



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Echahid Cheikh Labri Tébessi -Tébessa-



Faculté des sciences et de la technologie

Département de génie mécanique

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En: Génie mécanique

Spécialité: Energétique

Par: DJEDAI Fairouz

Intitulé:

Étude numérique de la performance thermique de l'écoulement des nano fluides dans un canal

Présenté et soutenu publiquement, le 11/06/2024, devant le jury composé de:

Dr. LAOUAR Roudouane
Dr .CHELLOUG Fatma Zohra
Dr.AMOR Abdellatif

M.C.A
M.A.A
M.A.B

Encadrant
Président
Examinateur

Promotion: 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant: **Dr. Laouar Roudouane**, pour son soutien, ses conseils et sa disponibilité tout au long de ce projet.

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en évaluant mon travail, ainsi que pour leurs critiques constructives.

Mes remerciements vont également aux professeurs du département de génie mécanique pour leur enseignement de qualité et leur passion pour la mécanique.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail par leur aide, leurs conseils et leur soutien moral.

À tous, ma reconnaissance sincère.

Table de matière

Introduction générale

0.1 Problématique proposé.....	1
0.2 Objectif de la thèse.....	1
0.3 Organisation du document.....	2

Chapitre 1: Généralités sur les nano fluides et revue bibliographique

1.1. Introduction.....	3
1.2. Les nanofluides.....	3
1.2.1. Concept des nanofluides.....	3
1.2.2. Les nanoparticules et les fluides porteurs.....	3
1.2.3. 1.2.3 . Méthode de préparation des nanofluides	5
1.2.4. Propriétés thermophysiques des nanofluides.....	6
1.2.4.1. Fraction volumique.....	6
1.2.4.2. La masse volumique.....	7
1.2.4.3. Chaleur spécifique.....	7
1.2.4.4. La viscosité dynamique.....	8
1.2.4.5. La conductivité thermique.....	9
1.2.5. Domaine d'Application de nano fluides.....	10
1.2.5.1. Refroidissement des systèmes thermiques.....	10
1.2.5.2. Refroidissement des systèmes électroniques.....	11
1.2.5.3. Refroidissement des systèmes militaires.....	11
1.2.5.4. Refroidissement des systèmes spatiaux.....	11
1.2.5.5. Refroidissement des systèmes nucléaire.....	11
1.2.5.6. Biomédecine.....	11
1.2.5.7. Autres application.....	12
1.2.6. Les avantages et les inconvénients des nano fluides	12
1.2.6.1. Les avantages.....	12
1.2.6.2. Les inconvénients.....	12
1.3. Transfert thermique par convection.....	12
1.3.1. Définition.....	12

1.3.2. Type de convection.....	13
1.3.2.1. La convection naturelle	13
1.3.2.2. La convection forcée	13
1.3.2.3. La convection mixte	13
1.4. Synthèse bibliographique.....	13
1.5. Conclusion.....	18

Chapitre 2: Géométrie et modélisation mathématique

2.1. Introduction	19
2.2. Description du problème	19
2.3. Formulation mathématique de problème.....	20
2.4. Equations gouvernantes.....	20
2.4.1. Equation de continuité.....	20
2.4.2. Equation de quantité de mouvement.....	20
2.4.3. Equation de conservation d'énergie.....	21
2.5. Hypothèse du problème.....	21
2.6. Formulation du problème	22
2.6.1. Modèle mathématique dimensionnel.....	22
2.6.2. Conditions aux limites dimensionnelles.....	24
2.6.3. Modèle mathématique en forme adimensionnelle.....	25
2.6.3.1. Nombre de Reynolds.....	25
2.6.3.2. Le nombre de Prandtl.....	25
2.6.3.3. Nombre de Grashof.....	26
2.6.3.4. Nombre de Rayleigh.....	26
2.6.3.5. Nombre de Nusselt.....	26
2.6.4. Conditions aux limites adimensionnelles.....	27
2.7. Conclusion.....	28

Chapitre 3: Méthodologies de simulation et modélisation numérique

3.1. Introduction.....	29
3.2. Méthode numérique.....	29
3.2.1. La méthode des différences finies (MDF).....	29
3.2.2. La méthode des éléments finis (MEF).....	30

3.2.3.	La méthode des volumes finis (MVF).....	30
3.3.	Principe de la méthode de volume finis.....	30
3.4.	Etapas de la modélisation numérique.....	32
3.5.	Présentation des logiciel Gambit et fluent.....	32
3.5.1.	Gambit.....	32
3.5.2.	Fluent.....	33
3.5.2.1.	Importation du maillage.....	33
3.5.2.2.	Configuration du solveur.....	34
3.5.2.3.	Définition des conditions et des critères de convergence.....	34
3.5.2.4.	Couplage pression vitesse	34
3.5.2.5.	Descritisation spatiale.....	35
3.5.2.6.	Initialisation et lancement de la simulation.....	35
3.5.2.7.	Post-traitement et sauvegarde des résultats.....	35
3.6.	Mise en place de la simulation.....	36
3.6.1.	Détermination du domaine du calcul.....	36
3.6.2.	Génération du maillage.....	37
3.7.	Résolution numérique bidimensionnelle de l'écoulement.....	38
3.7.1.	Conditions aux limites.....	38
3.7.2.	Etude de l'indépendance du maillage.....	39
3.8.	Validation des résultats numériques.....	40
3.9.	Conclusion.....	42

Chapitre 4: Résultats des simulations et discussion

4.1.	Introduction.....	43
4.2.	Effet du Type de Nanoparticule et de la Fraction Volumique sur le Transfert de Chaleur par Convection Mixte.....	43
4.2.1.	L'influence du type et de fraction volumique de nanoparticule sur le coefficient d'échange convectif.....	43
4.2.2.	L'influence du type et de fraction volumique de nanoparticule sur le nombre de Nusselt.....	45
4.2.3.	Effet du nombre de nombre de Reynlods sur le Transfert de Chaleur.....	47
4.2.4.	Effet de la distance de séparation entre les deux composants électroniques sur le transfert de chaleur.....	49

4.2.5. Analyse des Champs de Vitesse et de Température.....	54
4.2.5.1. Le Champ de vitesse.....	54
4.2.5.2. Le profil de vitesse	55
4.2.5.3. Le champ et le profil de Température	55
4.2.6. Conclusion.....	58
Conclusion générale et perspectives.....	59

Résumé

Cette étude numérique analyse les performances thermiques d'un nanofluide dans un canal rectangulaire pour optimiser le refroidissement des composants électroniques. Les simulations ont été réalisées avec Gambit et ANSYS Fluent. Dans un premier temps, l'effet de trois types de nanoparticules (cuivre, alumine Al_2O_3 , et dioxyde de titane TiO_2) a été étudié. Par la suite, l'étude s'est concentrée sur l'alumine (Al_2O_3) pour examiner en détail l'impact de la fraction volumique, du nombre de Reynolds et de la distance de séparation entre les composants. Les résultats montrent que les nanofluides à base de cuivre présentent les meilleures performances initiales en transfert de chaleur en raison de leur conductivité thermique élevée. En se focalisant sur l' Al_2O_3 , il a été constaté que l'augmentation de la fraction volumique et du nombre de Reynolds améliore significativement le transfert de chaleur. De plus, une distance de séparation optimale entre les composants maximise l'efficacité de refroidissement. Ces résultats fournissent des directives essentielles pour la conception de systèmes de refroidissement avancés et efficaces pour les composants électroniques.

Mots clés : Nanofluide, Transfert de chaleur, Convection mixte, Refroidissement des composants électroniques.

Abstract

This numerical study analyzes the thermal performance of nanofluid in a rectangular channel to optimize the cooling of electronic components. Simulations were conducted using Gambit and ANSYS Fluent. Initially, the effect of three types of nanoparticles (copper, alumina Al_2O_3 , and titanium dioxide TiO_2) was studied. Subsequently, the study focused on alumina (Al_2O_3) to examine in detail the impact of volume fraction, Reynolds number, and distance between components. The results show that copper-based nanofluids initially exhibit the best heat transfer performance due to their high thermal conductivity. Focusing on Al_2O_3 , it was found that increasing the volume fraction and Reynolds number significantly improves heat transfer. Moreover, an optimal separation distance between components maximizes cooling efficiency. These findings provide crucial guidelines for designing advanced and efficient cooling systems for electronic components.

Keywords: Nanofluid, Heat transfer, Mixed convection, Electronic component cooling,

ملخص

نقوم خلال هذه الدراسة العددية بتحليل الأداء الحراري للسائل النانوي في قناة مستطيلة بهدف تحسين تبريد الجسيمات الإلكترونية. تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامجي المحاكاة Gambit و ANSYS Fluent. في البداية، تم دراسة تأثير ثلاثة أنواع من الجسيمات النانوية (النحاس Cu، الألومينا Al_2O_3 ، وثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2) بعد ذلك، ركزنا في الدراسة على الألومينا (Al_2O_3) لفحص تأثير الكسر الحجمي، وعدد رينولدز، والمسافة بين المكونات بالتفصيل. تظهر النتائج أن السوائل النانوية التي تحتوي على النحاس تقدم أفضل أداء في نقل الحرارة بسبب توصيلها الحراري العالي الحرارية. من خلال التركيز على Al_2O_3 ، وجد أن زيادة الكسر الحجمي وعدد رينولدز تحسن بشكل كبير من نقل الحرارة. بالإضافة إلى ذلك، فإن المسافة المثلى بين المكونات تزيد من كفاءة التبريد إلى الحد الأقصى. تقدم هذه النتائج توجيهات أساسية لتصميم أنظمة تبريد متقدمة وفعالة للجسيمات الإلكترونية.

الكلمات المفتاحية: سائل نانوي (نانوفلويد)، نقل الحرارة، حمل حراري مختلط، تبريد الجسيمات الإلكترونية.

Listes des figures

Chapitre 1: Généralités sur les nanofluides et revue bibliographique

Figure 1.1 —Images TEM de quelques exemples de nanoparticules :(a) Nanoparticules sphériques, (b) Nanotubes de carbone et (c) Nano feuilles de graphène.....	4
Figure 1.2 – le domaine géométrique et de calcul.....	14
Figure 1.3 – (a) Diagramme schématique de la cavité en forme de T, ayant les conditions d'écoulement de (b) uniforme, (c) Poiseuille et (d) Couette	15
Figure 1.4 – Schéma du (a) rectangulaire MCHS et (b) modèle CATIA.....	16
Figure 1.5 – Schéma de la structure du dissipateur thermique à canal à ailettes.....	16
Figure 1.6 – les dimensions et la géométrie du canal.....	17
Figure 1.7 – présentation de la géométrie des microcanaux en 3D.....	17

Chapitre 2: Géométrie et modélisation mathématique

Figure 2.1 – Géométrie du model physique étudié.....	20
---	----

Chapitre 3: Méthodologies de simulation et modélisation numérique

Figure 3.1 – Volume de contrôle dans le cas 2D.....	31
Figure 3.2 – Structure de base du code Fluent.....	32
Figure 3.3 – Géométrie du champ d'écoulement.....	36
Figure 3.5 – Maillage bidimensionnel moyen du canal.....	38
Figure 3.6 – Géométrie du canal étudié avec les conditions aux limites.....	39
Figure 3.7 – Comparaison de nombre de Nusselt total entre cette étude et les l'étude d'Ait Hssain et al. pour le composant supérieur.....	41
Figure 3.8 – Comparaison de nombre de Nusselt total entre cette étude et les l'étude de Ait Hssain et al. pour le composant inférieur.....	41

Chapitre 4: Résultats des simulations et discussion

Figure 4.1 – Effet de la fraction volumique de différentes nanoparticules sur le coefficient d'échange pour l'obstacle supérieur.....	44
--	----

Listes des figures

Figure 4.2- Effet de la fraction volumique de différentes nanoparticules sur le coefficient d'échange pour l'obstacle inférieur.....	44
Figure 4.3- Effets de la fraction volumique de différentes nanoparticules sur le nombre de Nusselt total pour l'obstacle supérieur.....	45
Figure 4.4- Effets de la fraction volumique de différentes nanoparticules sur le nombre de Nusselt total pour l'obstacle inférieur.....	46
Figure 4.5- Effet du nombre de Reynolds sur le nombre de Nusselt total de l'obstacle supérieur pour différentes fractions volumiques.....	47
Figure 4.6- Effet du nombre de Reynolds sur le nombre de Nusselt total de l'obstacle inférieur pour différentes fractions volumiques.....	48
Figure 4.7- Variations des contours de température en fonction des différentes distances de séparation entre les deux composants électroniques pour le nanofluide "eau- Al_2O_3 ".....	50
Figure 4.8- Variations des lignes de courant en fonction des différentes distances de séparation entre les deux composants électroniques pour le nanofluide "eau- Al_2O_3 ".....	51
Figure 4.9- Effet de la distance de séparation entre les composants électroniques sur le nombre de Nusselt total de l'obstacle supérieur pour différentes fractions volumiques.....	52
Figure 4.10- Effet de la distance de séparation entre les composants électroniques sur le nombre de Nusselt total de l'obstacle inférieur pour différentes fractions volumiques.....	53
Figure 4.11- Champ de Vitesse	54
Figure 4.12- Vecteurs de vitesse à proximité des obstacles	54
Figure 4.13- Les différents positions pour la projection de profils de vitesse et de température	55
Figure 4.14- Profil de vitesse axiale pour différentes stations.....	55
Figure 4.15- Distribution de la température dans le canal	56
Figure 4.16- Profil de température pour différentes stations.....	57

Liste des tableaux

Chapitre 1: Généralités sur les nanofluides et revue bibliographique

Tableau 1.1- Synergies entre nanoparticules et fluides de base.....5

Chapitre 3: Méthodologies de simulation et modélisation numérique

Tableau 3.1- Propriétés thermophysiques de fluide de base et des nanoparticules.....37

Tableau 3.3- Différents maillages utilisés dans l'analyse de l'indépendance de solution-
maillage.....38

Tableau 3.4- Le nombre de Nusselt total Nu_t et le facteur de la distorsion du maillage F_d
pour les trois maillages.....40

Liste des symboles

Symboles Latins

L	Longueur du canal	[m]
d	La distance entre les composants électroniques	[m]
H	Hauteur du canal	[m]
H̄	Hauteur des composants électroniques	[m]
w	Longueur des composants électroniques	[m]
D_h	Diamètre hydraulique du canal	[m]
m	Masse	[kg]
V	Volume	[m ³]
C_p	Chaleur spécifique	[J/kg.k]
K	Conductivité thermique	[w/m.k]
h	Coefficient d'échange convectif	[w/m ² .k]
q	Source de chaleur interne	[J]
P	Pression dimensionnelle	[kg/m.s ²]
T	La température	[K]
u, v	Composantes de la vitesse dans les directions (ox),(oy)	[m/s]
U*, V*	Composantes de la vitesse adimensionnelle dans les directions (ox),(oy)	[-]
n	facteur de forme empirique	[-]
g	La gravité	[m ² /s]
F_d	Facteur de distorsion de maillage	[-]

Symboles Grecs

θ	Température adimensionnelle	[-]
β	Coefficient de dilatation thermique	[K ⁻¹]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
μ	Viscosité dynamique	[kg/m.s]
φ	Fraction volumique	[-]
ψ	Sphéricité	[-]
Ψ	Fonction de dissipation regroupant tous les termes contenant la viscosité μ	[-]
ν	Viscosité cinématique du fluide	[m ² /s]
α	Diffusivité thermique	[m ² /s]

Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
Ra	nombre de Rayleigh

Abréviations

PTH	La performance thermique
------------	--------------------------

Liste des symboles

EG	L'éthylène-Glycol
Al₂O₃	L'alumine (oxyde d'aluminium)
CuO	L'oxyde de cuivre
SiO₂	Le dioxyde de silicium
TiO₂	L'oxyde de titanium
Al	L'aluminium
Cu	Le cuivre
Au	L'or
Ag	L'argent
Si	La silicone
CNT	Les nanotubes de carbone
C	Le diamant

Indices

nf	Nanofluide
fb	Fluide de base
s	solide
f	fluide de base
in	Entrée
t	total
c	Composant électronique

Introduction et objectif du mémoire

0.1.Contexte général

Les nanofluides, des suspensions de nanoparticules dans un fluide de base, ont suscité un intérêt considérable ces dernières années en raison de leurs propriétés thermophysiques améliorées. Ces fluides innovants offrent des opportunités passionnantes dans divers domaines, notamment en ingénierie thermique. Dans ce contexte, une application prometteuse des nanofluides réside dans le domaine du refroidissement des composants électroniques, où la dissipation thermique efficace est cruciale pour assurer la performance et la fiabilité des dispositifs électroniques modernes.

