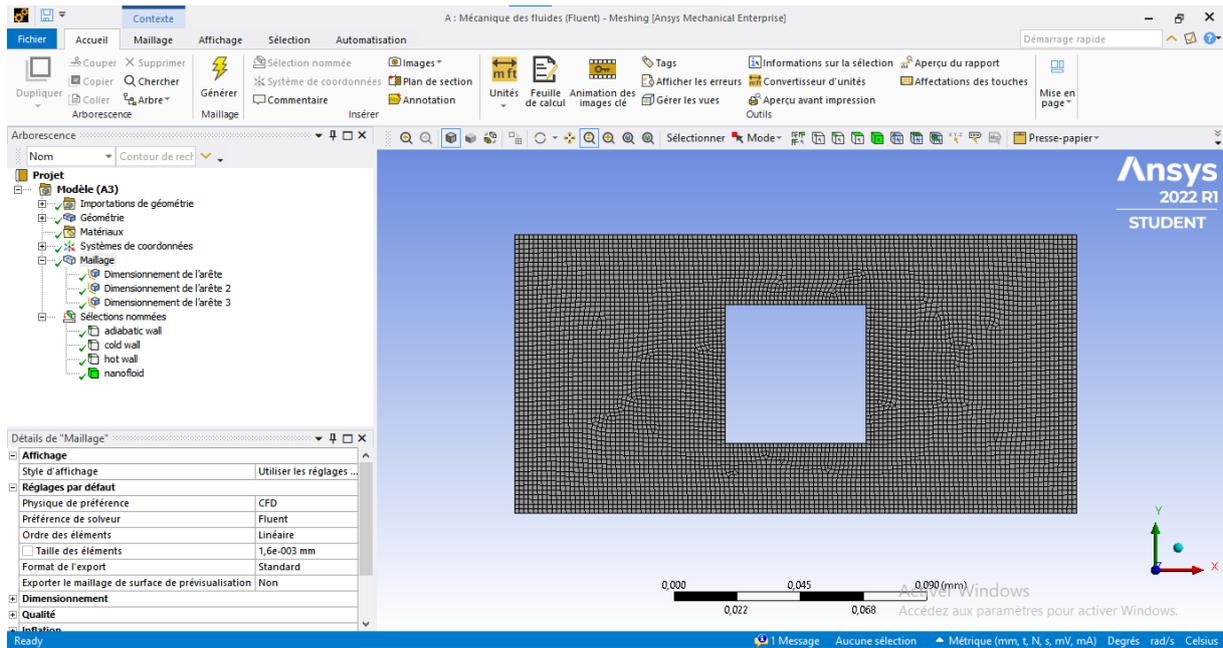


Figure IV.11. Maillage.

- En définissant les conditions aux limites de la géométrie afin de simplifier notre travail plus tard dans ANSYS Fluent, on doit étiqueter chaque limite dans la géométrie en créant des sélections nommées pour les entrées, la sortie et la surface de symétrie de la géométrie. (Les limites de paroi extérieure sont automatiquement détectées par ANSYS Fluent).
- Sélectionnez la grande entrée dans la géométrie qui est affichée dans ANSYS maillage.
- Faites un clic droit et sélectionnez l'option Créer la Sélection nommée.
- Pour chaque étape de la sélection nommée on doit sélectionner l'option arête 
- Sélectionner la arête en cliquant le bouton droite cette opération elle est exécutable pour toutes les sélections nommées de ce problème : cold Wall, hot Wall, adiabatic wall .
- Pour sélectionner la géométrie de l'espace rempli par nanofluide on doit cliquer sur face  puis sélection zone.
- Lorsque la marque ( ✓ ) apparaît sur le maillage dans le schéma de projet c'est-à-dire on peut aller à l'étape suivante qui sera affichée par la marque (  ).
- Sauvegarder et quitter le maillage ANSYS workbench et passer maintenant à la configuration et l'analyse sur CFD en ANSYS Fluent .

#### IV.2.4. Configuration :

Dans le schéma de projet ANSYS Workbench, double-clique sur la cellule d'installation configuration dans mécanique des fluides.

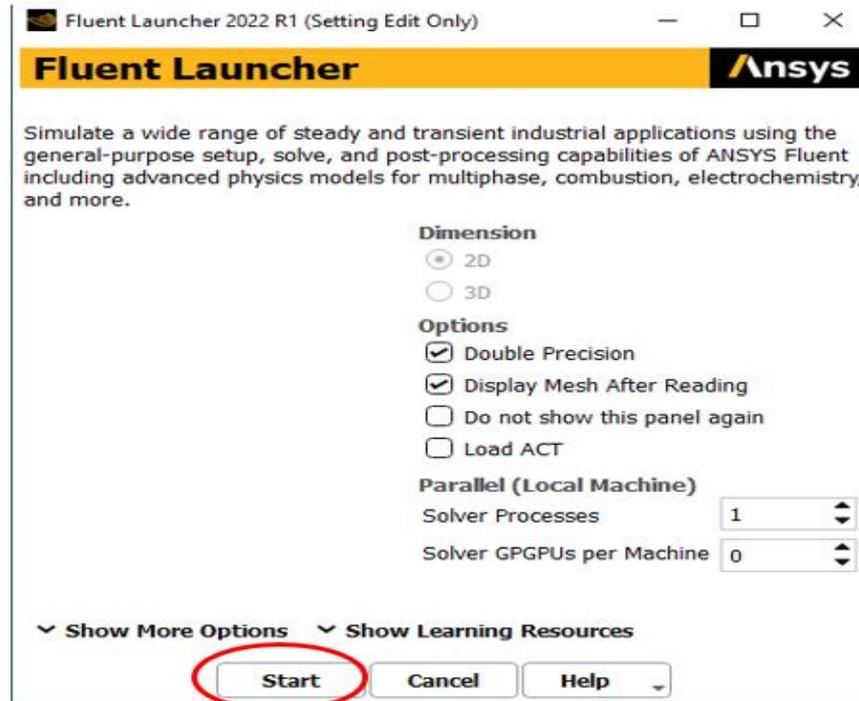


Figure IV.12. Configuration de la simulation sur fluent.

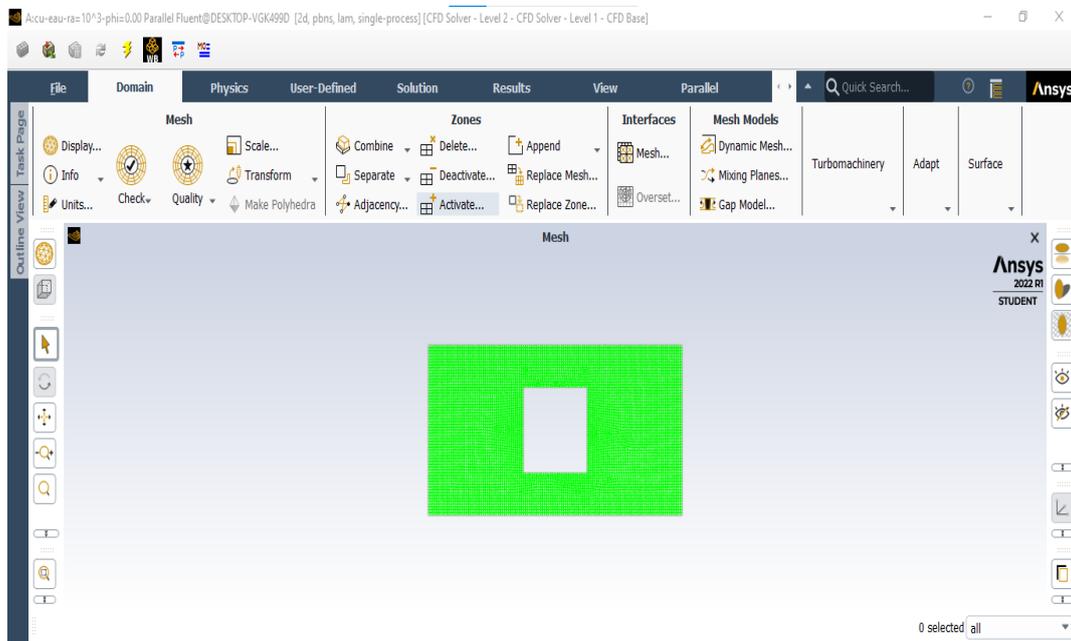


Figure IV.13. ANSYS FLUENT.

a. Définissez les paramètres généraux de l'analyse CFD :

Cliquez sur Général pour ouvrir la page des tâches générales setup → Général

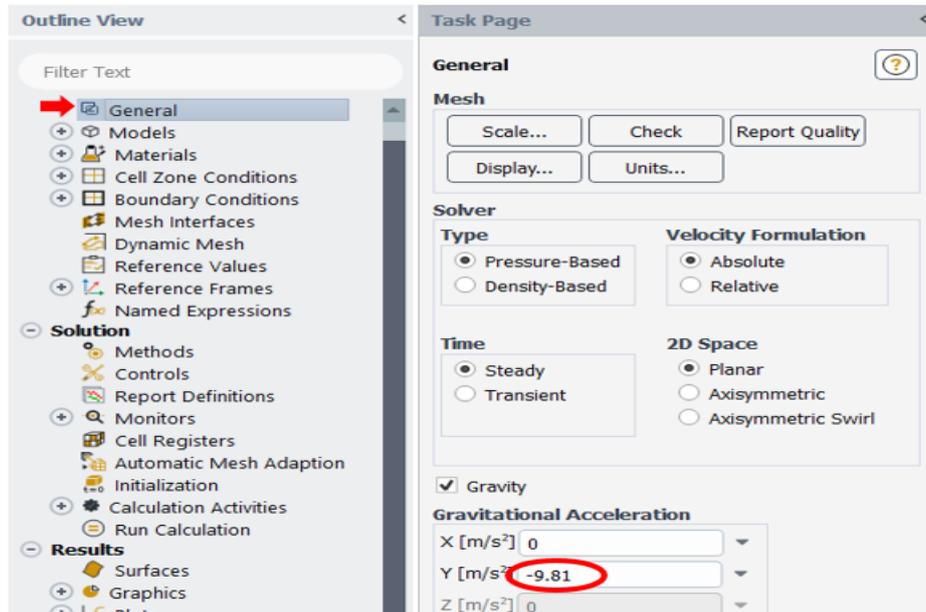


Figure IV.14. Paramètre générale de la CFD.

b. Réglage du Modèle d'écoulement :

On spécifie le modèle d'écoulement laminaire et l'équation d'énergie utilisant :

Setup → Général

- ✓ On double clic sur Viscous- laminaire est on sélectionneLaminar.
- ✓ On double clic sur Energy est on sélectionneenergy equation.