En raison de la réduction progressive des composants électroniques, le défi majeur réside dans la gestion efficace de la chaleur générée. Les nanofluides offrent une solution innovante grâce à leurs propriétés thermophysiques améliorées, mais leur utilisation optimale nécessite une compréhension approfondie de leur comportement dans des conditions spécifiques, telles que les écoulements à travers des canaux rectangulaires. La question centrale de cette étude est donc de déterminer comment maximiser les performances thermiques des nanofluides dans de telles configurations, en tenant compte de divers paramètres influents.

0.2.Objectifs du mémoire

Cette étude vise à examiner en détail les performances thermiques des nanofluides dans le contexte spécifique du refroidissement des composants électroniques. Les objectifs spécifiques incluent :

- ✓ Évaluer l'impact du type et de la fraction volumique des nanoparticules sur le transfert de chaleur dans un environnement électronique.
- ✓ Analyser l'influence de la configuration géométrique et de la disposition des composants électroniques sur l'efficacité du refroidissement avec des nanofluides.
- ✓ Examiner les effets des paramètres d'écoulement, tels que le nombre de Reynolds, sur les performances thermiques du système de refroidissement.
- ✓ Les résultats de cette simulation sont destinés à fournir des informations utiles pour la conception de systèmes de refroidissement de composants électroniques et peuvent

servir de base pour des études futures sur des configurations plus complexes et des régimes turbulents.

0.3.Plan du manuscrit

Ce manuscrit est structuré en quatre chapitres principaux, détaillés comme suit :

- Après cette introduction le premier chapitre présente une vue d'ensemble des nanofluides, en mettant particulièrement l'accent sur leurs propriétés thermophysiques et leurs applications potentielles dans le domaine du refroidissement des composants électroniques. Une revue de la littérature récente est également présentée pour situer le contexte de la recherche actuelle et identifier les lacunes.
- Dans le second chapitre nous présentons la formulation mathématique pour aboutir à la mise en équation du problème considéré dans cette étude. Les différentes hypothèses ainsi que les différentes conditions aux limites seront précisées.
- Le troisième chapitre décrit la méthodologie numérique utilisée pour simuler l'écoulement des nanofluides dans un environnement électronique, en utilisant les logiciels Gambit et Fluent. Les étapes de génération de maillage et de résolution des équations sont exposées en détail.
- Dans le quatrième et dernier chapitre nous présentons les résultats de différentes simulations numériques en mettant en évidence les effets des type et des fractions volumiques des nanoparticules, des configurations géométrique des composants électroniques et des paramètres d'écoulement sur les performances thermiques du système de refroidissement. Les implications pour le domaine du refroidissement électronique sont également examinées.
- Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus ainsi qu'une suggestion de quelques travaux futurs en relation avec ce sujet.

Chapitre 1

1. Généralités sur les nano fluides et revue bibliographique

Chapitre 1

1. Généralités sur les nano fluides et revue bibliographique

1.1. Introduction

Ce chapitre est consacré aux généralités sur les nanofluides et sur le transfert de chaleur par convection. Une synthèse bibliographique des travaux antérieurs concernant les nanofluides et le transfert de chaleur par convection dans les canaux est également développée.

1.2. Les nanofluides

1.2.1. Concept des nanofluides

Les nanofluides sont des suspensions de particules solides métalliques ou non métalliques de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm) appelées nanoparticules dans un liquide conventionnel (fluide de base) comme l'eau, l'éthylène glycol ou l'huile. Le terme nanofluide a été utilisé pour la première fois par Choi(1995)[1], ce type de solution suscite un grand intérêt depuis la découverte de leurs propriétés thermiques particulières. Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. En effet, les fluides de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent leur capacité de transfert de chaleur. L'idée est alors d'insérer au sein des liquides de base des nanoparticules de conductivité très élevée, afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange et ainsi améliorer ces performances thermiques)[2] .

1.2.2. Les nanoparticules et les fluides porteurs

D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en trois grandes catégories (figure 1.1): [3]

- Nanoparticules sphériques.
- Nanotubes de carbone.
- Nanofeuilles de graphène.

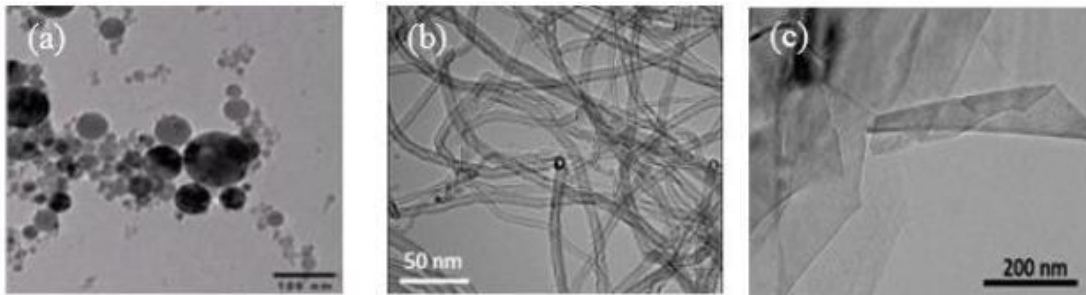


Figure 1.1—Images TEM de quelques exemples de nanoparticules : (a) Nanoparticules sphériques, (b) Nanotubes de carbone et (c) Nano feuilles de graphène. [3]

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont:

a. Les nanoparticules des oxydes métalliques :

- L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)
- L'oxyde de cuivre (CuO)
- L'oxyde de silicium (SiO_2)
- L'oxyde de titanium (TiO_2)

b. Les nanoparticules métalliques :

- L'aluminium (Al)
- Le cuivre (Cu)
- L'or (Au)
- L'argent (Ag)
- La silicone (Si)

c. Les nanoparticules non métalliques :

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

d. Les liquides de base les plus utilisés sont:

- L'eau.
- L'éthylène-glycol, EG.
- Les huiles et autres lubrifiants
- Le Toluène
- Les fluides de réfrigération (R12.R22.....)

Le choix des liquides de base est primordial pour un nano-fluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tous phénomènes d'agréations . La sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule [4].

Le tableau 1.1 compile une variété de synergies entre nanoparticules et fluides de base élaborées par diverses équipes de recherche.

Tableau 1.1-Synergies entre nanoparticules et fluides de base [5] .

	Acétone	Eau	Ethylène glycol	Huile	Toluène	Décane
<i>Ag</i>		×		×		
<i>Au</i>		×			×	
<i>Al₇₀Cu₃₀</i>			×			
<i>Al₂O₃</i>		×	×	×		
<i>Bi₂Te₃</i>						
Diamant (C)		×				
Graphite (C)		×		×		
NTC (C)		×		×		×
Fullerène(C)				×	×	
<i>Cu</i>	×	×	×	×		
<i>CuO</i>		×	×			
<i>Fe</i>			×			
<i>SiC</i>		×				
<i>Ci O₂</i>		×	×			
<i>Ti O₂</i>		×	×			
<i>Wi O₃</i>			×			
<i>Zr O₂</i>		×				

1.2.3. Méthode de préparation des nano fluides

La préparation des nanofluides est la première étape clé dans les études expérimentales avec des nanofluides. Les nano fluides ne sont pas simplement des mélanges liquide-solide. Certaines exigences particulières sont essentielles, telles qu'une suspension

Généralités sur les nano fluides et revue bibliographique

uniforme et stable, une suspension durable, une agglomération négligeable des particules, aucune modification chimique du fluide, etc.

Les nano fluides sont produits en dispersant des particules solides à l'échelle nanométrique dans des liquides de base tels que: l'eau, le glycol éthylique (EG), les huiles, etc. Dans la synthèse des nanofluides ; l'agglomération est un problème majeur. [6]

Il existe principalement deux techniques utilisées pour produire des nanofluides: [7]

- La méthode en une seule étape consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base. Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nanofluides mais permet d'éviter l'agglomération et l'oxydation des nanoparticules. Un exemple de procédé consiste à condenser sous forme de nanoparticules une vapeur métallique dans un réacteur sur un film de liquide à basse tension de vapeur.
- La méthode en deux étapes consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action mécanique à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrasons est souvent nécessaire afin de briser les agglomérats.

En outre, pour éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, on utilise des forces de répulsion électrostatique en chargeant la surface des particules en adaptant le PH. On peut également utiliser les forces de répulsion stériques à l'aide de molécules adsorbées ou greffées sur la surface.

1.2.4. Propriétés thermophysiques des nanofluides

Ces propriétés de solutions préparées sont intensément modifiées suite à l'incorporation des nanoparticules. Certaines propriétés intrinsèques que possèdent ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des caractéristiques du nanofluide obtenu à savoir la taille des nanoparticules, leur nature, la fraction volumique φ , la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, en plus de la température du milieu...

1.2.4.1. Fraction volumique

La fraction volumique des nanoparticules, notée φ , représente le rapport du volume des nanoparticules au volume total, incluant à la fois le fluide et le solide.[8]

$$\varphi = \frac{V_s}{V_f + V_s} \quad (1.1)$$

Avec :

V_s : Volume de solide (nanoparticule)

V_f : Volume de fluide de base

1.2.4.2. La masse volumique

Retournons à l'essence de la définition de la masse volumique d'un mélange

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_n = \frac{m_f m_s}{V_f V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (1.2)$$

Par le biais des équations (1.1) et(1.2), nous pouvons extraire l'expression de la masse volumique du nanofluide à une température spécifique :[8]

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (1.3)$$

Avec :

ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide.

ρ_f : La masse volumique de fluide de base.

ρ_s : La masse volumique de nanoparticule solide.

1.2.4.3. Chaleur spécifique

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 $1^\circ K$ lors de la transformation considérée. [8]

Pour évaluer la chaleur spécifique d'un nano fluide, deux modèles sont généralement invoqués :

a. Modèle du Xuan et Roetzel [9]

Xuan et Roetzel (2000) ont employé la formule ci-dessous :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s \quad (1.4)$$

b. Modèle du Pak et Cho [10]

Pak et Cho (1998) ont employé la formule ci-dessous :

$$(C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(C_p)_s \quad (1.5)$$

1.2.4.4. La viscosité dynamique

Dans cette section, notre attention se porte sur les modèles les plus répandus en ce qui concerne les nano fluides.[11]

a. Einstein 1906 [12]

A été le premier qui a étudié la viscosité dynamique d'un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides en faible concentration volumique (moins que 0.02). La relation est présentée comme suit :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 - 2.5\varphi) \quad (1.6)$$

b. Brinkman 1956 [13]

Il a étendu la formule d'Einstein de manière à englober une vaste gamme de concentrations volumiques. Sa relation conduit à la formule d'Einstein pour les faibles fractions volumiques. La relation est décrite de la façon ci-dessous :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (1.7)$$

c. Batchelor 1977[14]

A étudié théoriquement la viscosité dynamique d'un nanofluide en tenant en compte l'effet de l'interaction hydrodynamique entre deux nanoparticules sphériques, il a montré que la viscosité dynamique d'un nanofluide n'est pas une fonction linéaire de la fraction volumique comme les relations de « Einstein et Brinkman »

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi + 6.2\varphi^2) \quad (1.8)$$

c. Wang et al. 1999 [15]

Wang et al ont expérimentalement discuté la viscosité dynamique d'un nano fluide se composant de l'eau comme fluide de base et des nanoparticules d'alumine, il sont confirmé la proposition de Batchelor en présentant l'équation suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 - 7.3\varphi + 123\varphi^2) \quad (1.9)$$

1.2.4.5. La conductivité thermique

Les chercheurs ont élaboré une gamme de modèles visant à prédire avec précision la conductivité des nano fluides. De multiples expériences ont été minutieusement menées afin de confronter les données empiriques à ces modèles analytiques, construits sur la base d'éléments remarquablement réguliers, tels que des nanoparticules sphériques. Ces modèles, largement documentés dans la littérature spécialisée, constituent des outils prédictifs essentiels, permettant de sonder les mécanismes complexes de transfert thermique au sein des nano fluides. Cette section mettra en lumière les modèles les plus répandus et leurs applications spécifiques dans le domaine des nano fluides.

a. Modèle de maxwell 1873 [16]:

Maxwell a été l'un des premiers à étudier de manière analytique la conduction thermique d'un fluide contenant des particules sphériques en suspension, en négligeant les effets d'interaction entre ces particules. L'équation résultante est la suivante :

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2(K_s - K_f)\varphi}{K_s + 2K_f - (K_s - K_f)\varphi} K_f \quad (1.10)$$

Avec :

K_{nf} : La conductivité thermique du nano fluide.

K_f : La conductivité thermique du fluide de base.

K_s : La conductivité thermique des particules solides.

b. Modèle de Hamilton et Crosser 1962 [17]

Généralités sur les nano fluides et revue bibliographique

Le modèle de Hamilton a été élaboré afin de résoudre une limitation du modèle de Maxwell, qui ne s'applique efficacement qu'aux particules sphériques. Pour pallier cette restriction, le modèle de Hamilton et Crosser a été développé pour améliorer le calcul de la conductivité thermique des nano fluides, quelle que soit la forme des nanoparticules. Pour prendre en compte cette diversité de formes, Hamilton a introduit un paramètre géométrique appelé sphéricité (ψ), qui fait référence à la forme sphérique. Ce coefficient est défini comme le rapport entre la surface d'une sphère de même volume que la nanoparticule et la surface réelle de la nanoparticule. Ainsi, la conductivité thermique apparente du milieu peut être exprimée par la formule suivante :

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n - 1)K_f - (n - 1)(K_f - K_s)\varphi}{K_s + (n - 1)K_f + (K_f - K_s)\varphi} K_f \quad (1.11)$$

Dans la recherche sur les nanofluides, le facteur de forme empirique n est défini comme $n = \frac{3}{\psi}$; où ψ représente le type de particules.

Pour les particules sphériques, n est de 3, tandis que pour les particules cylindriques, il est de 6.

Lorsque ψ est égal à 1, correspondant aux particules sphériques, le modèle de Hamilton-Crosser se confond avec le modèle de Maxwell. Cependant, ces modèles ne fournissent qu'une première approximation de la conductivité thermique des nano fluides. Ainsi, plusieurs corrélations semi-empiriques, basées sur des données expérimentales, sont utilisées pour calculer plus précisément la conductivité thermique des différents types de nano fluides.

$$K_{nf} = (28.905 \varphi^2 + 2.8273\varphi + 1)K_f \quad (1.12)$$

$$K_{nf} = (-13 \varphi^2 + 6.3\varphi + 1)K_f \quad (1.13)$$

$$K_{nf} = (11.6 \varphi^2 + 9.6\varphi + 1)K_f \quad (1.14)$$

$$K_{nf} = (7146 \varphi^2 + 76.6\varphi + 1)K_f \quad (1.15)$$

Les équations: (1.12), (1.13), (1.14) et (1.15) sont des corrélations empiriques utilisées pour estimer la conductivité thermique des nano fluides: ($Al_2O_3 + EG$), ($Al_2O_3 + eau$), ($Cu + eau$) et le nanofluide (*huile + nanotube de carbone*) Respectivement. [18]

1.2.5. Domaine d'Application de nano fluides

Les nano fluides offrent une opportunité pour augmenter l'efficacité énergétique et améliorer le transfert de chaleur dans divers domaines. Dans ce chapitre, nous explorerons différents cas d'utilisation, notamment dans les secteurs du transport, de la micro-électronique, de la défense, de l'énergie nucléaire, de l'aérospatiale et de la biomédecine.

1.2.5.1. Refroidissement des systèmes thermiques

Dans les moteurs de véhicules, le mélange d'éthylène-glycol et d'eau est couramment employé comme liquide de refroidissement. Ce liquide joue un rôle double en réduisant l'usure grâce à l'introduction de nanoparticules pour améliorer la lubrification, ainsi qu'en améliorant les propriétés tribologiques et la résistance à l'usure. Ces améliorations résultent de la réduction du frottement entre les éléments mécaniques mobiles.[19]

1.2.5.2. Refroidissement des systèmes électroniques

Les nano fluides sont envisagés comme des agents de refroidissement pour les processeurs centraux des ordinateurs personnels dans les circuits intégrés. Leur impact sur les capacités de transfert de chaleur d'un oscillateur thermique est également étudié.[19]

1.2.5.3. Refroidissement des systèmes militaires

Le refroidissement des systèmes militaires englobe notamment le refroidissement de l'électronique de puissance et des armes à énergie dirigée. Ces applications impliquent des flux thermiques très élevés (> 500 à 1000 W/cm^2) où les nanofluides ont prouvé leur efficacité pour refroidir ces systèmes, ainsi que d'autres systèmes militaires tels que les véhicules militaires, les sous-marins et les diodes laser à haute puissance.[19]

1.2.5.4. Refroidissement des systèmes spatiaux

Le rôle crucial des nanoparticules dans le fluide de refroidissement en électronique générale a été mis en lumière par diverses études, notamment dans le contexte spatial où la densité de puissance atteint des niveaux considérables.[19]

1.2.5.5. Refroidissement des systèmes nucléaires

L'Institut de Technologie de Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour la nouvelle nanotechnologie (nanofluide) dans l'industrie de l'énergie

Généralités sur les nano fluides et revue bibliographique

nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûreté neutronique, et la performance économique des systèmes nucléaires.[19]

1.2.5.6. Biomédecine

Les nano fluides et les nanoparticules ont beaucoup d'applications en biomédecine. Par exemple, pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles de traitement du cancer, les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteurs des drogues. Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de la région chirurgicale. Les nano fluides pourraient être employés pour produire une température plus élevée autour des tumeurs pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines voisines. [20]

1.2.5.7. Autres applications

Dans de nombreuses situations, l'amélioration de l'efficacité du transfert thermique peut être associée à divers aspects tels que la qualité, la quantité et le coût des produits issus d'un processus. Par exemple, dans le domaine de l'énergie renouvelable, les nanofluides sont employés pour accroître le transfert de chaleur des capteurs solaires aux réservoirs de stockage, ainsi que pour augmenter la densité énergétique. Les liquides réfrigérants à base de nanofluides présentent un potentiel d'application dans la plupart des industries de transformation, notamment celles des matériaux, de la production chimique, de l'alimentation, des boissons, du pétrole et du gaz.[20]

1.2.6. Les avantages et les inconvénients des nano fluides

1.2.6.1. Les avantages[4]

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Volume réduit par rapport au liquide pur pour obtenir une équivalence d'intensification de transfert de chaleur.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

1.2.6.2. Les inconvénients [4]

- Le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- Le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.

- L'instabilité des nanoparticules dispersion.
- Le coût élevé des nano fluides

1.3. Transfert thermique convectif

1.3.1. Définition

La convection est un processus de transfert thermique qui se produit dans les fluides en mouvement, qu'ils soient liquides ou gazeux. Ce phénomène est caractérisé par le déplacement des particules constitutives d'un fluide d'une région à une autre, où les températures sont différentes. Ce déplacement engendre un brassage intense des particules fluides, favorisant ainsi les échanges d'énergie sous forme de chaleur ainsi que de quantité de mouvement entre elles.

1.3.2. Type de convection

Trois principaux types de convection peuvent être distingués

1.3.2.1. La convection naturelle

En convection naturelle, les mouvements des particules de fluide ont pour origine les différences de masse volumique induites par un gradient de température imposé, en présence du champ de gravités.

1.3.2.2. La 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.

1.3.2.3. La 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.

1.4. Synthèse bibliographique

Dans une recherche expérimentale, A.A.R. Darzi et al. [21], a examiné les effets d'un nanofluide Al_2O_3 , avec un diamètre moyen de 20 nm, sur le transfert de chaleur, la perte de pression et les performances thermiques d'un échangeur de chaleur à double tubes. Cette étude a impliqué la mesure de la viscosité effective du nanofluide à différentes

Généralités sur les nano fluides et revue bibliographique

températures (de 27 °C à 55 °C) et des essais réalisés à divers nombres de Reynolds (environ de 5000 à 20 000) ainsi qu'à différentes concentrations en nanoparticules, allant jusqu'à 1% en volume. Les résultats ont révélé un potentiel prometteur pour améliorer les performances thermiques de l'échangeur de chaleur en introduisant des nanoparticules, sans entraîner de pénalité significative en termes de perte de pression. De plus, Smith a établi une corrélation empirique entre le nombre de Nusselt, le nombre de Reynolds et la concentration en nanoparticules.

T.H. Ruvo et al. [22] se penche sur l'utilisation exhaustive des nanofluides par rapport aux fluides de base, en se concentrant sur l'analyse de divers modèles existants du coefficient de conduction thermique et de la viscosité absolue du nanofluide Al_2O_3 -eau. Pour évaluer ces modèles, une étude a été menée sur un problème de référence impliquant un écoulement convectif naturel, avec des variations du nombre de Rayleigh entre 10^3 et 10^5 et de la proportion de volume solide ϕ de 0 à 4%. En utilisant une méthode de discrétisation numérique basée sur la méthode des éléments finis de Galerkin, les résultats obtenus ont été comparés à des données expérimentales existantes, en prenant en compte le nombre de Prandtl moyen et le nombre de Nusselt moyen. Les analyses de Jones ont confirmé que différents modèles sont adaptés à différentes concentrations en nanoparticules : le modèle AH pour une faible concentration ($\phi = 0,01$), le modèle AM pour une concentration modérée ($0,01 < \phi < 0,04$), et le modèle NH pour une proportion de volume solide plus élevée ($\phi = 0,04$). La figure 1.2 montre le domaine géométrique de calcul pour cette étude.

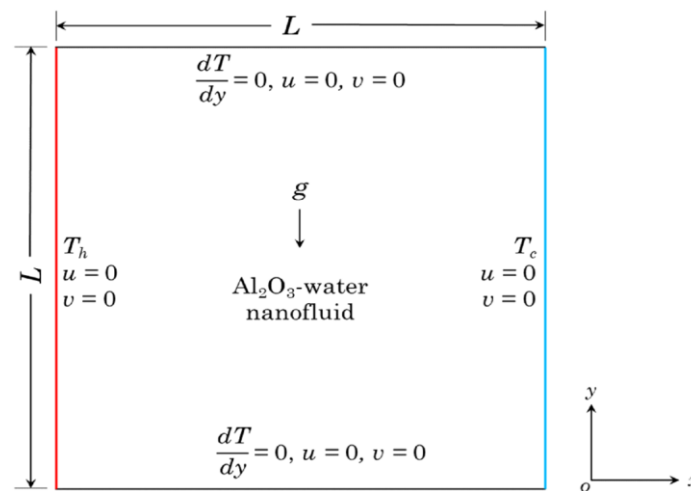


Figure 1.2 - le domaine géométrique et de calcul. [22]

Généralités sur les nano fluides et revue bibliographique

L'étude de T.H. Ruvo et al [23] se concentre sur la convection mixte dans une cavité ouverte en forme de T, un sujet d'intérêt clé en ingénierie depuis longtemps. L'objectif est d'identifier la condition d'entrée la plus efficace pour favoriser le transfert de chaleur. Trois conditions d'entrée différentes (uniforme, Poiseuille et Couette) sont examinées pour évaluer leur impact sur le transfert de chaleur par convection mixte. L'incorporation de nanofluides à base d'eau- Al_2O_3 est également étudiée, en variant les fractions volumiques solides de 0 à 0,04. L'analyse numérique, utilisant les résidus pondérés de Galerkin, couvre une gamme étendue de nombres de Grashof (Gr) et de nombres de Reynolds (Re). Les résultats mettent en évidence l'importance de la condition d'entrée uniforme sur le taux de transfert de chaleur dans la cavité, avec des variations de Gr et Re . De plus, l'ajout de nanofluides améliore les performances de transfert de chaleur, surtout à des valeurs élevées de Grashof ($Gr > 10^3$) a $Ri = 1$.

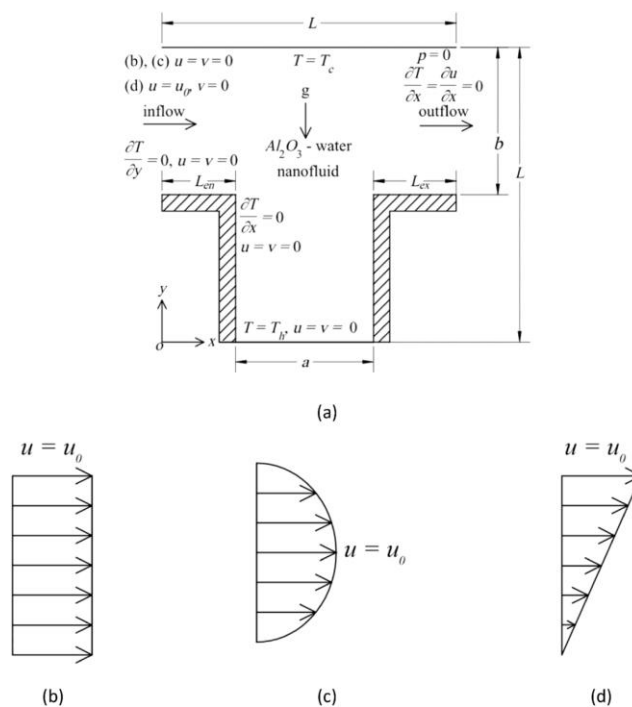


Figure 1.3 – (a) Diagramme schématique de la cavité en forme de T, ayant les conditions d'écoulement de (b) uniforme, (c) Poiseuille et (d) Couette [23] .

Dans une étude numérique, V. Murali Krishna et al [24] analyse le flux laminaire de nanofluides hybrides dans un MCHS rectangulaire pour comprendre la convection forcée. Il examine l'effet du nombre de Reynolds et de la concentration de nanoparticules sur la performance du système. Les résultats montrent une amélioration du transfert de chaleur

Généralités sur les nano fluides et revue bibliographique

avec une augmentation de la fraction volumique, tandis que la perte de pression reste marginale par rapport aux nanofluides mono. Une augmentation significative du nombre de Nusselt est observée pour le nanofluide hybride Cu-Al₂O₃/eau, avec une puissance de pompage réduite par rapport aux nanofluides Cu/eau. La figure 1.3 illustre le schéma rectangulaire MCHS ainsi que le modèle CATIA.

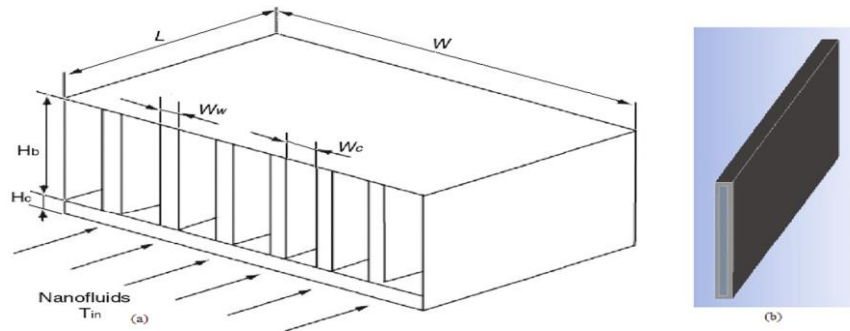


Figure 1.4 –Schéma du (a) rectangulaire MCHS et (b) modèle CATIA[24] .

L'étude de Kavitha. C et al [25] consiste à analyser numériquement l'efficacité d'un dissipateur thermique à canaux ailetés utilisant des nanofluides Al₂O₃-eau comparé à de l'eau distillée. Les résultats ont montré une amélioration significative du transfert de chaleur avec les nanofluides, offrant jusqu'à 68 % d'amélioration du coefficient de transfert de chaleur dans une plage de vitesses d'entrée spécifique. De plus, la résistance thermique des nanofluides s'est avérée bien inférieure à celle de l'eau distillée, ce qui en fait des candidats efficaces pour le refroidissement des composants électroniques. Sur la figure 1.3 le schéma de la structure du dissipateur thermique du canal d'aileton est illustré.

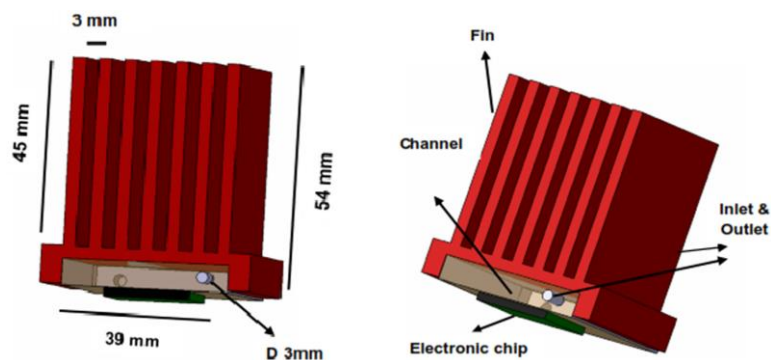


Figure 1.5 –Schéma de la structure du dissipateur thermique à canal à ailettes.[25]

Esfe et al. [26] ont examiné la convection mixte laminaire d'un nanofluide dans un canal horizontal doté de deux sources thermiques à température constante montées sur la paroi inférieure. Dans cette étude, ils ont utilisé un nanofluide Al₂O₃/eau. Ils ont également

Généralités sur les nano fluides et revue bibliographique

appliqué la méthode du volume limité pour résoudre les équations gouvernantes, en choisissant trois modèles thermiques pour l'étude. Leur recherche a démontré que le nombre de Nusselt moyen augmente de moins de 10 % au-dessus des obstacles, avec une fraction de nanoparticules passant de 0 % à 5 %. Ils ont constaté que la différence entre le nombre de Nusselt moyen et les trois modèles thermiques ne dépasse pas 3 %. La figure 1.6 présente les Dimensions géométriques du canal et position des obstacles chauds.

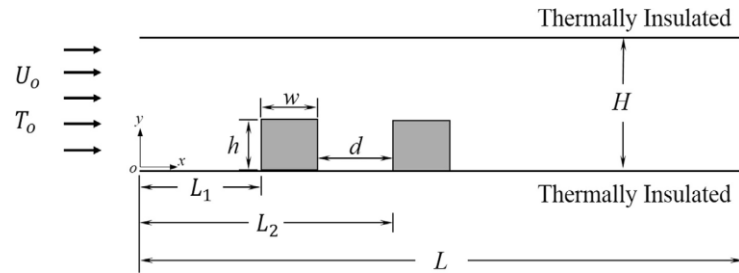


Figure 1.6 -les dimensions et la géométrie du canal [26].