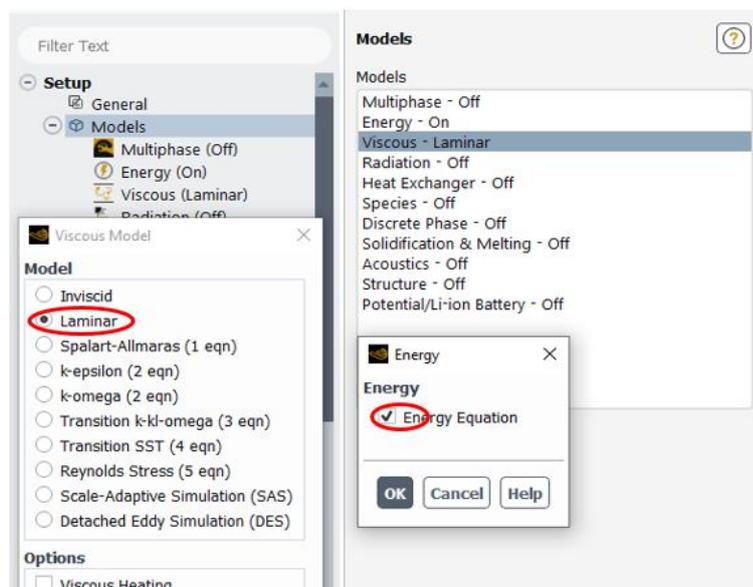


Figure IV.15. Réglage du modèle d'analyse.

**c. Materials :**

- ✓ On définit la matière en utilisant setup → Materials.
- ✓ On clique sur fluide pour ouvrir la fenêtre Create/Edit Materials.
- ✓ On clique sur fluent data base pour choisir le fluid (materials).

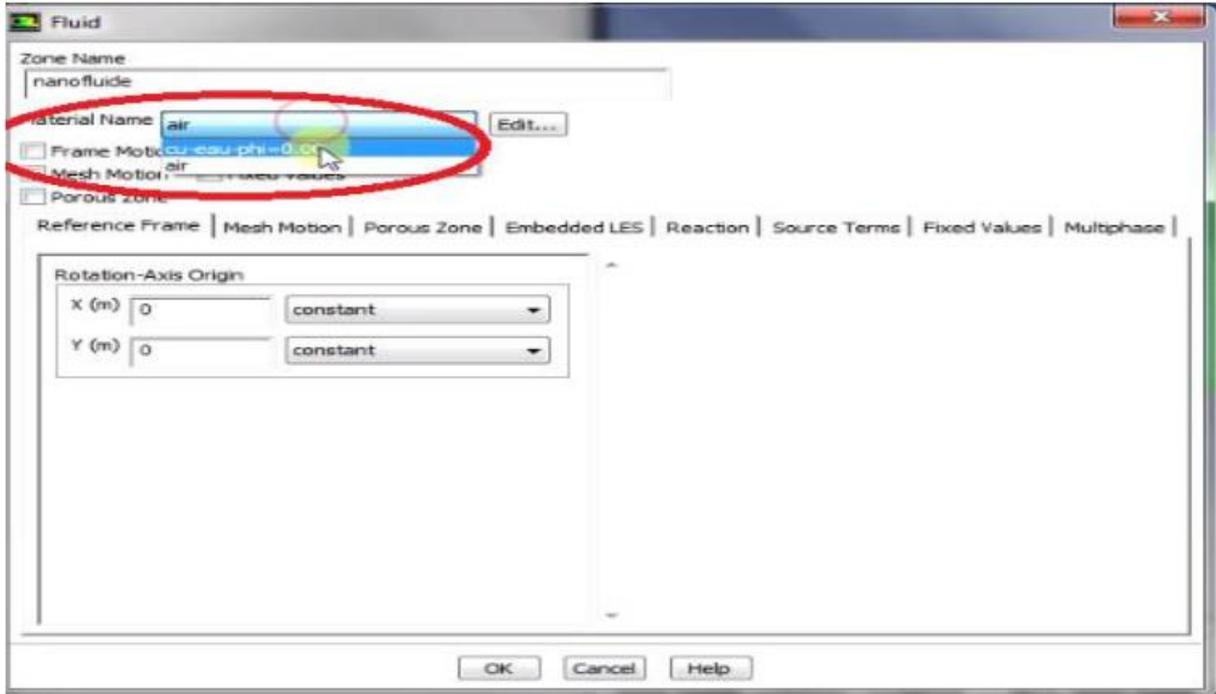


Figure IV.16. Choix de matériaux.

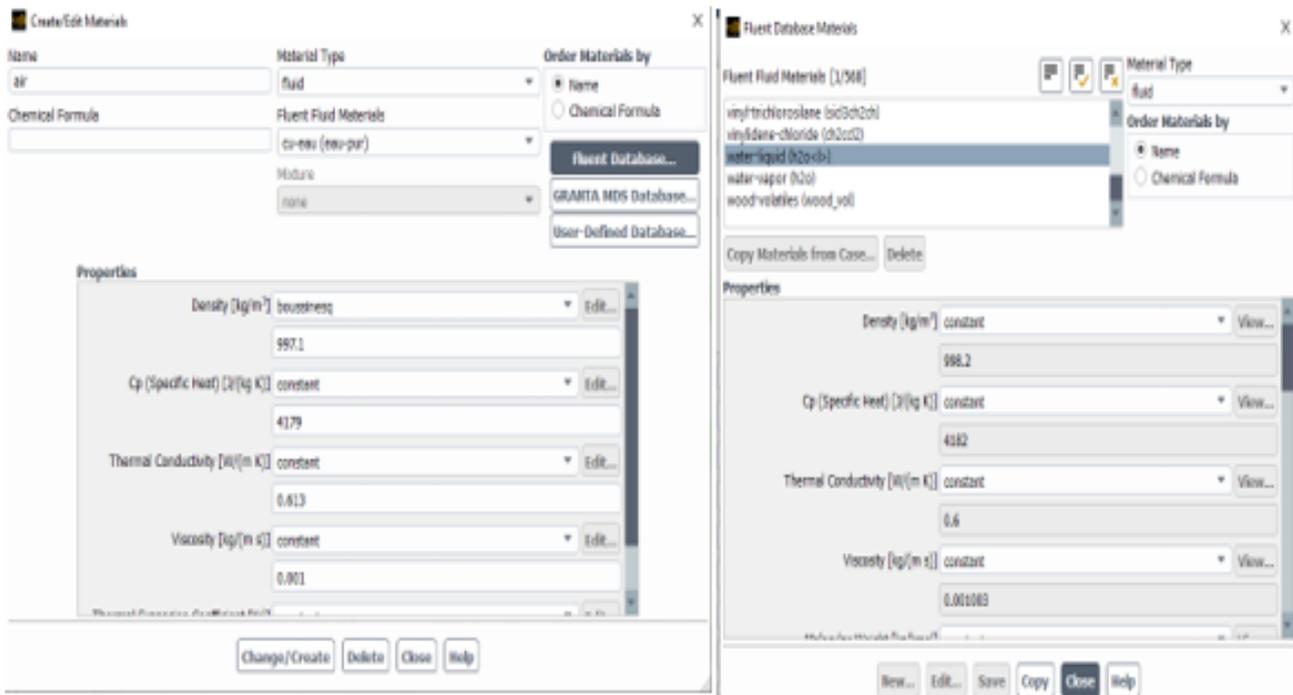


Figure IV.17. sélection zone fluide.

- ✓ On clique sur copy.
- ✓ On change name, chemical formule, les propriétés thermiques et physiques pour chaque type de nano fluide.
- ✓ On clique sur Change/Create.

**d. Mettre en place les conditions de la zone de la cellule pour la simulation CFD :**

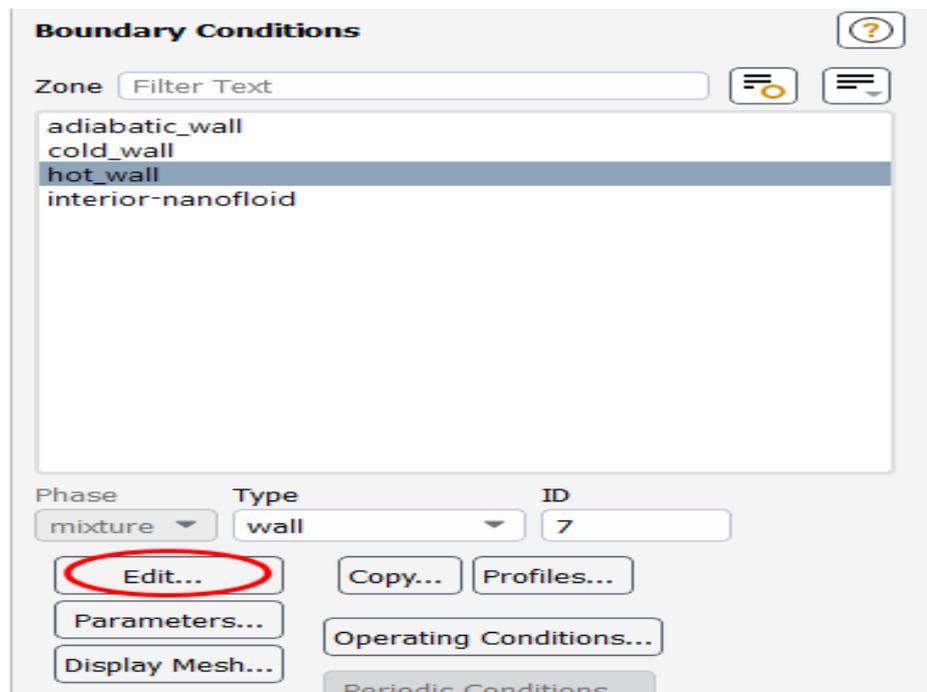
Nous avons identifié à nano fluide sur la surface du corps :

- ✓ Pour change cell zone conditions en utilisant setup → cell zone conditins.
- ✓ Double-clique sur nanofluide est on change materialname.

**e. Les conditions aux limites (Boundry Conditions) :**

- ✓ Pour change les conditions aux limites en utilisant setup → Boundry Condition.
- ✓ Double-clique sur la zone que l'on veut changer, Nous avons identifié les conditions aux limites suivantes :

- ❖ Les plaques verticales (cold wall) :  $T_f=300k$ .
- ❖ les autres parois (adiabaticwall) sont isolées thermiquement et considérées comme adiabatiques.
- ❖ La plaque chauffée (hot wall) : on entrée la valeur de le flux de chaleur.



**Figure IV.18.**condition aux limites.

**IV.3. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une explication détaillée d'Ansys et comment l'utiliser, les étapes de calcul par le logiciel utilisant la simulation numérique par CFD.

Nous avons intéressé dans nos résultats par le champ thermique et le champ de vitesse, les lignes de courant et le nombre de Nusselt, qui sera affichées, interprétées et discutées dans le chapitre suivant.

# *Chapitre V*

---

## *Résultats et discussion*

**V.1. Introduction :**

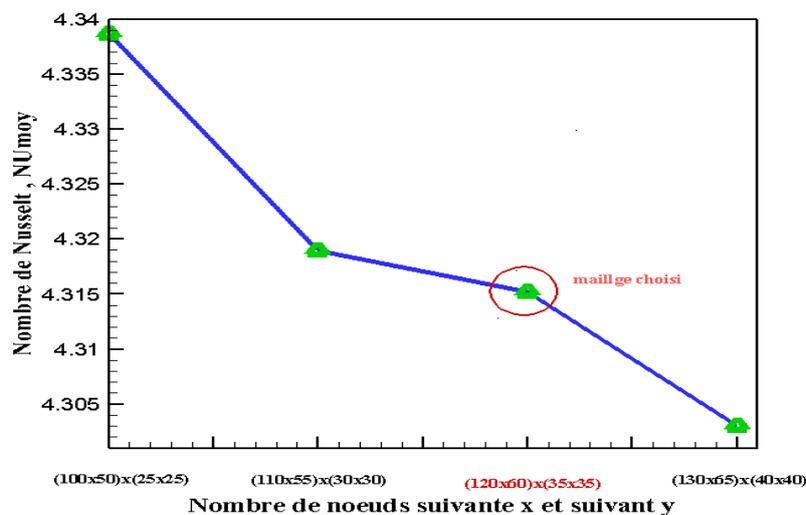
Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'études numériques de convection naturelle, stationnaire et bidimensionnelle d'écoulement laminaire nanofluidique dans des microcanaux en cavités fermées. Les deux parois verticales de la cavité sont maintenues à base température  $T_f = 300$  k, les autres parois sont considérées comme adiabatiques. Le transfert de chaleur est assuré par l'échauffement d'un bloc carré placée au centre de la cavité imposé à un flux constant  $Q''$ .

**V.2. Effet de maillage :**

Le premier travail à accomplir dans la réalisation d'une simulation numérique est la définition d'un maillage adapté à l'écoulement, car sa qualité dépend la précision des résultats. Différents maillages uniformes sont pris en considération dans cette étude, pour inspecter l'indépendance du maillage et pour garantir l'exactitude et la fiabilité de la solution numérique avant de passer aux calculs, nous avons considérés quatre maillages différents (différents nombre de nœuds), pour un nanofluide (Cu-eau),  $\phi = 0.05, Q'' = 25.10^8$  w/m<sup>2</sup> et  $Ra = 10^5$ . Les résultats de cette étude sont exposés dans le tableau V.1 et la figure V.1.

**Tableau V.1 : Effet maillage.**

	Effet maillage			
Maillage	(100x50)(25x25)	(110x55)(30x30)	(120x60)(35x35)	(130x65)(40x40)
$Nu_{moyen}$	4.338621	4.318976	4.315195	4.302974



**Figure V.1 : Convergence du Nombre de Nusselt moyen le long de la partie chauffée.**

A partir du tableau (V.1) et de la figure (V.1) il apparaît que le nombre de Nusselt moyen devient insensible au nombre de nœuds à partir de la grille (120x60)(35x35) nœuds. En conséquence, nous avons choisi le maillage (120x60)(35x35), pour des raisons de précision de calcul afin d'obtenir des solutions parfaites et des meilleurs résultats.

### V.3. Interprétation et discussion des résultats :

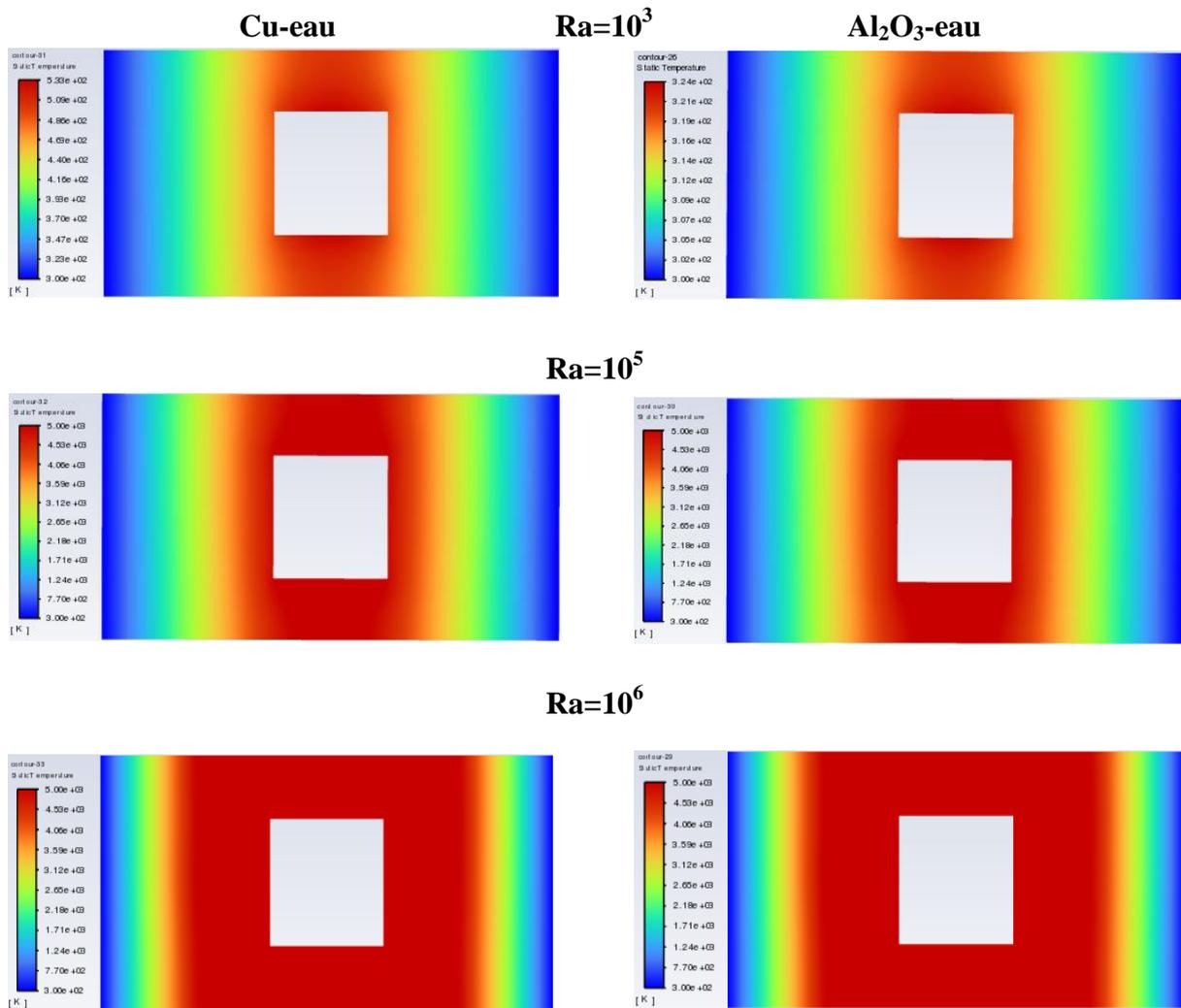
On a étudié quatre effets sur la structure dynamique et thermique de l'écoulement laminaire du nanofluide dans une cavité. Ces deux parois verticales sont maintenues à une température froide  $T_f=300K$  et les autres parois sont considérés adiabatiques. Le transfert de chaleur est assuré par l'échauffement d'un bloc carré placée au centre de la cavité imposée à un flux constant  $Q''$ . Ces effets sont :

- Effet de la fraction volumique du nanofluide.
- Effet du nombre de Rayleigh.
- Effet de type des nanoparticules.
- Effet de la géométrie.

#### V.3.1. Champs thermique:

##### a. la température :

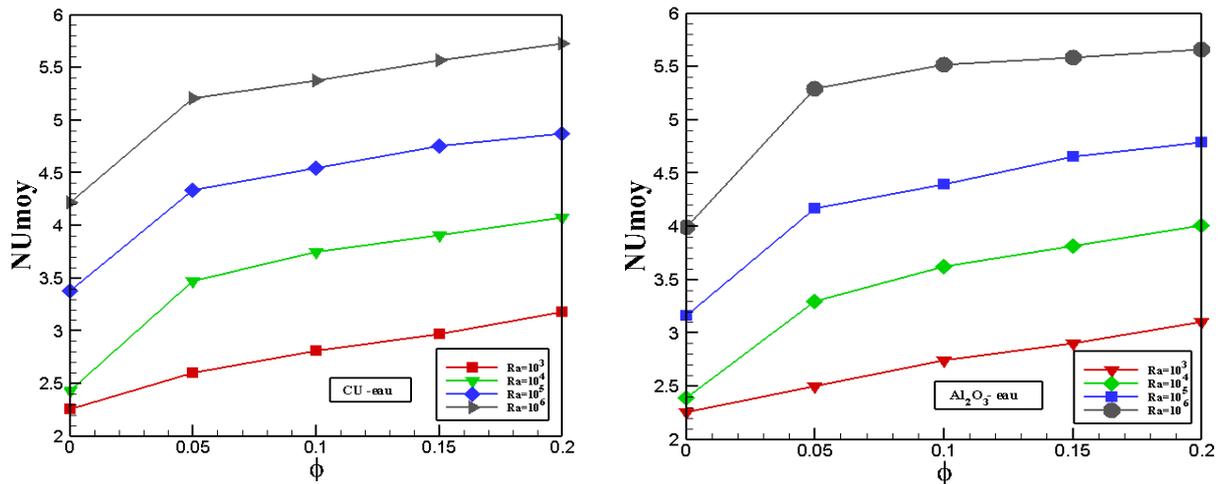
La figure (V.2) illustrent les contours de température pour l'enceinte remplie deux nanofluides (cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) avec une fraction volumique  $\phi = 0.10$  pour différents nombre de Rayleigh ( $Ra=10^3, 10^5$  et  $10^6$ ). La température est observée relativement élevée dans la partie centrale de l'enceinte en raison de l'emplacement de bloc carré chauffé ce qui a également affecté à la direction du transfert de chaleur vers les côtés par l'apparition de cellules au centre. On peut également remarquer que les isothermes sont plus serrées aux deux côtés de l'enceinte. C'est ce qui explique les températures relativement élevées au milieu de l'enceinte. Les températures changent en fonction de  $Ra$ , Cela a été clairement montré dans les contours de température qui ont pris des chemins symétriques pour le centre de bloc chauffé. Dans tous les cas de nombre de  $Ra$  de  $10^3$  jusqu'à  $10^6$ . Si on compare les isothermes pour différentes valeurs de  $Ra$ , On peut noter que lorsque ce dernier augmente, Les isothermes remarque qu'elle se rapproche les unes des autres dans la zone située près du bloc chauffé. On observe que les cellules du nanofluide (Cu-eau) sont supérieures à celles du nanofluide ( $Al_2O_3$ -eau). Ce qui montre que l'intensification de transfert de chaleur avec l'addition du nanofluide (Cu-eau) est plus considérable que l'addition du nanofluide ( $Al_2O_3$ -eau).



**Figure V.2 :** Les contours de température de deux nanofluides (Cu-eau et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) pour différents nombre de Rayleigh avec une fraction volumique  $\phi = 0.10$ .