Dans son étude récente, D. Hadi [[27] s'est penché sur la modélisation numérique du refroidissement par convection dans un microcanal vertical tridimensionnel. L'objectif principal était d'évaluer l'impact de différentes nanoparticules (CuO, TiO₂, Ag) dispersées dans l'eau (à une concentration de $\phi = 0.02$) sur les distributions de vitesse et de température. Pour ce faire, l'analyse a porté sur la variation du nombre de Nusselt moyen et du coefficient de transfert thermique moyen en fonction du nombre de Reynolds. L'étude a été menée à l'aide du logiciel de simulation numérique ANSYS Workbench (version 2019). Les résultats obtenus ont souligné que l'augmentation de la conductivité thermique du nano-fluidifiant entraîne une amélioration significative de l'échange thermique dans le processus de refroidissement par convection, la figure 1.3 représente la géométrie des microcanaux placés verticalement en 3D.

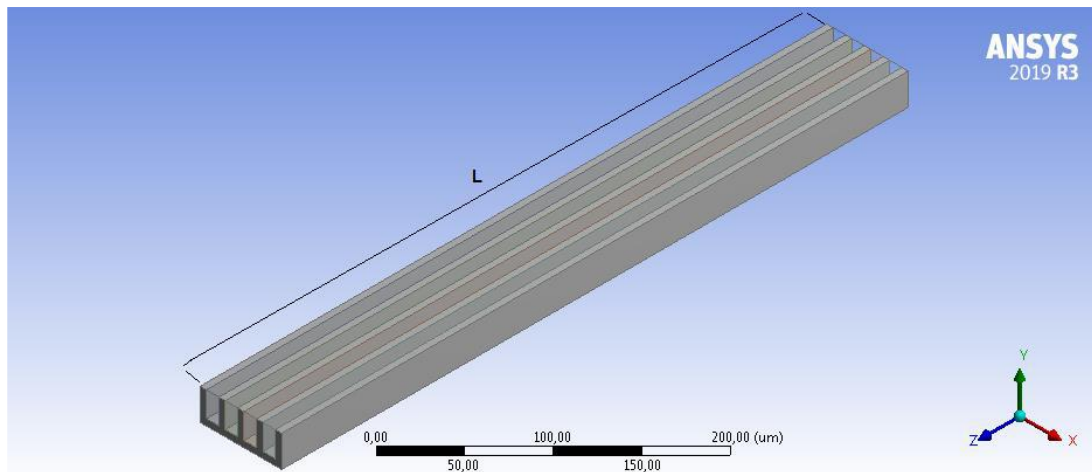


Figure 1.7 –Présentation de la géométrie des microcanaux en 3D [27].

1.5. Conclusion

En conclusion, ce premier chapitre a dressé un portrait complet des nanofluides, de leur synthèse à leurs propriétés thermiques, en passant par leurs applications potentielles. En mettant en lumière leurs avantages et leurs inconvénients, nous sommes désormais prêts à approfondir notre étude en analysant numériquement la performance thermique de leur écoulement dans un canal. Ce chapitre souligne l'importance croissante des nanofluides dans le domaine énergétique et offre un aperçu des perspectives futures de recherche

Chapitre 2

2. Géométrie et modélisation mathématique

Chapitre 2

2. Géométrie et modélisation mathématique

2.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous approfondissons notre compréhension de la convection mixte dans un canal horizontal bidimensionnel en examinant divers aspects liés à la géométrie du problème, aux équations de conservation, aux hypothèses et conditions aux limites, ainsi qu'à la formulation mathématique du problème. Nous commençons par une présentation de la géométrie du canal et des sources de chaleur, suivie d'une discussion sur les équations fondamentales de la mécanique des fluides utilisées pour modéliser le problème. Ensuite, nous examinons les hypothèses sous-jacentes et les conditions aux limites dimensionnelles et adimensionnelles

2.2.Description du problème

Nous abordons la problématique de la convection forcée dans un canal horizontal bidimensionnel, où deux sources de chaleur, représentant des composants électroniques chauds, sont positionnées respectivement sur la paroi inférieure et supérieure du canal. Les parois du canal sont considérées comme adiabatiques. À l'entrée du canal, un flux d'eau de refroidissement est imposé avec une vitesse constante et une température définie. Les composants chauffants maintiennent une température uniforme. le fluide est caractérisé par sa nature newtonienne, incompressible et laminaire. Les nanoparticules dans le nanofluide sont en équilibre thermique avec le fluide de base. Les propriétés thermophysiques de l'eau pure et des nanoparticules à une température de 25°C sont fournies, tandis que celles du nanofluide sont considérées constantes, à l'exception de la variation de densité, prise en compte par le modèle de Boussinesq. Les modèles de Brinkman et de Maxwell-Garnett sont utilisés pour calculer respectivement la viscosité et la conductivité thermique du nanofluide.

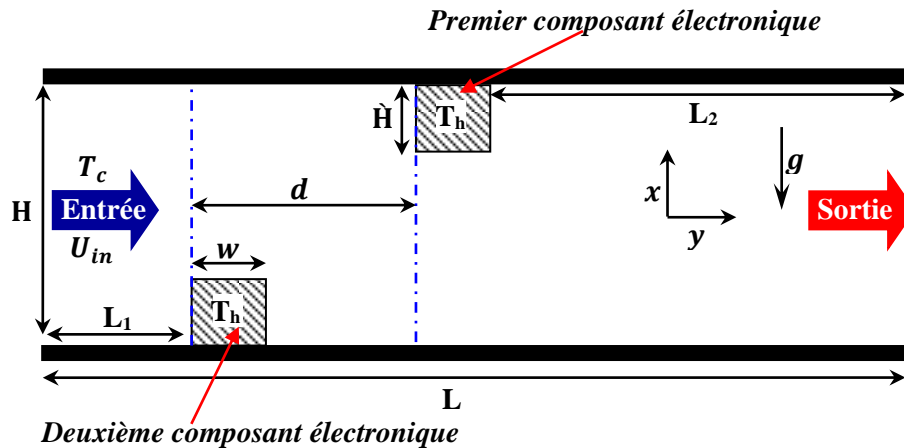


Figure 2.1- Géométrie du model physique étudié.

2.3. Formulation mathématique de problème

La modélisation mathématique des phénomènes de convection repose sur l'établissement d'équations reliant les divers paramètres tels que la pression, la température et la vitesse. Ces équations découlent des principes de conservation fondamentaux, notamment la conservation de la masse, la conservation de la quantité de mouvement et la conservation de l'énergie. En les appliquant aux fluides en mouvement, nous pouvons décrire de manière mathématique les mécanismes de transfert de chaleur et de masse associés à la convection.

2.4. Equations gouvernantes

2.4.1. Equation de continuité

En mécanique des fluides, la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel peut être formulée à travers l'équation de continuité. Cette équation se manifeste par la corrélation suivante [28] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad (2.1)$$

2.4.2. Equation de quantité de mouvement

Pour un écoulement incompressible (avec ρ constante) présentant une viscosité uniforme (μ Constante), l'expression de la conservation de la quantité de mouvement d'un fluide Newtonien incompressible dans un champ gravitationnel est formulé par l'équation de Navier-Stokes suivante [29] :

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{F} - \overrightarrow{grad}P + \mu \Delta \vec{V} \quad (2.2)$$

Avec :

\vec{F} : Les forces volumiques.

P : La pression [Pa].

ρ : La variation de masse volumique due à la convection forcée.

$\mu \Delta \vec{V}$: Forces de viscosité (contraintes) [N]

2.4.3. Equation de conservation d'énergie

L'équation de conservation de l'énergie découle du premier principe de la thermodynamique, qui établit une relation entre les différentes formes d'énergie, Soit :
[29]

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \text{div}(K \overrightarrow{grad}T) + T\beta \frac{dp}{dt} + q + \Psi \quad (2.3)$$

Avec :

Ψ : fonction de dissipation regroupant tous les termes contenant la viscosité μ .

q : La source de chaleur interne. [J]

K : La conductivité thermique. [W/m.k]

2.5. Hypothèse du problème

- Le fluide est considéré comme newtonien, incompressible
- Ecoulement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.
- Régime d'écoulement laminaire et permanent.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- Ecoulement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.
- Avec source de chaleur ; absence de source de masse ou de réaction chimique.

2.6. Formulation du problème

2.6.1. Modèle mathématique dimensionnelle

a. Pour un fluide pur

- Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

- Equation de quantité de mouvement

Suivant l'axe x :

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (2.5)$$

Suivant l'axe y :

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (2.6)$$

- Equation de l'énergie :

$$\rho C_p \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = K \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (2.7)$$

Les équations présentées précédemment peuvent être écrites en forme dimensionnelle comme suit :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.8)$$

$$\left[\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.9)$$

$$\left[\frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.10)$$

$$\left[\frac{\partial(\rho C_p u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p v T)}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.11)$$

b. Pour un nano fluide

- **Equation de continuité :**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.12)$$

- **Equation de quantité de mouvement :**

Suivant l'axe x :

$$\rho_{nf} \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (2.13)$$

Suivant l'axe y :

$$\rho_{nf} \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (2.14)$$

- **Equation de l'énergie :**

$$\rho_{nf} C_{p_{nf}} \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = K_{nf} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (2.15)$$

Les équations présentées précédemment peuvent être écrites en forme dimensionnelle comme suit :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.16)$$

$$\left[\frac{\partial(\rho_{nf} u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{nf} u v)}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.17)$$

$$\left[\frac{\partial(\rho_{nf} u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{nf} v v)}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.18)$$

$$\left[\frac{\partial(\rho_{nf} C_{p_{nf}} u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{nf} C_{p_{nf}} v T)}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.19)$$

2.6.2. Conditions aux limites dimensionnelles

Les conditions aux limites sous forme dimensionnelle sont les suivantes :

- **Entrée :**
 - ✓ Position : $x = 0$
 - ✓ Vitesse horizontale : $u = u_{in}$
 - ✓ Vitesse verticale : $v = 0$
 - ✓ Température : $T = T_{in}$
- **Sortie :**
 - ✓ Position : $X = L$
 - ✓ Vitesse horizontale : $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$
 - ✓ Vitesse verticale : $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$
 - ✓ Température : $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$
- **Paroi supérieure :**
 - ✓ Position : $y = H$
 - ✓ Vitesse horizontale : $u = 0$
 - ✓ Vitesse verticale : $v = 0$
 - ✓ Température : $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$
- **Paroi inférieure :**
 - ✓ Position : $y = 0$
 - ✓ Vitesse horizontale : $u = 0$
 - ✓ Vitesse verticale : $v = 0$
 - ✓ Température : $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$
- **Composant supérieur :**
 - ✓ Position : $\frac{L_1}{H} + \frac{d}{H} \leq x \leq \frac{L_1}{H} + \frac{d}{H} + \frac{w}{H}$; $H - \frac{h}{H} \leq y \leq H$
 - ✓ Vitesse horizontale et verticale : $u = v = 0$
 - ✓ Température : $T = T_h$
- **Composant inférieur :**
 - ✓ Position : $\frac{L_1}{H} \leq x \leq \frac{L_1}{H} + \frac{w}{H}$; $0 \leq y \leq H$

✓ Vitesse horizontale et verticale : $u = v = 0$

✓ Température : $T = T_h$

2.6.3. Modèle mathématique en forme adimensionnelle

Pour faciliter l'analyse, il est avantageux d'adopter une approche adimensionnelle pour les variables. Cette méthode permet de minimiser le nombre de paramètres variables, ce qui simplifie la résolution des équations et la compréhension des résultats. Ainsi, on intègre les variables sans dimension dans nos équations. Les variables adimensionnelles suivants seront pris en compte :

2.6.3.1. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est une grandeur adimensionnelle utilisée en mécanique des fluides pour caractériser le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses dans un écoulement fluide. Il est défini par la relation suivante :

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (2.14)$$

Où :

U : Représente les vitesses caractéristiques du fluide, exprimées en mètres par seconde $\left(\frac{m}{s}\right)$.

D_h : Désignée le diamètre hydraulique, exprimées en mètres (m)

μ : correspond à la viscosité dynamique du fluide, exprimée en $\left(\frac{Kg}{ms}\right)$

2.6.3.2. Le nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl quant à lui, est une autre grandeur adimensionnelle qui évalue le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement. Ce nombre permet de comparer la vitesse des phénomènes thermiques à celle des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Il est nommé d'après le physicien allemand Ludwig Prandtl et est défini par la relation suivante :

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{K} \quad (2.15)$$

Où :

ϑ : représente la viscosité cinématique du fluide, exprimée en $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

α : désigne la diffusivité thermique, exprimée en $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

k : La conductivité thermique, exprimée en $\left(\frac{W}{m K}\right)$

Cp : Chaleur spécifique, exprimée en $\left(\frac{W}{m K}\right)$

2.6.3.3. Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof, noté Gr, est défini comme le rapport entre la force de flottabilité (poussée d'Archimède) et les forces visqueuses dans un système en convection naturelle. Il est caractéristique du processus de convection naturelle et déterminé par la variation de masse volumique et le gradient de température dans le système.

La formule mathématique du nombre de Grashof est la suivante :

$$Gr = \frac{g\beta D_h^3 \Delta T}{\vartheta^2} \quad (2.16)$$

Où :

g : La gravité en $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

2.6.3.4. Nombre de Rayleigh

Le nombre de Rayleigh, noté Ra, est un nombre sans dimension qui regroupe les effets des nombres de Prandtl (Pr) et de Grashof (Gr) dans un système de convection naturelle. Il est donné par la relation :

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{gD_h^3 \Delta T}{\vartheta\alpha} \quad (2.17)$$

Le nombre de Rayleigh est utilisé pour déterminer le comportement de la convection naturelle dans un fluide.

2.6.3.5. Nombre de Nusselt

Constitue une mesure cruciale dans la caractérisation des phénomènes de transfert de chaleur. Sa définition est formellement énoncée par l'expression suivante :

$$Nu = \frac{h D_h}{K} \quad (2.18)$$

Où

h : coefficient de transfert de chaleur par convection $\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$

Considérons que:

$$X^* = \frac{x}{H} \quad (2.19), Y = \frac{y}{H} \quad (2.20), \quad U^* = \frac{u}{U_{in}} \quad (2.21), \quad V = \frac{v}{U_{in}} \quad (2.22),$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (2.23) \text{ et } P = \frac{p}{\rho_{nf} u_{in}^2} \quad (2.24)$$

Les équations gouvernantes de l'écoulement peuvent s'écrire comme suit :

a. Pour un nano fluide

- **Equation de continuité :**

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (2.25)$$

- **Equation de quantité de mouvement :**

Suivant l'axe x :

$$\left[U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right] = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right] \quad (2.26)$$

Suivant l'axe y :

$$\left[U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right] = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] + \frac{Gr}{Re^2} \theta \quad (2.27)$$

- Equation de l'énergie :

$$\left[U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right] = \frac{1}{Pr Re} \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right] \quad (2.28)$$

2.6.4. Conditions aux limites adimensionnelles

- **Entrée**

✓ Position : $X = 0$

✓ Vitesse horizontale et verticale : $U = 1; V = 0$

- ✓ Température : $\theta = 0$
- **Sortie :**
 - ✓ Position : $X = L$
 - ✓ Vitesse horizontale et verticale : $\frac{\partial U}{\partial X} = 0; V = 0$
 - ✓ Température : $\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0$
- **Paroi supérieure :**
 - ✓ Position : $Y = H$
 - ✓ Vitesse horizontale et verticale $U = 0; V = 0$
 - ✓ Température : $\frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$
- **Paroi inférieure :**
 - ✓ Position : $Y = 0$
 - ✓ Vitesse horizontale et verticale $U = 0; V = 0$
 - ✓ Température : $\frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$
- **Composant supérieur:**
 - ✓ Position : $\frac{L_1}{H} \leq X \leq \frac{L_1+w}{H}; 0 \leq Y \leq \frac{h}{H}$
 - ✓ Vitesse horizontale et verticale $U = V = 0$
 - ✓ Température : $\theta = 1$
- **Composant inférieur:**
 - ✓ Position : $\frac{L_1+d}{H} \leq X \leq \frac{L_1+d+w}{H}; \frac{H-h}{H} \leq Y \leq 1$
 - ✓ Vitesse horizontale et verticale $U = V = 0$
 - ✓ Température : $\theta = 1$

2.7. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a jeté les bases essentielles pour comprendre la convection mixte dans le canal horizontal bidimensionnel. En explorant la géométrie du problème, les équations de conservation, les hypothèses et conditions aux limites, nous sommes mieux préparés pour la modélisation et la simulation numérique ultérieures de la convection mixte.

Chapitre 3

3. Méthodologies de simulation et modélisation numérique

Chapitre 3

3. Méthodologies de simulation et modélisation numérique

3.1.Introduction

La simulation numérique par la dynamique des fluides numérique¹est devenue un outil incontournable dans l'étude des phénomènes de transport thermique, notamment dans le domaine de la convection mixte. Ce chapitre est dédié à l'exploration de la simulation numérique de l'écoulement des nanofluides dans un canal en convectionmixte, en mettant en œuvre les logiciels de modélisation Gambit et ANSYS Fluent. On commence par une présentation des principes fondamentaux de la simulation numérique en CFD, en mettant l'accent sur la méthode des volumes finis. Ensuite, on détaille les différentes étapes de la modélisation numérique, du prétraitement à la post-simulation, en soulignant le rôle crucial de Gambit et ANSYS Fluent dans ce processus.

3.2.Méthode numérique

L'objectif des méthodes numériques est de proposer une approche de résolution reflétant le comportement réel des phénomènes physiques. Parmi les techniques les plus couramment utilisées pour résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles gouvernantes, on peut citer :

3.2.1. La méthode des différences finies (MDF)

La méthode des différences finies présente une technique pour résoudre les équations aux dérivées partielles, en approximant les dérivées par des différences finies. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre déterminé de nœuds et à représenter la fonction recherchée dans chacun des nœuds du domaine par une expansion en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en une équation algébrique pour chaque nœud. D'autre part, la méthode des différences finies (FDM) est simple et efficace sur des grilles structurées et ne conserve pas la quantité de mouvement, l'énergie et la masse sur des grilles grossières.[28]

¹La dynamique des fluides numérique : « Computational fluid dynamics CFD »

3.2.2. La méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis consiste à transformer les équations différentielles en formes intégrales, basées sur le principe de minimisation d'une quantité comme l'énergie, afin d'obtenir une solution précise. En d'autres termes, elle permet de représenter mathématiquement un modèle global dans un domaine d'étude donné. Son principe fondamental réside dans la subdivision du domaine en régions élémentaires, appelées éléments finis, où les formes intégrales sont établies et minimisées. Ensuite, les calculs sont organisés sous forme matricielle, suivis de la résolution du système algébrique correspondant. Cette méthode est particulièrement utile pour résoudre les équations aux dérivées partielles dans des géométries complexes. Bien que largement utilisée dans l'analyse structurelle des solides, elle peut également s'appliquer aux fluides, offrant une grande précision sur des grilles grossières. Toutefois, elle peut être lente à exécuter pour des problèmes de grande envergure et n'est pas idéale pour les écoulements turbulents.[28]

3.2.3. La méthode des volumes finis (MVF)

En ce qui concerne la méthode du volume fini, elle est largement utilisée et convient bien à la résolution des lois de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie). De plus, c'est une approche courante utilisée dans les codes de CFD. Un de ses avantages est que les équations sont calculées de manière itérative en imposant des conditions initiales et des conditions limites du domaine. Le solveur cherche alors une solution des champs de pression, de vitesse, de température...etc. Cette méthode sera discutée dans le titre suivant.[28]

3.3.Principe de la méthode de volume finis

Les formulations conservatrices des équations aux dérivées partielles sont précieuses car elles peuvent être reformulées de manière intégrale en utilisant le théorème de la divergence. Le principe de conservation constitue le fondement de la méthode des volumes finis, énonçant que toute variation d'une propriété est liée au flux net traversant la frontière S qui encercle le volume Ω . La méthode des volumes de contrôle représente ainsi une approche de discrétisation essentielle pour résoudre les équations formulées de

manière conservatrice. Ce principe, initialement élaboré pour les écoulements compressibles par Godunov [30] et Glimm [31], puis largement diffusé dans la communauté scientifique des mécaniciens par Patankar et Spalding [32] dans les années 70, a été abondamment discuté par Patankar [33] en 1980. Fondamentalement, la méthode des volumes finis implique l'intégration de l'équation à résoudre sur chaque volume de contrôle.

Pour illustrer, comme le montre la figure 3.1, le domaine de calcul est discrétisé à l'aide d'une grille dimensionnelle (qu'elle soit uniforme ou non) dans les deux directions, orientée de manière positive vers la droite (Est) et vers le haut (Nord), respectivement. Lors de l'écriture du schéma de discrétisation en un point P, une nomenclature adaptée au principe de la méthode des volumes finis est choisie pour organiser le stockage des variables dans notre maillage, dans le but de faciliter les étapes ultérieures de la discrétisation. Ainsi, l'élément P, comme défini dans la figure 3.1, utilise des indices majuscules (E, W, N, S) pour représenter les variables associées aux centroides voisins de P; tandis que des indices minuscules (e, w, n, s) sont utilisés pour désigner les faces correspondantes. [34]

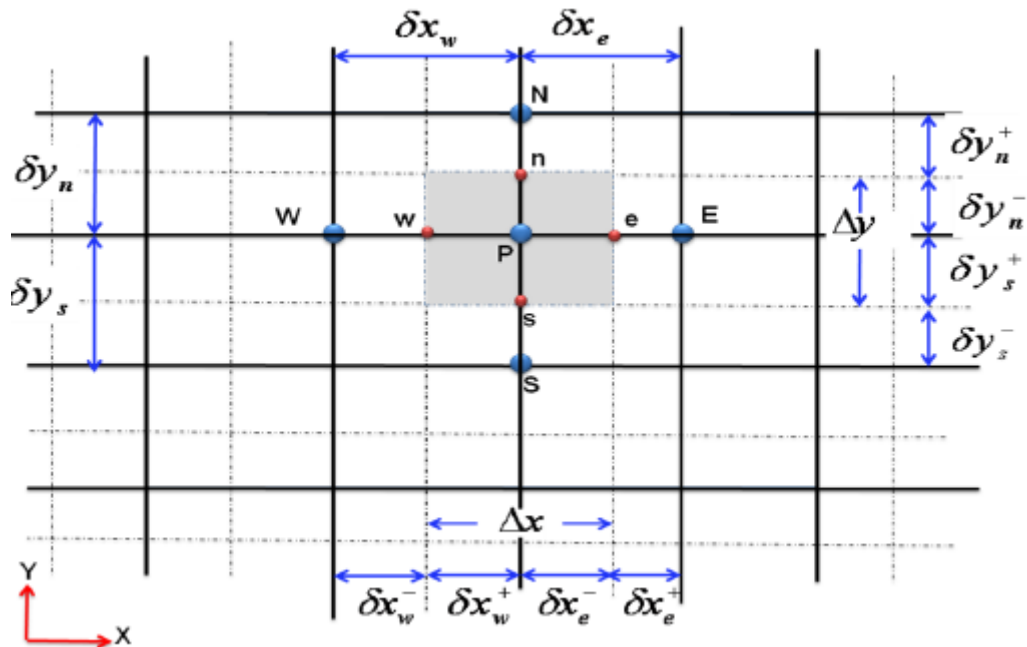


Figure 3.1- Volume de contrôle dans le cas 2D [34].

3.4. Etapes de la modélisation numérique

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

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

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

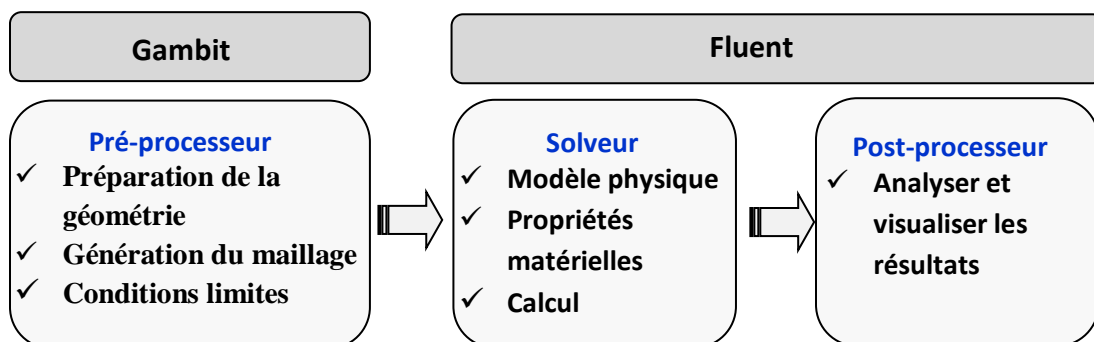


Figure 3.2- Structure de base du code Fluent.

3.5. Présentation des logiciels Gambit et Fluent

3.5.1. Gambit

Le Gambit, un outil de prétraitement, joue un rôle crucial dans la génération de maillages pour modéliser les champs d'écoulement. Fondamentalement, il repose sur

Méthodologies de simulation et modélisation numérique

trois fonctions principales : la construction du domaine géométrique, la génération du maillage et la définition des conditions aux limites.[35]

- La construction du domaine géométrique consiste à définir les limites du domaine de calcul, représentées par des segments en 2D et des faces en 3D. En 3D, le volume est créé à partir des sommets, des arêtes, puis des faces générées par Gambit. Il est également possible d'importer la géométrie à partir d'autres logiciels de CAO tels que SolidWorks, CATIA, Pointwise, etc.

- La génération du maillage implique la subdivision des domaines géométriques préalablement préparés de différentes manières. Les types de maillage incluent le maillage structuré, non structuré et hybride. Pour obtenir un maillage satisfaisant, il est essentiel d'assurer une résolution adéquate dans les régions présentant des gradients sévères, un lissage efficace des transitions entre les zones de maillage fin et grossier, ainsi que la minimisation du nombre total de cellules.

- La définition des conditions aux limites dans Gambit est facilitée par un menu offrant plusieurs types de conditions, tels que la spécification de la vitesse à l'entrée du domaine exemple :('Velocity Inlet') et de la pression à la sortie ('Pressure Outlet')

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

Parmi ces paramètres, on peut citer [36]:

- ✓ Le nombre de mailles ;
- ✓ La distance entre les mailles (concentration des mailles) ;
- ✓ La forme de la maille ;
- ✓ Les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

3.5.2. Fluent

Le solveur Fluent ; utilisé pour résoudre les équations gouvernantes via la méthode des volumes finis, requiert plusieurs étapes pour assurer une résolution précise et efficace.

3.5.2.1. Importation du maillage

Le processus débute par l'importation du fichier de maillage, généralement avec l'extension '.msh', créé par Gambit. Il est crucial de vérifier ce maillage pour détecter et

corriger les éventuelles erreurs. De plus, il convient de s'assurer que les conditions aux limites définies dans Gambit sont correctement intégrées et que les dimensions affichées correspondent aux paramètres physiques du problème.[35]

3.5.2.2. Configuration du solveur

Le choix du type de solveur est une étape essentielle, avec des options adaptées au problème étudié. Par exemple, on peut opter pour un solveur basé sur la pression (pour les écoulements incompressibles), en 2D (pour des simulations planaires), implicite (utilisant un schéma implicite) et steady (stationnaire). Fluent propose une variété de modèles de turbulence, dont certains sont adaptés à des écoulements laminaires ou turbulents.[35]

3.5.2.3. Définition des conditions et des critères de convergence

Il est nécessaire de spécifier les propriétés du fluide à partir d'un menu dédié, ainsi que la pression de référence. Les conditions aux limites doivent également être fixées avec précision. Les critères de convergence, tels que les résidus entre les itérations successives, doivent être définis pour garantir l'arrêt des calculs. Ces critères peuvent varier selon le modèle d'écoulement étudié.[35]

3.5.2.4. Couplage pression vitesse [37]

Cette méthode indique l'algorithme numérique qui utilise une combinaison d'équations de Continuité et de quantité de mouvement pour dériver une équation de pression (ou de correction de la pression) lors de l'utilisation du solveur basé sur la pression.

Il existe différents algorithmes tels que :

- **SIMPLE** : qui est un schéma robuste a été créé par Patankar [23].
- **SIMPLEC** : ce qui permet une convergence plus rapide pour des problèmes simples.
- **PISO** : ce qui est utile et recommandé pour un flux instable ou pour des mailles contenant des cellules avec une asymétrie supérieure à la moyenne.
- **Coupled** : ce qui est également un schéma pour résoudre ce couplage mais si le solveur Couplé basé sur la pression est activé.

3.5.2.5. Discrétisation spatiale [37]

Pour résoudre les équations de quantité de mouvement, les variables de champ au centre de la cellule doivent être interpolées sur les faces du volume de contrôle. Les schémas d'interpolation sont les suivants :

- **First-Order Upwind** : Dans cette méthode, la convergence est plus facile, mais la précision est de premier ordre.
- **Second-Order Upwind** : dans le cas d'un maillage triangulaire / tétraédrique ou lorsque l'écoulement n'est pas aligné avec la grille, ce schéma est recommandé.
- **Third-Order MUSCL** : il est plus précis dans la prévision des écoulements secondaires, des tourbillons, des forces, etc. Il est conseillé pour les maillages non structurés.
- **QUICK** : est appliqué aux maillages quadrilatéraux / hexaédrique et hybrides, utiles pour les écoulements en rotation / tourbillonnants, sur un maillage uniforme, la précision de ce schéma est de 3ème ordre.

3.5.2.6. Initialisation et lancement de la simulation

Avant de lancer la simulation, il est recommandé d'initialiser le champ de calcul en utilisant des conditions d'entrée appropriées ou en se basant sur les résultats d'un calcul précédent ayant déjà convergé. Une fois le champ initialisé, la simulation peut être lancée en spécifiant le nombre d'itérations à effectuer.[35]

3.5.2.7. Post-traitement et sauvegarde des résultats

Une fois la simulation est terminée ; il est conseillé de sauvegarder les résultats obtenus pour une analyse ultérieure. Ces résultats peuvent être ensuite traités via un logiciel de post-traitement pour en extraire des informations pertinentes.[35]

3.6. Mise en place de la simulation

3.6.1. Détermination du domaine du calcul

Le domaine d'étude est schématisé sur la figure 3.3. C'est une géométrie bidimensionnelle dont les paramètres géométriques adimensionnels sont identiques à celle trouvées dans la référence. [38]

Le domaine d'écoulement est limité par les surfaces suivantes:

- **Dans la direction axiale:** par une surface d'entrée et une surface de sortie.
- **Dans la direction verticale:** par les parois solides d'où les composants électroniques sont positionnés.

Les paramètres géométriques adimensionnels du canal sont prises comme suit :

$$\frac{H}{H} = 1; \frac{L_1}{H} = 2; \frac{w}{H} = 0,25; 0 \leq \frac{d}{H} \leq 3; \frac{\hat{H}}{H} = 0,25; \text{ et } L_2 = L - (L_1 + d + w)$$

La distance L_2 doit être suffisamment longue pour garantir le régime entièrement développé. Les détails de la configuration considérée de ce travail sont illustrés dans la Figure 3.3.