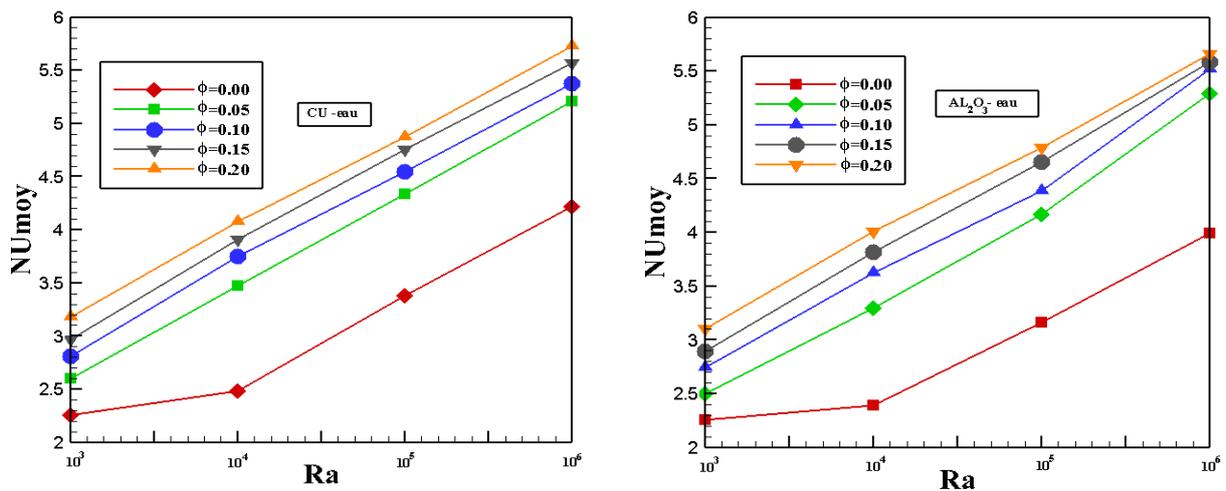
**b. Nombre de Nusselt moyen :**

La variation du nombre de Nusselt moyen au niveau de la paroi chaude d'une cavité remplie des nanofluides (Cu-eau et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) en fonction de la fraction volumique des nanoparticules du cuivre et d'aluminium pour différents nombre de Rayleigh est présentée dans la Figure (V.3). Il est clair que pour tous les nombres de Rayleigh, le nombre de Nusselt moyen augmente d'une manière quasi-linéaire avec l'augmentation de la fraction volumique  $\phi$ . Pour une fraction volumique donnée, les valeurs du nombre de Nusselt moyen augmentent avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et cette augmentation résulte un taux de transfert de chaleur nettement plus élevé. Cette constatation peut être liée à la transition du mécanisme de transfert de chaleur à partir de la conduction à faible nombre de Rayleigh à la convection à nombre de Rayleigh plus élevé.



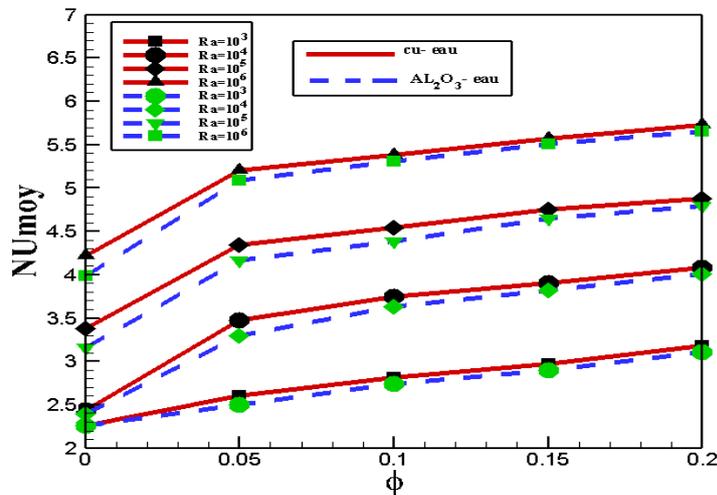
**Figure V.3 :** Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la fraction volumique  $\phi$  pour différents nombres de Rayleigh avec deux nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau).

La Figure (V.4), montre la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes concentrations volumiques des nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) ( $\phi = 0\%$  à  $20\%$ ). Grâce à cette figure, il apparaît clairement que ce nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, cette augmentation est plus considérable pour les fractions volumique plus élevés. On constate que l'augmentation de la concentration en nanoparticules améliore le taux de transfert de chaleur. D'une manière générale, les valeurs du nombre de Nusselt moyen pour les nanofluides sont plus élevées que celles relative au fluide pur. En d'autres termes, l'augmentation de la concentration de nanoparticules favorise l'échange thermique, cela est dû à l'augmentation de la conductivité de fluide.



**Figure V.4:** Evolution du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes fractions volumiques  $\phi$  avec deux nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau).

La Figure(V.5) représente l'évolution du nombre de Nusselt moyen au niveau de la cavité chauffé en fonction de la fraction volumique  $\phi$  des différents nanofluides (Cu-eau et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) pour différents Ra Grâce à ce graphe, il apparaît clairement que ce nombre du Nusselt moyen augmente légèrement avec l'augmentation de  $\phi$ . D'autre part, montre que les valeurs du nombre de Nusselt pour le nanofluide (Cu-eau) sont supérieures à celles du nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau). Ce qui montre que le taux de transfert de chaleur est minimum pour ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau). Le nanofluide (Cu-eau) est un bon conducteur de chaleur par rapport au ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) pour tous les nombres de Rayleigh. Donc, on peut conclure que le type de nanofluide est un facteur principal pour le perfectionnement du transfert.



**Figure V.5 :** Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la fraction volumique  $\phi$  pour différents nanofluides (Cu-eau et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) et différents nombre de Rayleigh.

### V.3.2. Champs dynamique :

#### a. les lignes de courants :

Les figures (V.6 et V.7) illustrent les lignes de courants pour l'enceinte remplie deux nanofluides (Cu-eau et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau) avec différents fraction volumique  $\phi = (0.10 \text{ et } 0.20)$  pour différents nombre de Rayleigh ( $Ra=10^3$  et  $10^5$ ). On remarque une augmentation de la formation des zones à mesure de l'augmentation de nombre de Rayleigh et la fraction volumétriques, on trouve deux zones de recirculation une zone de décélération a gauche et une zone d'accélération a droite. Il est à noter que les lignes des courants qui formuler dans les cellules de (Cu-eau) est plus élevée que les cellules de ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau).

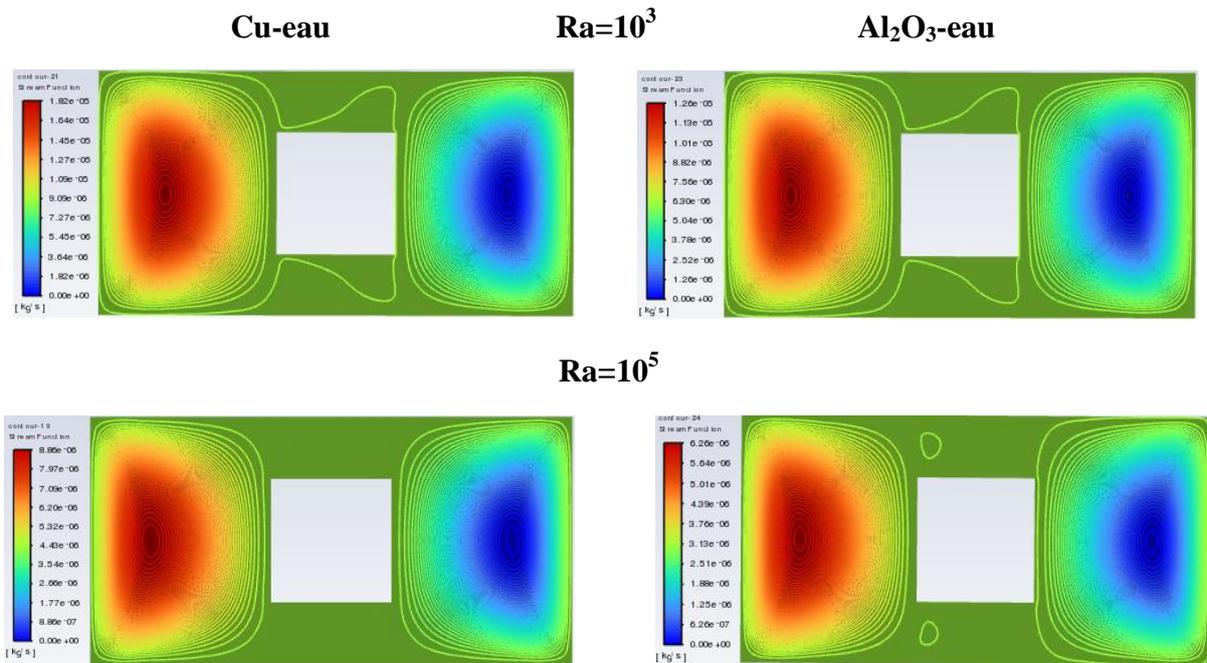


Figure V.6 : Les ligne de courants pour différents nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) avec une fraction volumique  $\phi = 0.10$  et un nombre de Rayleigh  $Ra = 10^3$  et  $10^5$  .

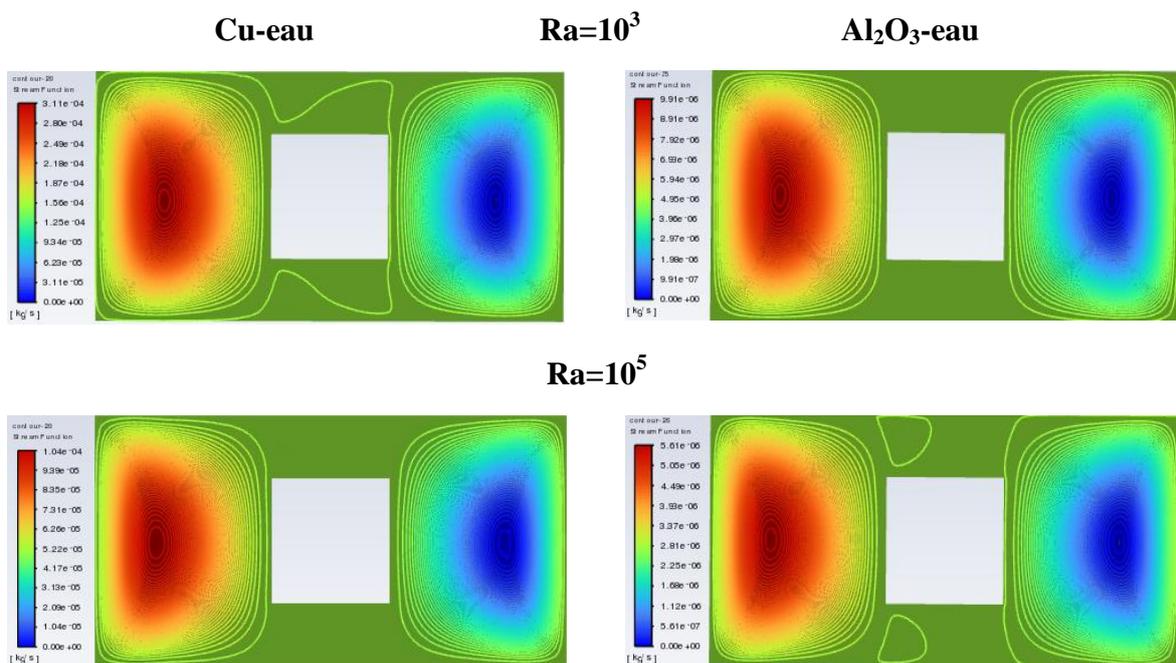


Figure V.7 : Les lignes de courants pour différents nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) avec une fraction volumique  $\phi = 0.20$  et un nombre de Rayleigh  $Ra = 10^3$  et  $10^5$  .