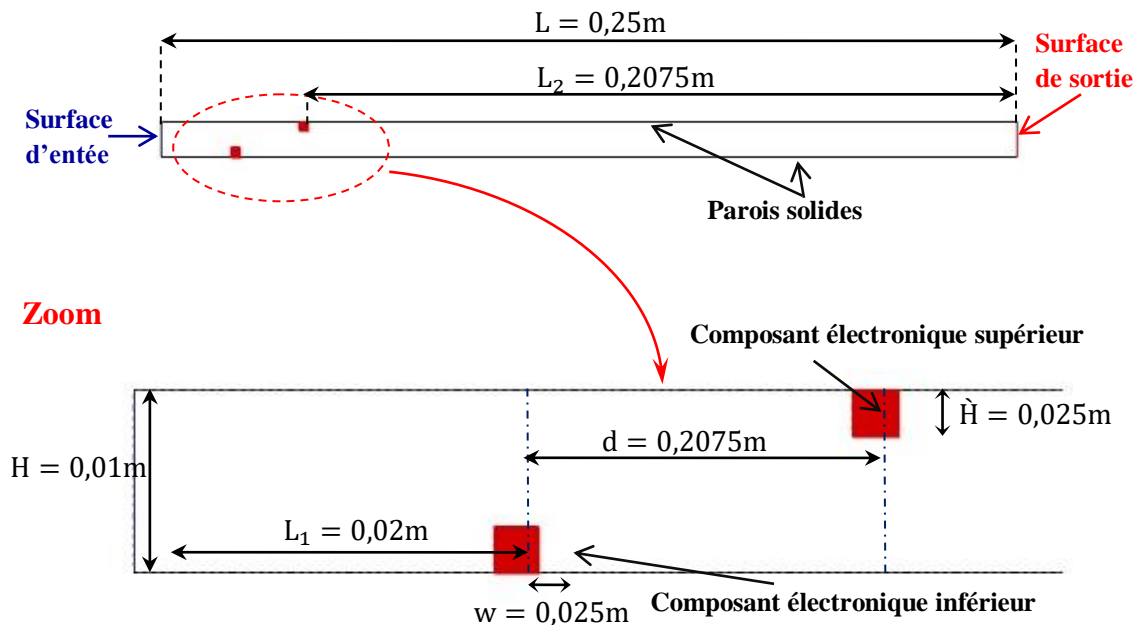


Figure 3.3- Géométrie du champ d'écoulement.

Les nanoparticules sont censées être en équilibre thermique avec le fluide de base. Les propriétés thermophysiques de l'eau pure et des nanoparticules à 25°C sont présentées

Méthodologies de simulation et modélisation numérique

dans le Tableau 3.1 Les propriétés thermophysiques du nanofluide sont supposées constantes, sauf pour la densité qui varie selon le modèle de Boussinesq. Les modèles de Brinkman et de Maxwell sont respectivement utilisés pour calculer la viscosité effective et la conductivité thermique effective. Le fluide étudié est un nanofluide contenant différents types de nanoparticules (TiO₂, Al₂O₃, Cu).

Tableau 3.1–Propriétés thermophysiques de fluide de base et des nanoparticules.[38]

Propriétés	Eau	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cu
C_p (J/kg.K)	4179	765	686.2	385
ρ (kg/m ³)	997.1	3970	4250	8933
k (W. m. K)	0.613	40	8.9538	400
$\beta \times 10^5$ (K ⁻¹)	21	0.85	0.9	1.67
$\mu \times 10^4$ (kg/ms)	8.55	–	–	–

3.6.2. Génération du maillage

La génération du maillage représente la discrétisation spatiale du problème en volumes de contrôle discrets. C'est une étape importante dans une analyse CFD, vu l'influence du type de maillage (structuré ou non structuré) et sa qualité, le nombre de cellules et aussi le raffinement du maillage dans la couche limite au niveau des parois solide sur la convergence de la solution lors du calcul numérique.

L'étude de l'indépendance maillage-solution sera présentée dans la section 3.7.2.

Le domaine de calcul représente un plan dans une configuration rectangulaire, donc un maillage structuré (régulier) est favorable.

Après avoir déterminé le domaine de calcul, cinq maillages structurés (quadrilatères) de différente densité ont été réalisés et évalués pour vérifier l'indépendance de la solution par rapport au maillage.

Le maillage structuré utilisé dans notre étude, permet de réduire le nombre de cellules, et donc réduire le temps de calcul qui présente un critère très important dans une analyse CFD.

Les différents maillages utilisés dans l'analyse de l'indépendance de solution-maillage sont résumés dans le tableau.

Tableau 3.2–Différentsmaillages utilisés dansl’analyse de l’indépendancede solution-maillage.

Maillage	Nombre de cellules	Nombre de noeuds
Grossier	10000	10549
Moyen	40000	41107
fin	90000	91649

Le maillage noté "moyen" qui contient 40000 cellules, est présentée sur la figure3.5.

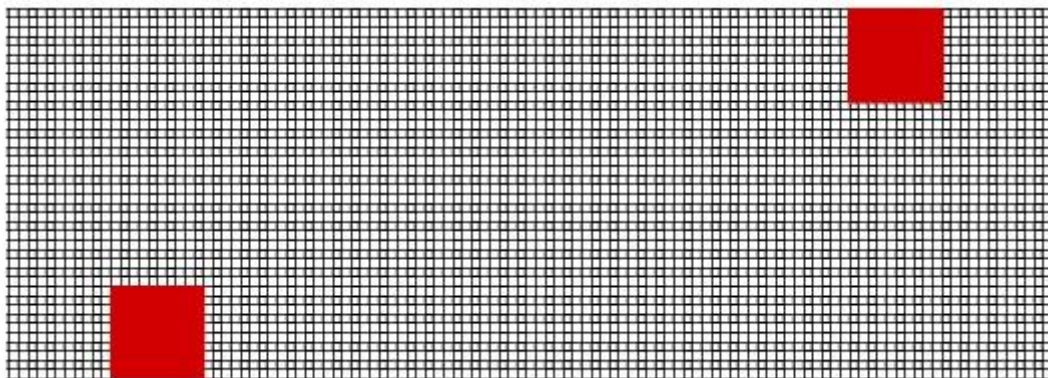


Figure 3.5– Maillagebidimensionnelmoyen ducanal.

3.7.Résolution numérique bidimensionnelle de l'écoulement

Les calculs de l'écoulement laminaire stationnaire ont été effectués en utilisant la méthode des volumes finis. Le schéma de puissance est utilisé pour le traitement des termes de convection et de diffusion. L'algorithme couplé est utilisé pour le couplage des champs de vitesse et de pression. Le système d'équations algébriques obtenu est résolu par l'algorithme matriciel tridiagonal ligne par ligne (TDMA).

Le critère de convergence des résidus retenu est de l'ordre de 10^{-12} .

3.7.1. Conditions aux limites

Les conditions appliquées aux limites pour les calculs CFD sont basées sur les données trouvées dans les travaux de [38].

Méthodologies de simulation et modélisation numérique

- Pour la modélisation des parois solides telles que la paroi solide supérieure, la paroi solide inférieure et les parois latérales des deux composants électroniques, des conditions d'adhérence et d'imperméabilité sont imposées. Et comme aucun échange thermique au niveau des parois du canal n'est disponible, la condition adiabatique peut être y utilisée.
- A l'entrée du domaine de calcul, une vitesse d'écoulement $U_{in} = 0.006431$ m/s est imposée avec une température constante $T_{in} = 298^{\circ}k$ (l'eau de refroidissement).
- A la section de sortie, la condition de type Pression à la sortie (Pressure Outlet) été imposé. Ce type de condition permet d'extrapoler la pression statique à partir des nœuds intérieurs voisins en choisissant l'option "from neighboring cell".
 - Les composants électroniques sont maintenus à une température uniforme $T_c = 301,5691^{\circ}k$ (température chaude).
 - Le nanofluide dans le canal est considéré comme newtonien, incompressible et laminaire.

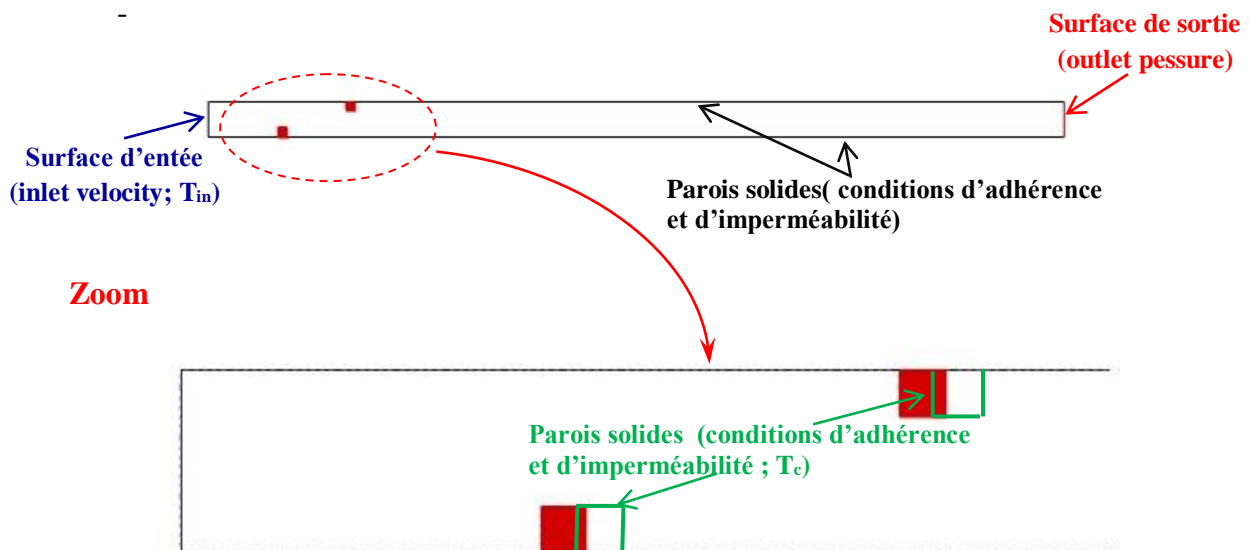


Figure 3.6–Géométrie du canal étudié avec les conditions aux limites.

3.7.2. Etude de l'indépendance du maillage

Dans une modélisation CFD, les paramètres de la solution que donne le solveur Ansys FLUENT après la convergence doivent être indépendants de la densité et la qualité du maillage.

Méthodologies de simulation et modélisation numérique

Dans ce but, trois maillages de différente densité qu'on notera "grossier", "moyen" et "fin" ont utilisé dans cette étude. Ils comportent respectivement 10000, 40000 et 90000 cellules.

On vérifie alors que Le nombre de Nusselt total Nu_t des deux composants chauffant est insensible aux nombres d'éléments du maillage, et on choisit par la suite le cas le plus réaliste de la solution.

Les résultats pour $Re = 75$, $\varphi = 0\%$, et $Gr = 10^4$ sont présentés dans le Tableau 3.4. Afin de vérifier la qualité du maillage, le facteur de la distorsion du maillage F_d (skewness) a été calculé par le mailleur Gambit pour les trois maillages. Une valeur faible du facteur de distorsion implique une bonne qualité du maillage. Pour un maillage structuré ; la valeur maximale tolérée du facteur de distorsion F_d doit être inférieure à 0,75.

Tableau 3.4–Le nombre du Nusselt total Nu_t et le facteur de la distorsion du maillage F_d pour les trois maillages.

Maillage	Nombre de cellules	$Nu_{t_{top}}$	$Nu_{t_{bot}}$	F_d
Grossier	10000	13.6830	14.0156	1.3082×10^{-10}
Moyen	40000	13.3263	13.6952	1.31212×10^{-10}
fin	90000	13.0916	13.1222	1.31428×10^{-10}

Il est évident que les valeurs du nombre du Nusselt Total totales restent stables dans les trois configurations. Ce qui signifie que la solution est indépendante du réseau de calcul.

Puisque le maillage fin donne les mêmes résultats que le maillage moyen et pour réduire les efforts de calcul, le maillage moyen est choisi pour tous les calculs de la présente étude.

3.8. Validation des résultats numériques

Dans cette section, on s'intéresse à la validation du modèle numérique adopté dans notre étude. La validation est basée sur la comparaison des résultats obtenus dans la simulation numérique du canal avec les résultats obtenus dans l'étude d'Ait Hssain et al.[38]. Les figures 3.7 et 3.8 montrent des comparaisons du Nusselt total entre les résultats

d'Ait Hssain et al.[38] et les résultats actuels pour les deux composants électroniques: supérieur et inférieur ; respectivement.

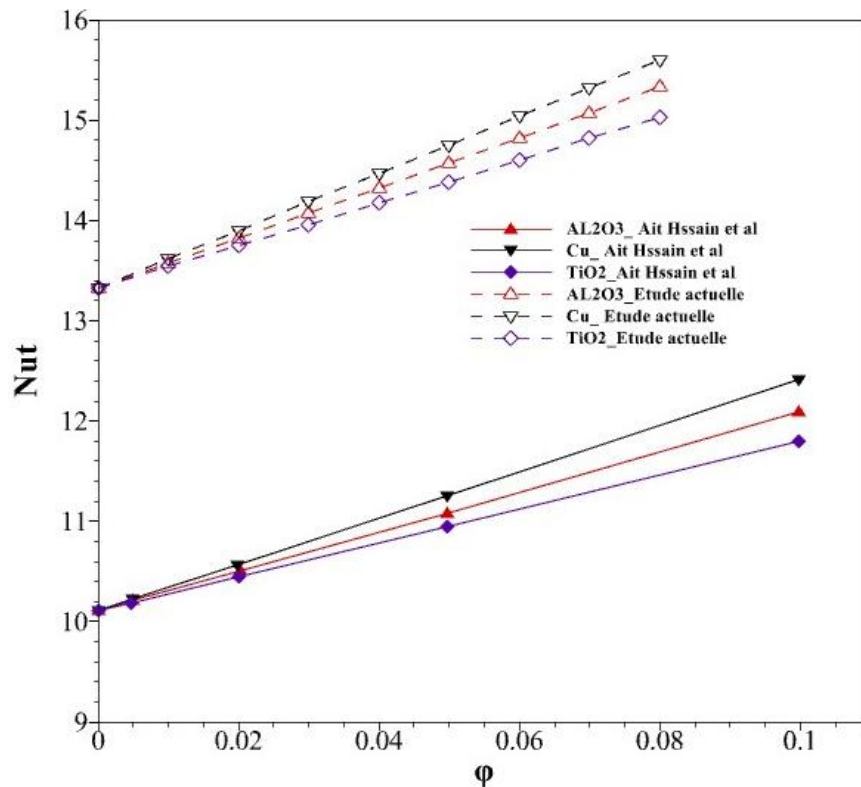


Figure 3.7–Comparaison de nombre de Nusselt total entre cette étude et les l'étuded'Ait Hssain et al.pour le composant supérieur[38].

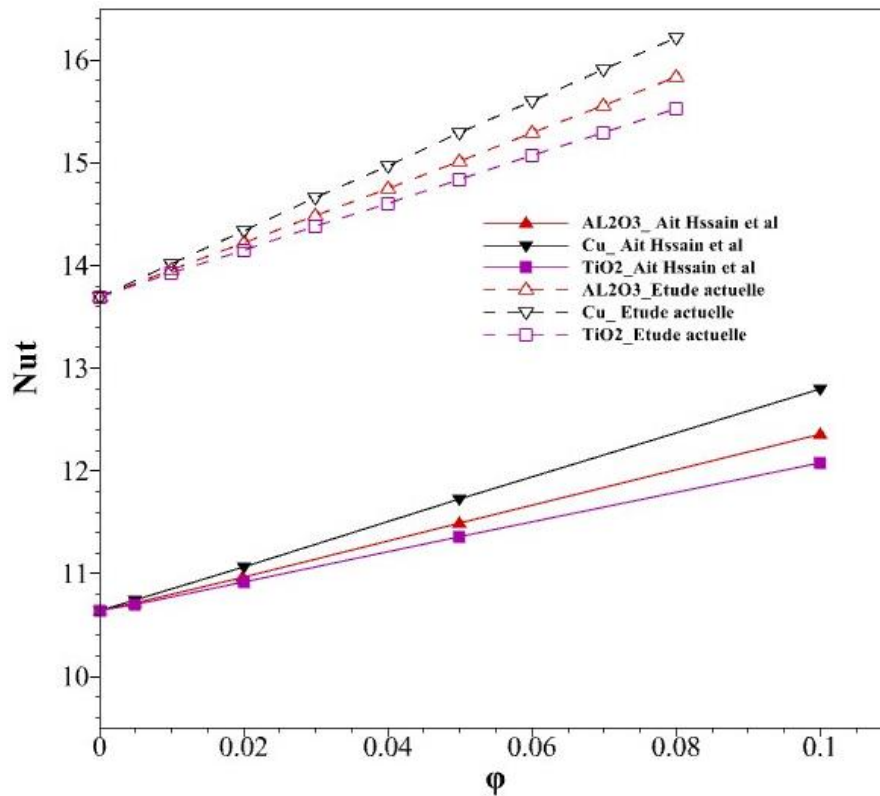


Figure 3.8–Comparaison de nombre de Nusselt total entre cette étude et les l'étude de Ait Hssain et al.pour le composant inférieur[38].

On peut noter sur les figures 3.7 et 3.8 que les courbes simulées suivent la même trajectoire que celles d'Ait Hssain et al.[38], indiquant une modélisation correcte du comportement global de l'écoulement et du transfert de chaleur. Les pentes similaires entre les courbes simulées et d'Ait Hssain et al.[38] suggèrent que les gradients de température et de vitesse sont bien reproduits.

Ainsi, la similitude des trajectoires et des pentes confirme la validité de notre modèle numérique. Ces observations montrent que notre simulation est fiable pour prédire les performances thermiques des nanofluides dans le refroidissement des composants électroniques.

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre une investigation numérique bidimensionnelle d'un canal horizontal menu par deux composants électroniques a été effectuée afin de comprendre les mécanismes thermophysiques qui s'y développent, et d'examiner l'impact de divers paramètres (tels que le type et la fraction volumique des nanoparticules, la distance de

séparation entre les composants et le nombre de Reynolds) sur les performances thermiques du système de refroidissement. La démarche de cette simulation numérique a été présentée en détail. Après avoir décrit la géométrie du canal, le maillage et les conditions aux limites, la résolution numérique de l'écoulement a été présentée. Les résultats de la simulation numérique ont été validés par comparaison aux résultats obtenus dans le travail de [38].

Chapitre 4

4. Résultats des simulations et discussion

Chapitre 4

4. Résultats des simulations et discussion

4.1.Introduction

Ce chapitre présente et analyse les résultats obtenus à partir des simulations numériques effectuées sur l'écoulement et le transfert de chaleur des nanofluides dans un canal rectangulaire, appliqués au refroidissement des composants électroniques. Les simulations ont été réalisées en tenant compte de divers paramètres, tels que le type et la fraction volumique des nanoparticules, la distance de séparation entre les composants et le nombre de Reynolds. L'objectif est d'examiner l'impact de ces paramètres sur les performances thermiques du système de refroidissement. Les résultats obtenus sont discutés en détail pour fournir une compréhension approfondie des mécanismes sous-jacents et proposer des recommandations pour l'optimisation des systèmes de refroidissement électronique utilisant des nanofluides.

4.2.Effet du Type de Nanoparticule et de la Fraction Volumique sur le Transfert de Chaleur par Convection Mixte

L'étude a examiné l'effet des différents types des nanoparticules sur le refroidissement des composants électroniques. Pour cette analyse, le nombre de Reynolds a été fixé à $Re = 75$ et le nombre de Grashof à $Gr = 10^4$. Diverses fractions volumiques de nanoparticules ont été testées : $\varphi = 0\%$, $\varphi = 1\%$, $\varphi = 3\%$, $\varphi = 2\%$, $\varphi = 4\%$, $\varphi = 5\%$, $\varphi = 6\%$, $\varphi = 7\%$, et $\varphi = 8\%$. La distance entre les composants a été maintenue constante à $d/H = 2$.

4.2.1. L'influence du type et de fraction volumique de nanoparticule sur le coefficient d'échange convectif

On peut noter sur la figure 4.1 et la figure 4.2 que l'accroissement de la fraction volumique des nanoparticules dans les nanofluides améliore le coefficient d'échange convectif moyen. Cette amélioration résulte de l'augmentation de la conductivité thermique du nanofluide proportionnelle à la fraction de nanoparticules.

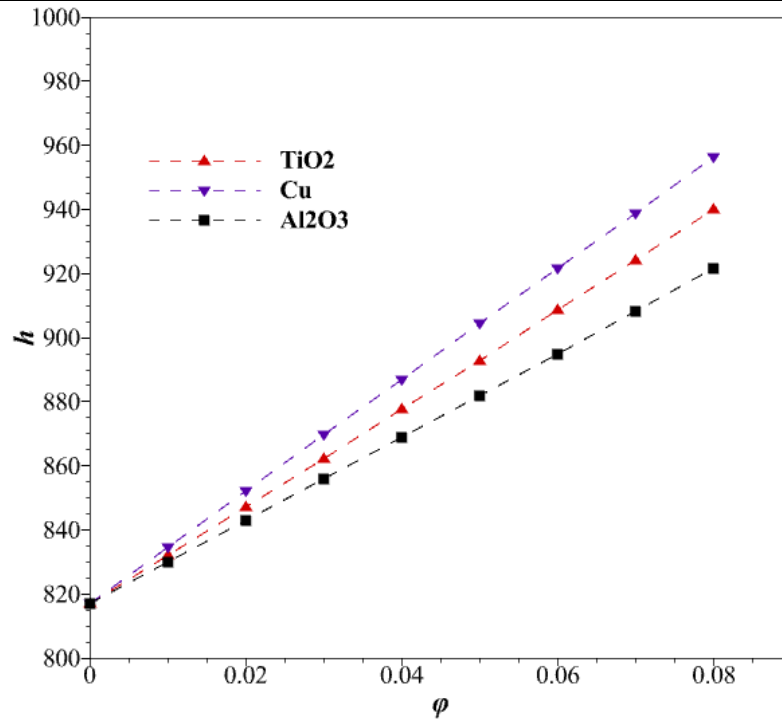


Figure 4.1–Effet de la fraction volumique de différentes nanoparticules sur le coefficient d'échange pour l'obstacle supérieur.

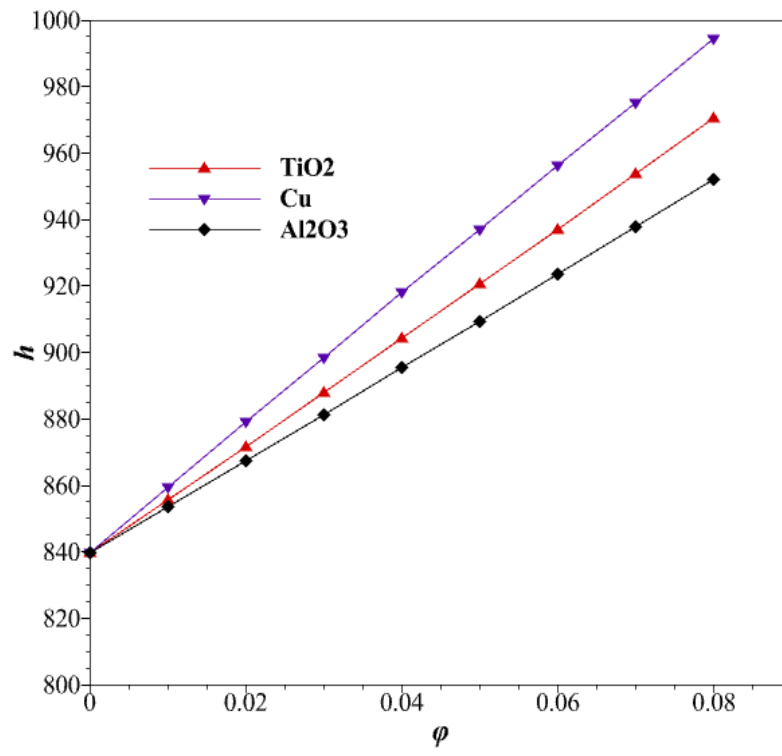


Figure 4.2– Effet de la fraction volumique de différentes nanoparticules sur le coefficient d'échange pour l'obstacle inférieur.

✓ Interprétation des résultats

- Le nanofluide cuivre-eau affiche le meilleur coefficient d'échange thermique par convection, attribué à sa conductivité thermique élevée.

- Les nanofluides alumine-eau et dioxyde de titane-eau montrent des performances comparables, bien que le TiO_2 -eau ait un taux de transfert de chaleur plus faible en raison de sa conductivité thermique inférieure.

- Les nanoparticules métalliques, notamment le cuivre, facilitent une meilleure propagation de la chaleur grâce à leurs excellentes propriétés thermiques.

✓ En résumé, l'optimisation de la fraction volumique et le choix judicieux des nanoparticules sont essentiels pour maximiser le transfert de chaleur par convection mixte dans les nanofluides.

4.2.2. L'influence du type et de fraction volumique de nanoparticule sur le nombre de Nusselt

Les figures 4.3 et 4.4 représente l'effet de la fraction volumique ϕ sur le nombre de Nusselt total pour des différents nanoparticules (Cu , Al_2O_3 et TiO_2).

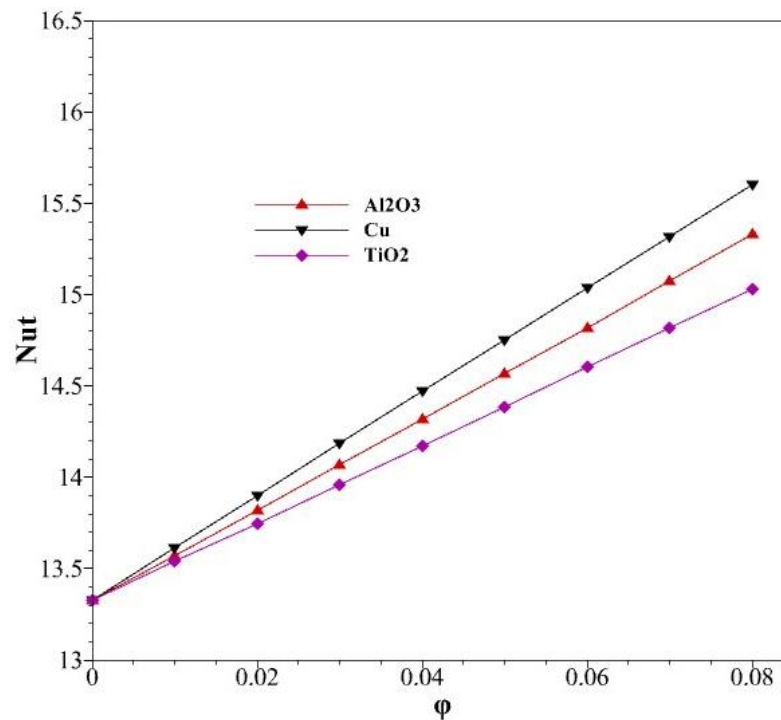


Figure 4.3- Effets de la fraction volumique de différentes nanoparticules sur le nombre de Nusselt total pour l'obstacle supérieur.

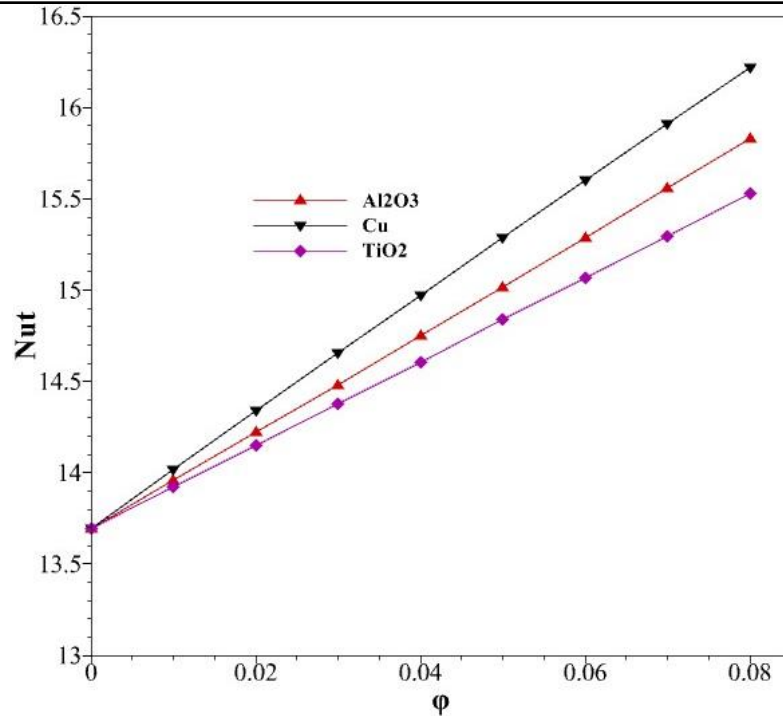


Figure 4.4– Effets de la fraction volumique de différentes nanoparticules sur le nombre de Nusselt total pour l'obstacle inférieur.

✓ Effet du type de nanofluide

- Les résultats montrent que le type de nanoparticule utilisé a un impact significatif sur le transfert de chaleur. En général, les nanoparticules de cuivre ont montré les meilleurs résultats en termes d'amélioration du transfert de chaleur. Cela peut être dû à leur conductivité thermique élevée par rapport aux autres nanoparticules testées.

- Les nanoparticules de cuivre ont probablement favorisé une meilleure conduction de la chaleur à travers le nanofluide, ce qui a entraîné une augmentation du nombre de Nusselt par rapport aux autres types de nanoparticules.

✓ Effet de la fraction volumique

- L'étude a révélé que la fraction volumique des nanoparticules a également un impact significatif sur le transfert de chaleur. En augmentant la fraction volumique des nanoparticules, le nombre de Nusselt augmente de manière linéaire.

- L'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules entraîne une augmentation de la conductivité thermique du nanofluide, ce qui améliore la conduction de la chaleur à travers le fluide. Cela compense généralement l'effet de l'augmentation de la viscosité du nanofluide due à la présence des nanoparticules.

✓ **Interprétation des Résultats**

- Globalement, l'effet combiné du type de nanoparticule et de la fraction volumique montre que les nanoparticules de cuivre et d'argent à des fractions volumiques plus élevées ont le plus grand impact sur l'amélioration du transfert de chaleur, augmentant le nombre de Nusselt de manière significative.

- Ces résultats mettent en évidence l'importance de choisir le bon type de nanoparticule et d'optimiser la fraction volumique pour améliorer l'efficacité du refroidissement des composants électroniques par convection mixte de nanofluides.

✓ En conclusion, l'étude démontre que le choix du type de nanoparticule et de la fraction volumique est crucial pour optimiser le transfert de chaleur dans le système étudié, avec des nanoparticules de cuivre et d'argent à des fractions volumiques plus élevées offrant les meilleures performances en termes d'amélioration du nombre de Nusselt.

➤ **Remarque :** Pour les études suivantes, je choisis de me concentrer sur un seul type de nanoparticule : l' Al_2O_3 .

4.2.3. Effet du nombre de Reynolds sur le Transfert de Chaleur

Le nombre de Reynolds est un paramètre important qui caractérise le régime d'écoulement du fluide. Dans cette étude, le nombre de Reynolds a été varié de 25 à 100, avec différentes valeurs de la fraction volumique de la nanoparticule Al_2O_3 ($\varphi = 0\%; 2\%; 5\%; 10\%$) pour évaluer leur impact sur le transfert de chaleur.

Les figures 4.5 et 4.6 représentent l'effet de nombre de Reynolds sur le transfert de chaleur pour les deux composants.