**b. Les vecteurs de vitesse :**

Les figures (V.8) et (V.9) présentent les vecteurs de vitesse pour différents nombres de Rayleigh de  $10^3$  et  $10^5$  avec différentes fractions volumiques  $\phi = (0.10$  et  $0,20)$  deux nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau). On n’observe que les vecteurs de vitesse sont plus dense

sur les deux côtés de l'enceinte, ils sont déplacés dès les parois latérales vers le centre de bloc chauffé, la densité et le déplacement des vecteurs de vitesse augmentent à mesure qu'elles se déplacent à côtés de paroi supérieur et inférieur le déplacement être inversé de le centre vers les parois latérales. Pour  $\phi$  fixe et  $Ra$  varié de  $10^3$  et  $10^5$ , Il est à noter que les vecteurs de vitesse sont à peu près les mêmes et conservent la même forme, mais la vitesse de transmission augmente d'un pourcentage important en fonction de Rayleigh.

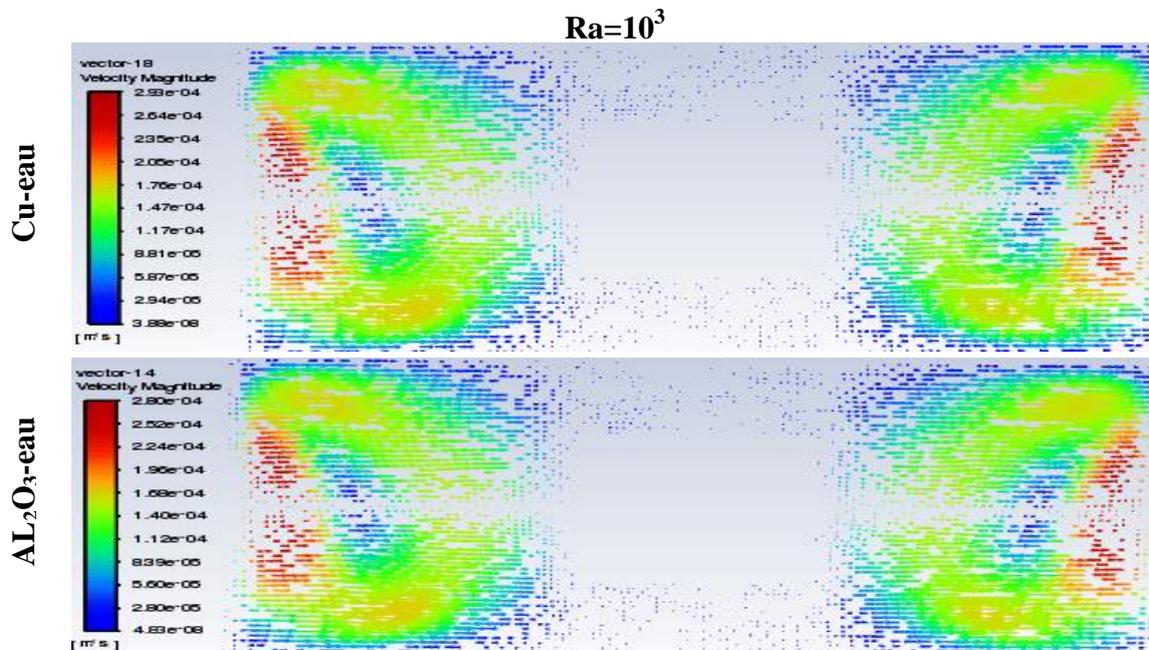


Figure V.8 : Les vecteurs de vitesse pour une fraction volumique  $\phi = 0.10$  avec différents nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) et un nombre de Rayleigh  $Ra = 10^3$ .

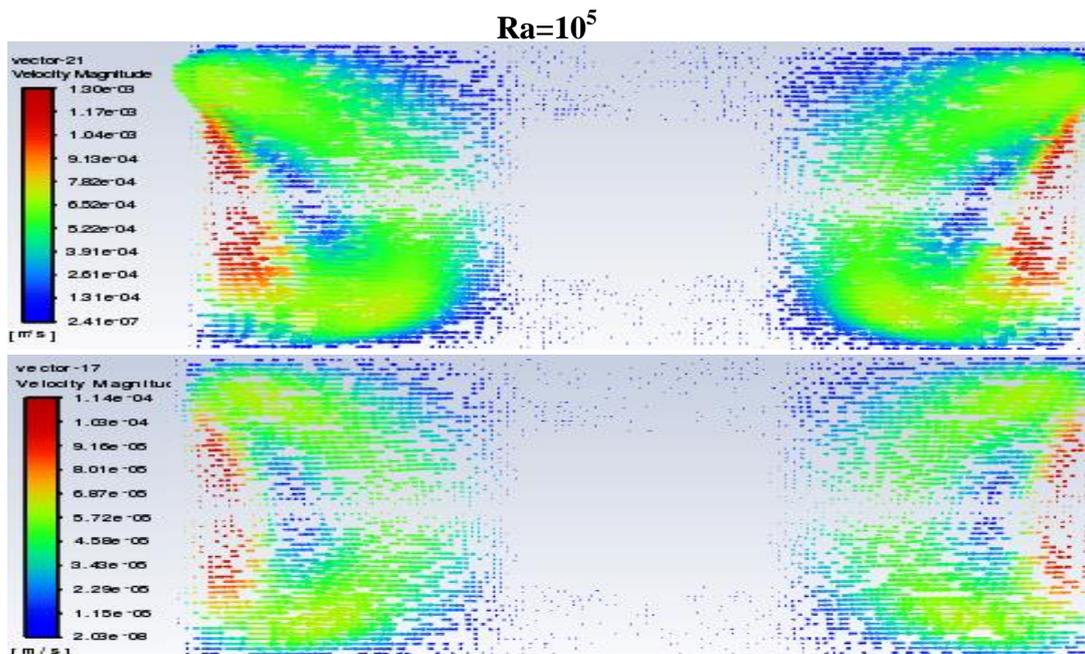
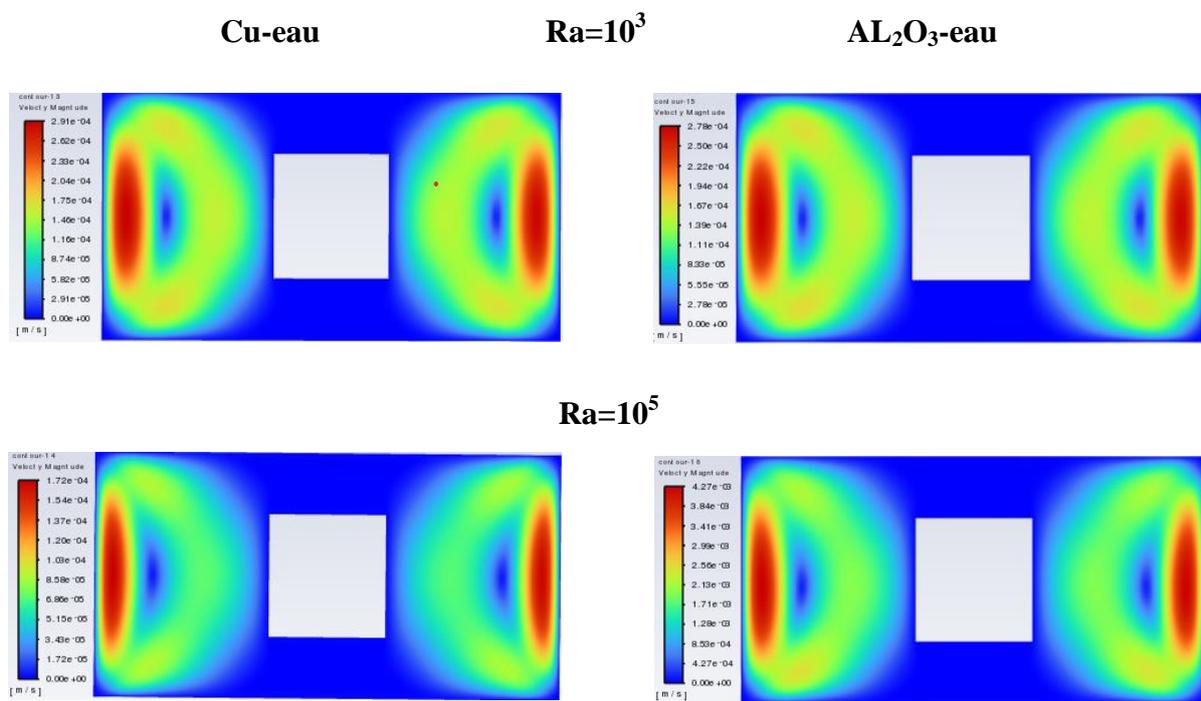


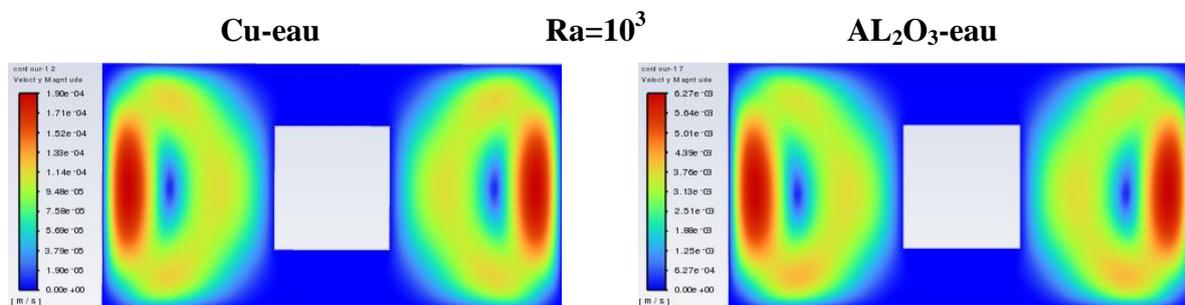
Figure V.9 : Les vecteurs de vitesse pour une fraction volumique  $\phi = 0.20$  avec différents nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) et un nombre de Rayleigh  $Ra = 10^3$  et  $10^5$ .

c. La vitesse moyenne :

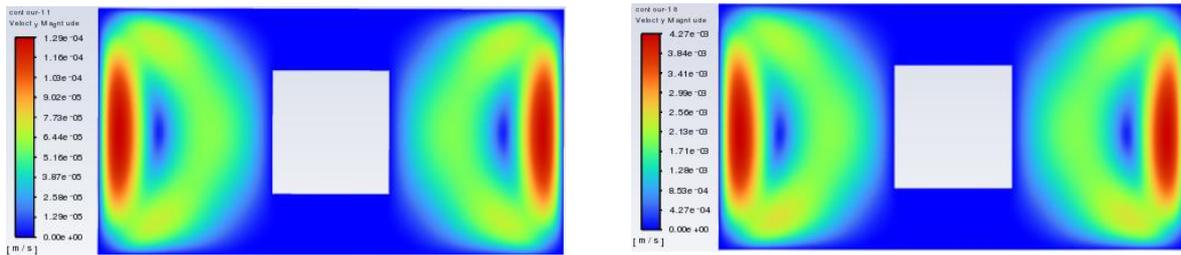
Les figures (V.10) et (V.11), présentent les contours de la vitesse moyenne pour différents nombres de Rayleigh de  $10^3$  jusqu'à  $10^6$  avec différentes fractions volumiques  $\phi = (0,10$  et  $0,20)$  de deux nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau). On observe que La vitesse moyenne diminue à mesure que le nombre de Rayleigh et que la fraction volumique augmente. Il est à noter que la vitesse moyenne augmente sur les deux côtés de l'enceinte en raison d'une collision des cellules de (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) avec les parois de bloc chauffé, Ce qui provoque une diminution de la vitesse au milieu et une recirculation sur les côtés.



**Figure V.10 :** La vitesse moyenne pour une fraction volumique  $\phi = 0.10$  avec différents nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) et un nombre de Rayleigh  $Ra = 10^3$  et  $10^5$ .



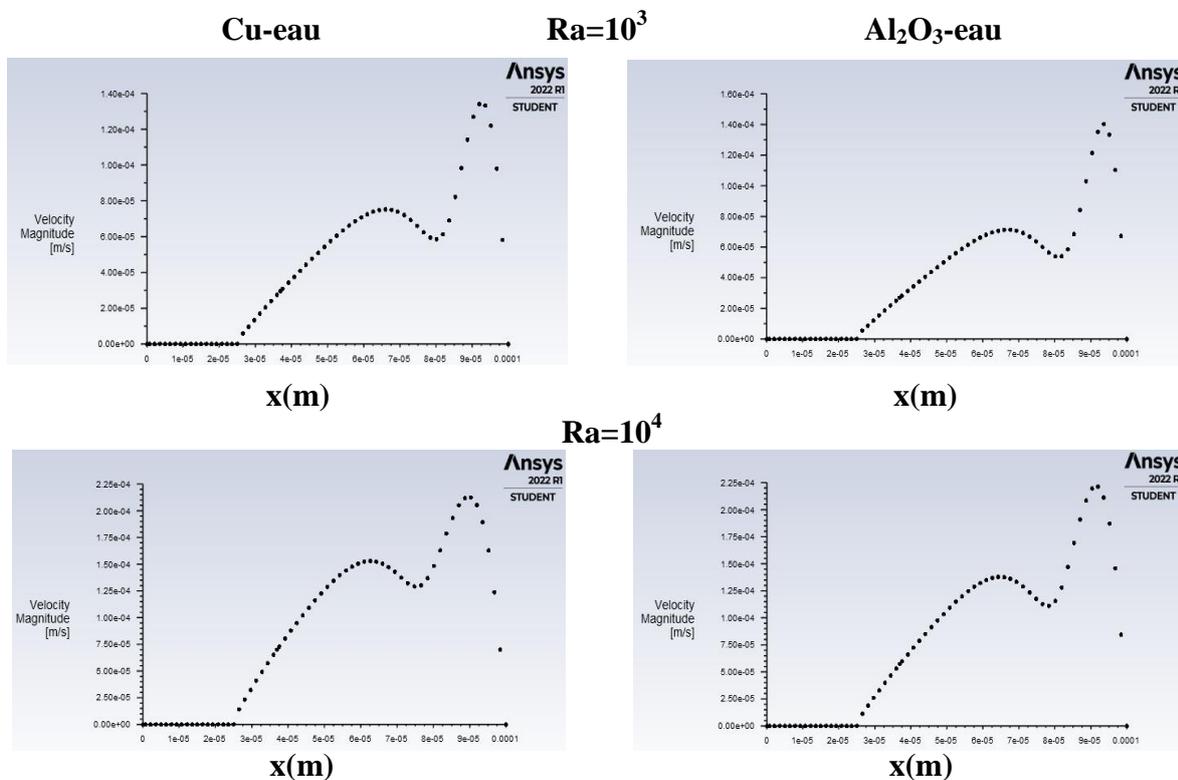
$Ra=10^5$

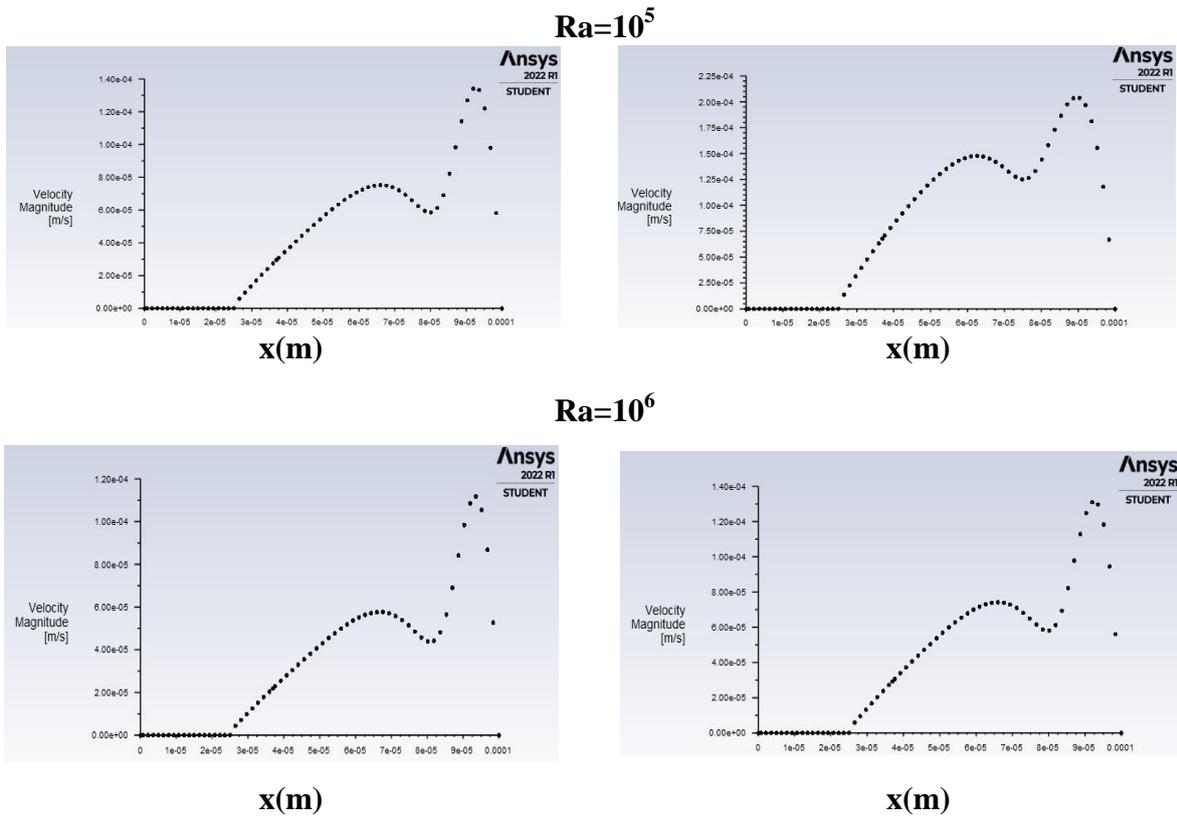


**Figure V.11 :** La vitesse moyenne pour une fraction volumique  $\phi = 0.20$  avec différents nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) et un nombre de Rayleigh  $Ra = 10^3$  et  $10^5$ .

**d. Profil de la vitesse moyenne :**

Pour une vue plus claire et une vérification confirmative de nombre de Rayleigh concernant la distribution de la température dans la structure, on a étudié la variation de la vitesse moyenne pour une cavité remplie de deux nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) avec une fraction volumique  $\phi = 10\%$  et un nombre de Rayleigh de  $10^3$  jusqu'à  $10^6$ , dans la ligne quart horizontale de la structure  $y=25\mu m$ , voir figure (V.12). On observe une stabilité au début parce que la vitesse est nul sur les côtés, et puis on observe une diminution de la vitesse jusqu'à l'arrivée à l'entrée du bloc où la vitesse reprend son augmentation, et puis à la sortie du bloc, on observe une diminution brusque de la vitesse.

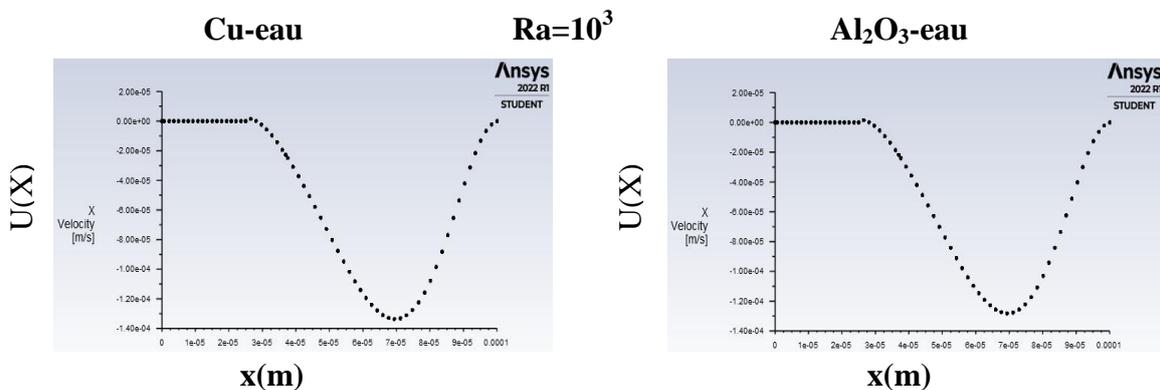


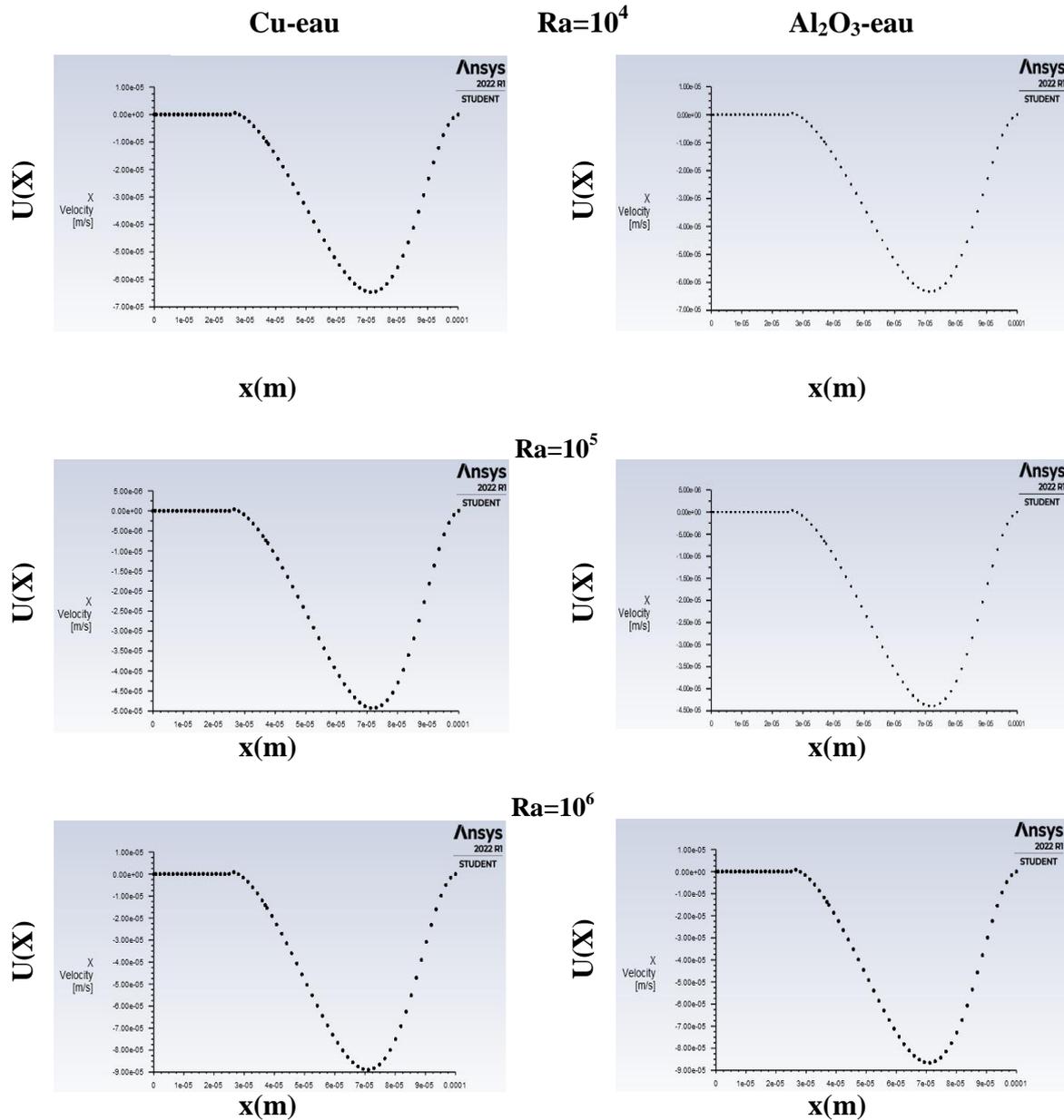


**Figure V.12 :** Variation de la vitesse moyenne de deux nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) pour différentes nombre de Rayleigh avec une fraction volumique  $\phi = 10 \%$ .

**e. la composante de la vitesse moyenne  $U_x$  :**

La figure(V.13) représente la variation de la composante de vitesse moyenne ( $U_x$ ) de deux nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) pour différentes nombre de Rayleigh de  $10^3$  jusqu'à  $10^6$  avec une fraction volumique  $\phi = 0.10$  (voir Figure (V.13)). On observe une stabilité au début parce que la vitesse est nul sur les cotés, et puis on observe une diminution de la vitesse jusqu'à l'arrivée à l'entrée du bloc chauffé, où la vitesse reprend son augmentation à la sortie de bloc chauffé.



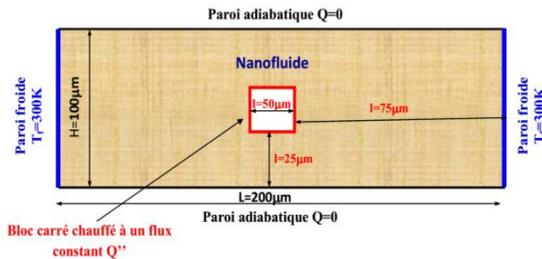


**Figure V.13 :** Variation de la composante de vitesse moyenne ( $U_x$ ) de deux nanofluides (Cu-eau et  $Al_2O_3$ -eau) pour différents nombre de Rayleigh avec une fraction volumique  $\phi = 0.10$ .

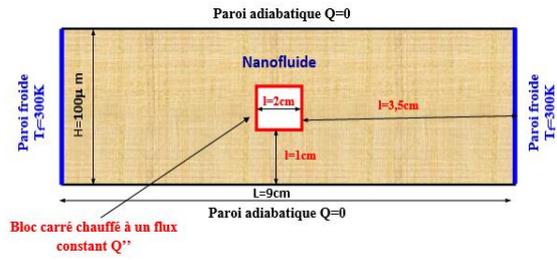
### V.3.3. Effet de la géométrie :

Nous avons étudié l'effet de la géométrie pour voir s'il y a un impact de la géométrie sur le taux de transfert de chaleur et le champ d'écoulement. On a choisi la géométrie ordinaire de dimensions (9cmx4cm). Elle est basée sur une cavité fermée, les parois verticales sont maintenues à une température constante froide  $T_f = 300$  K, les autres parois sont isolées thermiquement et considérées comme adiabatiques, l'enceinte est remplie de deux différents nanofluides (Cu- eau) et ( $AL_2O_3$ -eau) équipée d'un bloc carré au centre de la cavité chauffée à un flux de chaleur constant  $Q''$ .

**Géométrie microcanal (200µm x100µm)**



**Géométrie ordinaire (9cmx4cm).**

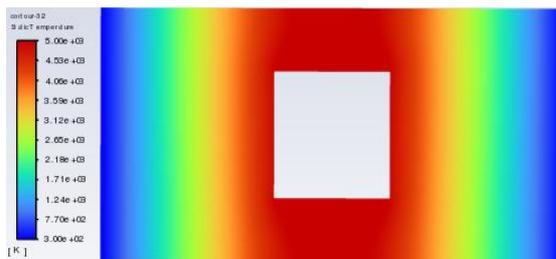


**Figure V.14 : Les deux géométries étudiées.**

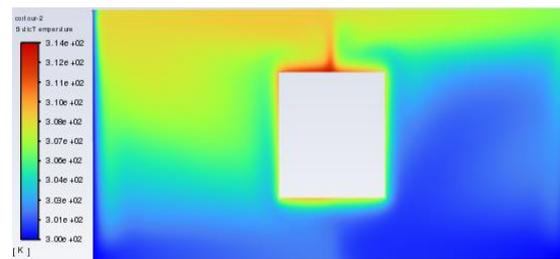
**a. La température :**

La figure (V.15) illustrent les contours de température à l'intérieur des deux géométries microcanal et ordinaire pour  $Ra=10^5$  avec une fraction volumique  $\phi = 0.10$ . La température est observée relativement plus élevée au milieu de l'enceinte dans la géométrie microcanal par contre dans la géométrie ordinaire la température observe à la partie centrale de l'enceinte et affecté à la direction du transfert de chaleur vers le haut par l'apparition de cellules au centre.

**Géométrie microcanal (200µm x100µm)**



**Géométrie ordinaire (9cm x4cm)**



**Figure V.15 : Les contours de température entre les géométries microcanal et ordinaire pour  $Ra=10^5$  avec une fraction volumique  $\phi = 10\%$ .**

**b. Nombre de Nusselt moyen :**

La figure (V.16) représente la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la fraction volumique  $\phi$  pour un nombre de Rayleigh  $Ra=10^5$ . On voit clairement que la variation du nombre de Nusselt par rapport à la fraction volumique du nanofluide pour la géométrie microcanal est similaire à celle de la géométrie ordinaire, sauf que la valeur du nombre de Nusselt pour la géométrie ordinaire est presque le double par rapport à celle de la géométrie microcanal. Donc c'est une façon meilleure d'utiliser la géométrie ordinaire que la géométrie microcanal parce que le taux de transfert dans la géométrie ordinaire est plus important et souhaitable que la géométrie microcannal, mais le dernier n'est pas mauvais par ce que il utilise dans la domaine de l'aéronautique, l'automobile et électronique, Les microcanaux sont des éléments de refroidissement compacts qui peuvent fournir une

augmentation des taux de dissipation de la chaleur et une réduction des gradients de température au sein des composants électroniques.

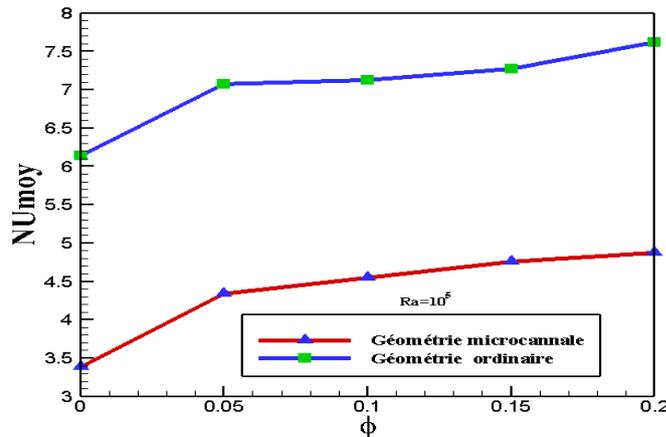


Figure V.16 : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la fraction volumique  $\phi$  du nanofluide pour un nombre de Rayleigh  $Ra=10^5$ .

c. Vecteur de vitesse :

La figure (V.17) présentent les vecteurs de vitesse entre les géométries microcanal et ordinaire pour  $Ra=10^5$  avec une fraction volumique  $\phi = 10\%$ . On remarque que les vecteurs de vitesses est plus dense sur les cotés dans la géométrie microcanal par contre dans la géométrie ordinaire on a observée que les vecteurs de vitesse sont plus consistant au milieu de la cavité au-dessus de bloc chauffé.

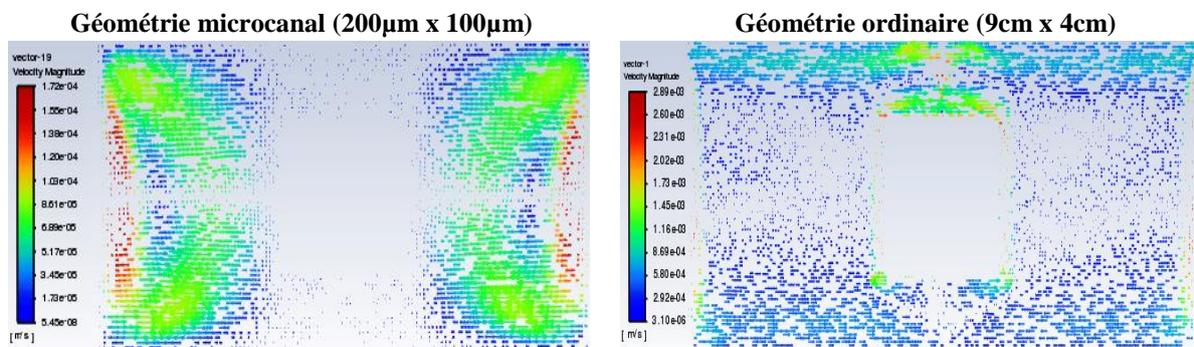


Figure 17 : Les vecteurs de vitesse entre les géométries microcanal et ordinaire pour  $Ra=10^5$  avec une fraction volumique  $\phi = 10\%$ .

V.4. Conclusion :

Nous concluons que le flux de chaleur convectif évacué par un nanofluide augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et de la vitesse de l'écoulement cela justifié par le nombre de Nusselt qui explique dans notre étude, et puis On conclut que les cellules de nanofluide (Cu-eau) est un bon conducteur que les cellules de nanofluide ( $Al_2O_3$ -eau).

# *Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

---

### **Conclusion générale :**

Dans ce travail de mémoire nous avons mené une étude numérique en vue de modérer l'effet du transfert de chaleur convective dans des microcanaux. Le calcul numérique est mené en deux dimensions.

Le problème a été abordé selon une approche numérique, basée sur la méthode des volumes finis en utilisant un logiciel CFD (ANSYS Workbench version 2022), Cette étude a été décomposée en cinq chapitres, dont les principales conclusions sont relances ci-dessous :

La première partie présente une recherche bibliographique dans ce domaine de recherche qui est le refroidissement par les nanofluides.

On se parle dans la partie suivante avec une brève description de la modélisation thermo-physique des nanofluides.

Ensuite, on se parle dans cette étape sur la modélisation mathématique de convection dans les microcanaux et la présentation des équations d'écoulements des nanofluides, ainsi que les conditions ou limite qui applique sur cette opération.

Après la création de la géométrie, maillage et condition aux limites par le logiciel ANSYS Workbench, on a terminé par les procédés de calcul, les résultats graphiques de la simulation sont présentés pour différentes fraction volumiques, des nombre de Rayleigh et nanofluides. L'étude a consisté à faire varier le type le nanofluide dans un premier cas, et de voir l'influence de ces nanofluides sur les champs thermiques et les champs dynamique

En deuxième partie on fait varier les nanofluides (CuO-eau et  $Al_2O_3$ -eau) et de voir l'influence de ces paramètres sur le nombre de Nusselt moyen. on optient les résultats suivants :

- 1- En utilisant les nanofluides, le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la valeur de la fraction volumique des nanoparticules.
- 2- L'amélioration de la convection naturelle à l'intérieur de ce système s'obtenue par l'ajout des nanoparticules et pour un nombre de Rayleigh élevé.
- 3- Le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et la fraction volumique pour différentes concentrations volumiques de nanoparticules.
- 4- Le taux de transfert de chaleur minimum est obtenu pour le nanofluide ( $Al_2O_3$ -eau). Donc le nanofluide (Cu-eau) est un bon conducteur de chaleur par rapport au ( $Al_2O_3$ -eau).

## *Conclusion générale*

---

- 5- Le nombre de Nusselt moyen augmente linéairement lorsqu'en augmente la concentration des nanoparticules surtout dans le cas de nanofluide (Cu-eau), et devient plus évidente pour les valeurs élevées de Rayleigh (la convection dominée).
- 6- Le taux de transfert dans la géométrie ordinaire est plus important et souhaitable par rapport à la géométrie microcanal.

Enfin, des études ont montré que le transfert de chaleur et la vitesse d'écoulement augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, l'augmentation du nombre de Rayleigh et quand on utilise le nanofluide (Cu-eau). Le transfert de chaleur sera plus fort de toute évidence, l'augmentation de ces effets améliorera le transfert de chaleur de la convection naturelle.

# *Références bibliographiques*

- [1] **MOSTEFAOUI Amina**, Analyse thermo énergétique de la convection thermique d'un écoulement de nanofluide dans des microcanaux ondulés, Thèse de doctorat en mécanique énergétique, l'universite abou bekr belkaid tlemcen.
- [2] <https://www.techniques-ingenieur.fr/basedocumentaire/innovationth10/nanotechnologiespour-l-energie-l-environnement-et-la-sante-42514210/nanofluides-pour-les-applications-thermiques-nm5115/conclusion-nm5115niv10007.html> ,site WEB consulté le 20/03/2020.
- [3] **Ayoub Abdollahi, Hussein A. Mohammed, Sh.M. Vanaki, RajnishN.Sharma**. Numerical investigation of fluid flow and heat transfer of nanofluids in microchannel with longitudinal fins, Ain Shams Engineering Journal, volume 9, (2018), pages 3411- 3418.
- [4] **Ayoub Abdollahi, H.A. Mohammed, Sh.M. Vanaki, A. Osia, M.R. Golbahar Haghghi**. Fluid flow and heat transfer of nanofluids in microchannel heat sink with V-type inlet/outlet arrangement, alexandria engineering journal, volume 56, (2017), Pages 161-170.
- [5] **D.V. Guzei, A.V. Minakov, V.Ya. Rudyak**. On efficiency of convective heat transfer of nanofluids in laminar flow regime, International Journal of Heat and Mass Transfer, volume 139, (2019), pages 180 -192.
- [6] **Fahad S. Alkasmoul, Mohammed Asaker, Ahmed Almogbel, Ahmed AlSuwailem**. Combined effect of thermal and hydraulic performance of different nanofluids on their cooling efficiency in microchannel heat sink, Case Studies in Thermal Engineering, volume 30, (2022) 101776.
- [7] **James Bowers, Hui Cao, Geng Qiao, Qi Li, Gan Zhang, Ernesto Mura, Yulong Ding**. Flow and heat transfer behaviour of nanofluids in microchannels, Progress in Natural Science: Materials International, volume 28 (2018), pages 225–234.
- [8] **Javad Rostami, Abbas Abbassi, Jens Harting**. Heat transfer by nanofluids in wavy microchannels, Advanced Powder Technology, volume 28 (2018), pages 925-933.
- [9] **Javaria Akram, Noreen Sher Akbar, D. Tripathi**. Numerical simulation of Electrokinetically Driven Peristaltic Pumping of Silver-Water Nanofluids in an asymmetric microchannel, chinese journal of physics, volume 68, 2020, Pages 745-763.
- [10] **Liu Yang, Kai Dua**. Numerical simulation of nanofluid flow and heat transfer in a microchannel: The effect of changing the injection layout arrangement, International Journal of Mechanical Sciences, volume 172, (2020) 105415.

- [11] **Mohammad Bagheri Motlagh, Mohammad Kalteh.** Molecular dynamics simulation of nanofluid convective heat transfer in a nanochannel: Effect of nanoparticles shape, aggregation and wall roughness, *Journal of Molecular Liquids*, volume 318, (2020) 114028.
- [12] **M. Hatami.** Numerical Study of Nanofluids Natural Convection in a Rectangular Cavity Including Heated Fins, *Journal of Molecular Liquids*, volume 223, (2017), Pages 1-8.
- [13] **Mohammad Zargartalebi, Jalel Azaiez.** Heat transfer analysis of nanofluid based microchannel heat sink, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, volume 127, (2018), Pages 1233-1242.
- [14] **T. Balaji, C. Selvam, D. Mohan Lal, Sivasankaran Harish.** Enhanced heat transport behavior of micro channel heat sink with graphene based nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, volume 117, (2020) 104716.
- [15] **Thangavelu Mahalakshmi, Nagarajan Nithyadevi, Hakan.F.Oztop0, Nidal Abu-Hamdeh.** Natural convective heat transfer of Ag-water nanofluid flow inside enclosure with center heater and bottom heat source, *Chinese Journal of Physics*, volume 56, (2018), Pages 1497-1507.
- [16] **V. Murali Krishna, M. Sandeep Kumar.** Numerical analysis of forced convective heat transfer of nanofluids in microchannel for cooling electronic equipment, *Materials Today: Proceedings*, volume 17, (2019), pages 295–302.
- [17] **Xiaojun Shi, Shan Li, Yadong Wei, Jianmin Gao.** Numerical investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in a microchannel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, volume 90, (2018), pages 111–120.
- [18] **Sayantana Mukherjee, Somjit Paria,** Preparation and stability of Nano-fluids- A review, Article, KIIT University, Odisha, India, 2013.
- [19] **Khenniche Taher,** Etude du transfert thermo convectif des nanofluides en écoulement dans un canal horizontal, Mémoire de Master Académique en Génie Mécanique, Université Ziane Achour de Djelfa, 2013.
- [20] **R Ribeiro J., P., Gruss J., A.** (2009) : Nanofluides pour les applications thermiques, technique de l'ingénieur, 2ème édition.
- [21] **Ben Si Ali Hicham et Fedden Ridha,** Contribution à l'étude numérique sur l'amélioration du transfert de chaleur dans un écoulement laminaire convectif d'un nanofluide dans une enceinte, Mémoire de Master en Génie Mécanique, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila, 2021.

- [22] **Lebbihi saci**, Refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur localisée au fond d'une enceinte remplie de nano-fluide, Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master de l'université de Biskra, 2014.
- [23] **Beldjani Charafeddine**, Amélioration du refroidissement d'un module photovoltaïque par l'usage de la nanotechnologie, Mémoire de Master en Génie Mécanique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.
- [24] **J.C. Maxwell**. A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K., 1891.
- [25] **R.L. Hamilton and O.K. Crosser**. Thermal conductivity of heterogeneous two component.
- [26] **Khentoul Moussa**, Etude numérique de la convection mixte dans un canal horizontal contenant des ailettes, Thèse de doctorat de l'université des frères Mentouri Constantine, 2016.
- [27] **D.A.G. Bruggeman**. Ann. Physics (Leipzig) 24 (1935) pp. 636.
- [28] **Gladés Bachir**, Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard, thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE TOULOUSE, Octobre 2010.
- [29] **Y. Xuan and W. Roetzel**. Conception for heat transfer correlation of nano-fluids. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43(19), 3701-3707, 2000.
- [30] **B.C. Pak and Y.I. Cho**. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer, 11(2), 151-170, 1998.
- [31] **Djihane Hadi**, Etude de la convection d'un nano-fluide dans des microcanaux verticaux, MÉMOIRE DE MASTER de Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.
- [32] **Lounes Benkezim**, « Simulation numérique de la convection naturelle d'un nanofluide dans une cavité rectangulaire », Thèse de magistère, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2013.
- [33] **Abdeddaim Amel**, Gestion des échanges thermiques des composants électroniques, Mémoire de master de l'université de Biskra, 2019.
- [34] **Khider fatma Zohra**, Amélioration de la convection mixte en utilisant des ailettes cylindriques avec des ouvertures au niveau de la base, mémoire de master université Mohamed Boudiaf-Mssila 2016.
- [35] **Salhi Hicham**, Etude numérique de la convection naturelle dans les enceintes : nanofluide, Thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat de l'université de Batna, 2015.

- [36] **Talbi Elnadhir**, Etude numérique de la convection autour des composants électroniques montés entre deux plaques planes verticales en présence d'un nano-fluide, Mémoire en vue de l'obtention de diplôme de master de l'université de Biskra, 2016.
- [37] **A.Bouhelal et al**, Simulation de la convection naturelle autour d'une source de chaleur localisée au fond d'une enceinte remplie de nano-fluide, Article, Université de Biskra, Algérie, 2016.
- [38] **Adjim Mohammed**, modélisation TLM du transfert thermique dans les microcanaux, thèse de doctorat d'état en mécanique des fluides dans l'université Abou Beker Belkaid de Tlemcen, 2007.
- [39] **Charef Khoudja Nabila**, Etude numérique des écoulements dans les microcanaux, Mémoire de magistère en physique dans l'université de Batna, 2010.
- [40] **Krouma Saadia**, Influence de la géométrie des nanoparticules dans un nano-fluide sur le transfert thermique, Mémoire de master de l'université de Biskra, 2014.
- [41] **S. S. Mehendale, A. M. Jacobi, and R. K. Shah**, Fluid flow and heat transfer at micro-and meso-scales with application to heat exchanger design, Applied Mechanics Reviews, 53 (2000):175–193.