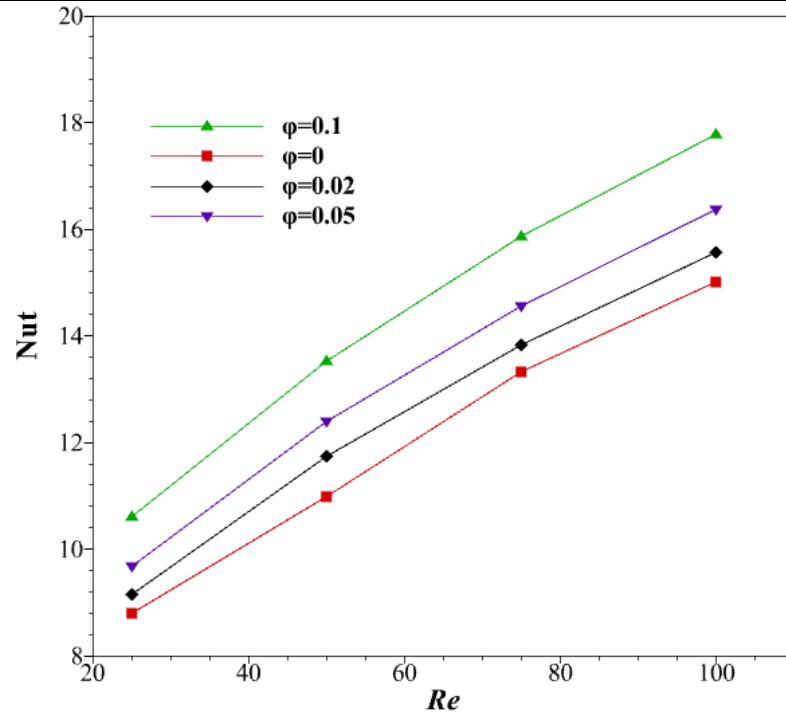


Figure 4.5- Effet du nombre de Reynolds sur le nombre de Nusselt total de l'obstacle supérieur pour différentes fractions volumiques.

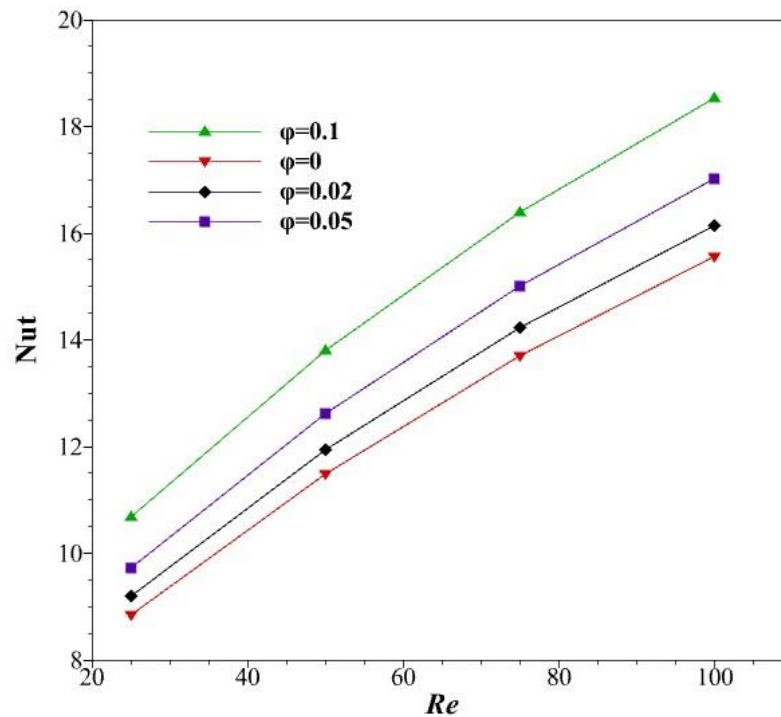


Figure 4.6- Effet du nombre de Reynolds sur le nombre de Nusselt total de l'obstacle inférieur pour différentes fractions volumiques.

Résultats des simulations et discussion

- Lorsque le nombre de Reynolds augmente, cela indique une augmentation de la vitesse d'écoulement du fluide dans le canal horizontal. Cette augmentation de la vitesse peut influencer la dynamique de l'écoulement et donc le transfert de chaleur.

- Les résultats de l'étude montrent que l'augmentation du nombre de Reynolds a un effet significatif sur le transfert de chaleur. En général, une augmentation du nombre de Reynolds conduit à une amélioration du transfert de chaleur.

- À des nombres de Reynolds plus élevés, l'écoulement du nanofluide devient plus turbulent, ce qui peut favoriser une meilleure agitation et une meilleure dispersion des nanoparticules dans le fluide. Cela peut entraîner une augmentation de la convection et donc du transfert de chaleur.

✓ **Interprétation des Résultats**

- En augmentant le nombre de Reynolds, la convection dans le canal horizontal est renforcée, ce qui favorise un meilleur échange de chaleur entre les composants électroniques chauffés et le nanofluide.

- Les résultats suggèrent que des nombres de Reynolds plus élevés peuvent améliorer l'efficacité du refroidissement des composants électroniques.

- De plus, avec l'augmentation du nombre de Reynolds, le nombre de Nusselt augmente également, ce qui indique une amélioration du transfert de chaleur convectif.

- En résumé, l'augmentation du nombre de Reynolds dans le système étudié a un impact positif sur le transfert de chaleur, en favorisant une meilleure convection et une dispersion plus efficace des nanoparticules dans le nanofluide.

- Il est important de prendre en compte l'effet du nombre de Reynolds lors de la conception et de l'optimisation des systèmes de refroidissement utilisant des nanofluides, car cela peut influencer de manière significative les performances de refroidissement des composants électroniques.

✓ En conclusion, l'effet du nombre de Reynolds sur le transfert de chaleur dans le système étudié met en évidence l'importance de la dynamique de l'écoulement dans l'amélioration de l'efficacité du refroidissement par convection mixte de nanofluides.

4.2.4. Effet de la distance de séparation entre les deux composants électroniques sur le transfert de chaleur

Les Figure 4.7 et 4.8 présentent respectivement les isothermes et les lignes de courant pour différentes distances de séparation entre deux sources de chaleur, avec des conditions fixes de $Re = 75$ et $Gr = 10^4$ pour le nanofluide "eau- Al_2O_3 " avec une fraction

Résultats des simulations et discussion

volumique de $\phi = 5\%$, En variant la distance de séparation entre les composants ($d=0$, $d=H$, $d=2H$ et $d=3H$), nous pouvons évaluer comment la chaleur circule entre le flux froid et les composants chauds, cherchant ainsi la meilleure position pour le composant supérieur par rapport au composant inférieur.

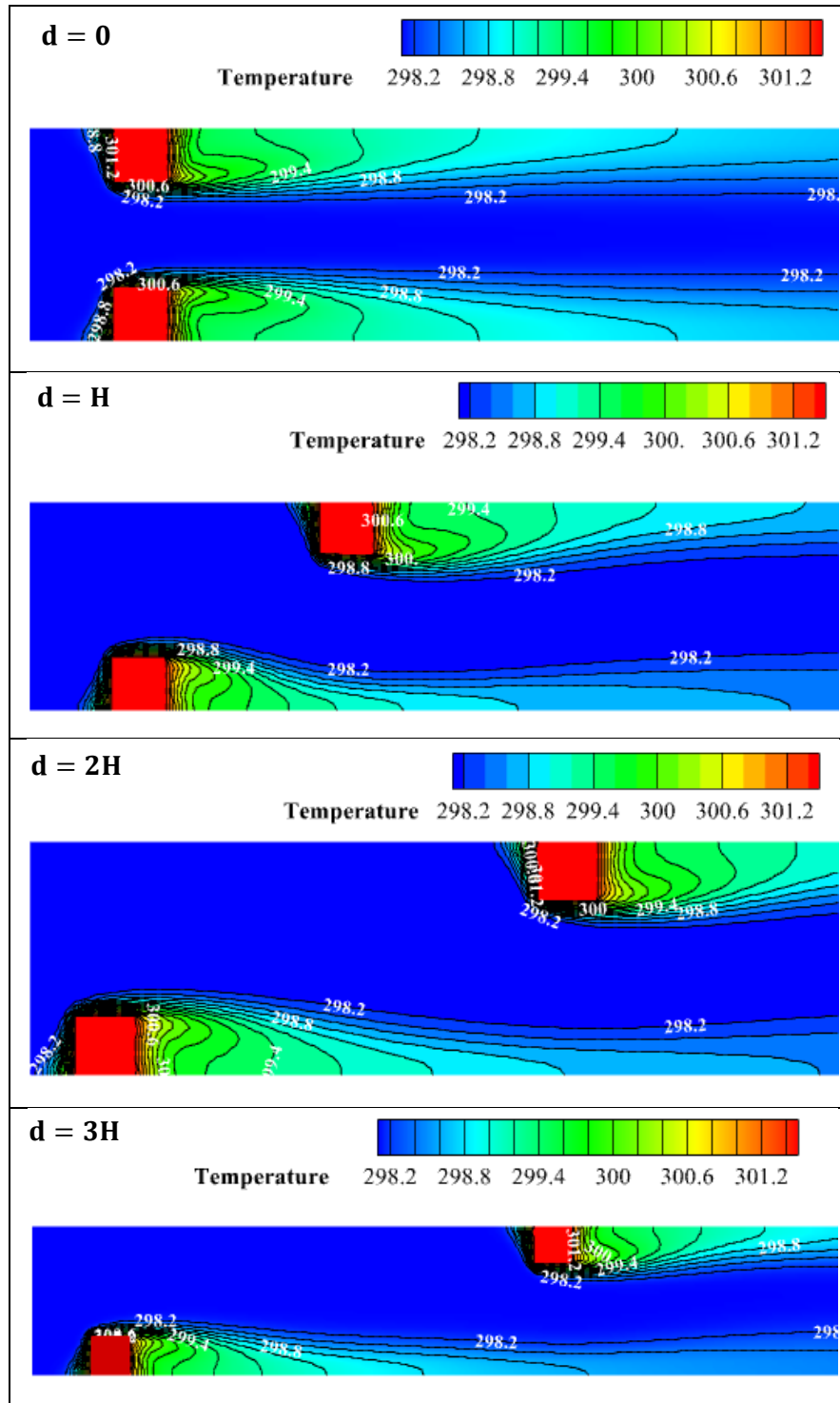


Figure 4.7-Variations des contours de température en fonction des différentes distances de séparation entre les deux composants électroniques pour le nanofluide "eau- Al_2O_3 ".

Résultats des simulations et discussion

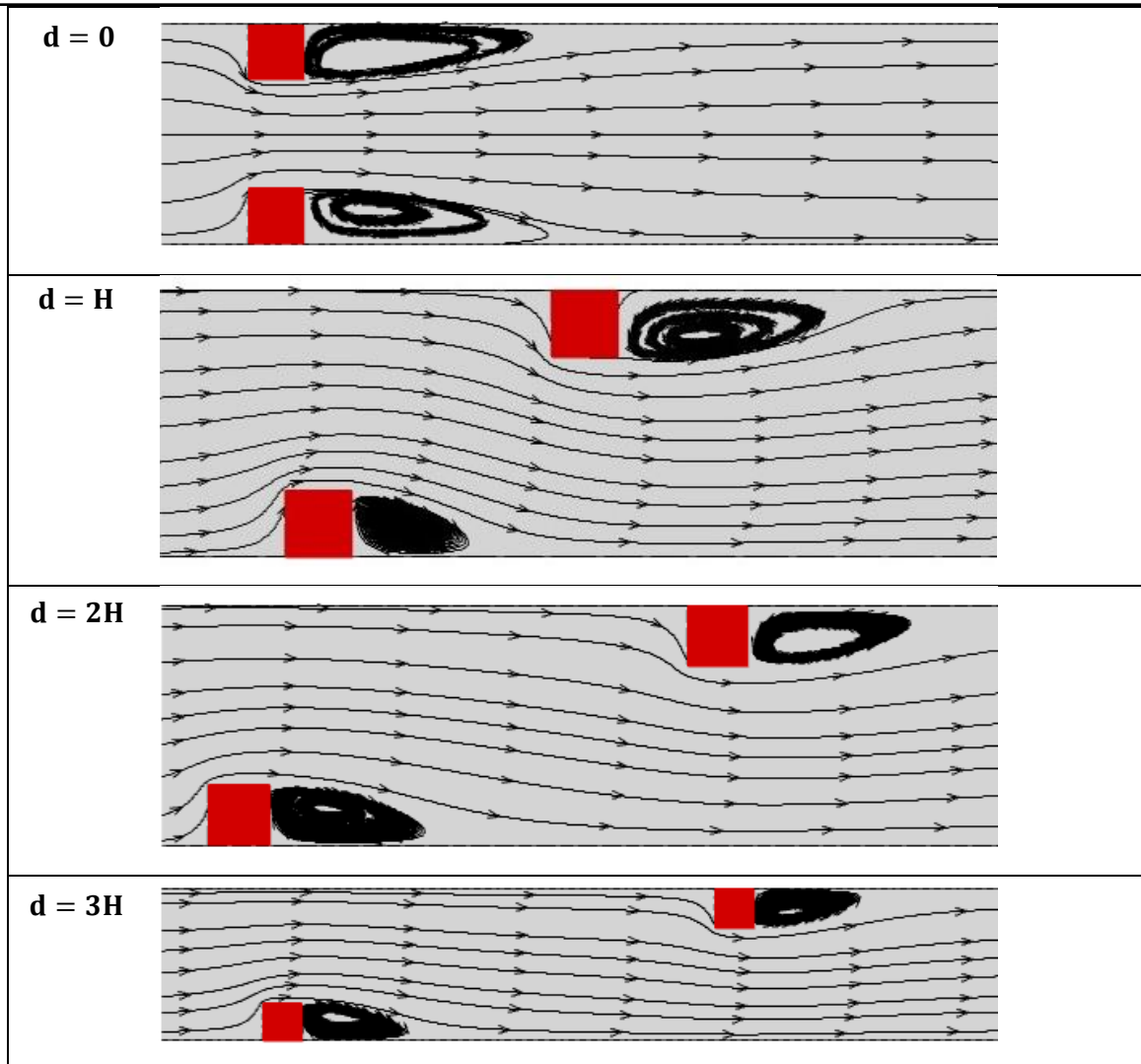


Figure 4.8–Variations des lignes de courant en fonction des différentes distances de séparation entre les deux composants électroniques pour le nanofluide "eau- Al_2O_3 ".

- Les lignes de courant tracées dans les Figures 4.8; montrent clairement des zones de recirculation derrière les blocs dans tous les cas étudiés, avec un flux aligné dans le reste du canal. Ces zones de recirculation affectent le taux d'évacuation de chaleur des sources de chaleur. On remarque que la couche limite thermique, responsable du transfert de chaleur depuis la source de chaleur, diminue lorsque l'espace entre les deux composants augmente. La meilleure efficacité de transfert est observée lorsque les composants sont placés de manière symétrique sur les parois du canal $d=0$ Cette disposition réduit la section transversale du canal entre les composants, augmentant ainsi la vitesse du flux. Cela renforce la convection forcée, facilitant une libération de chaleur plus efficace et, par conséquent, éloignant davantage la couche limite thermique des composants.

Résultats des simulations et discussion

- À mesure que la distance de séparation augmente, l'efficacité de l'évacuation de chaleur diminue pour le composant supérieur. Cela est dû au fait que le flux arrive déjà avec une quantité de chaleur extraite du premier composant, réduisant ainsi l'échange thermique au niveau du composant supérieur.

✓ Effet sur le nombre du Nusselt

La recherche, réalisée sous des conditions spécifiques comprenant $Re = 75$, $Gr = 10^4$ et différentes fractions volumiques d' Al_2O_3 (0%, 2%, 5%, 8%), met en évidence l'importance capitale de la distance de séparation entre les composants électroniques dans un canal horizontal et son influence sur le transfert.

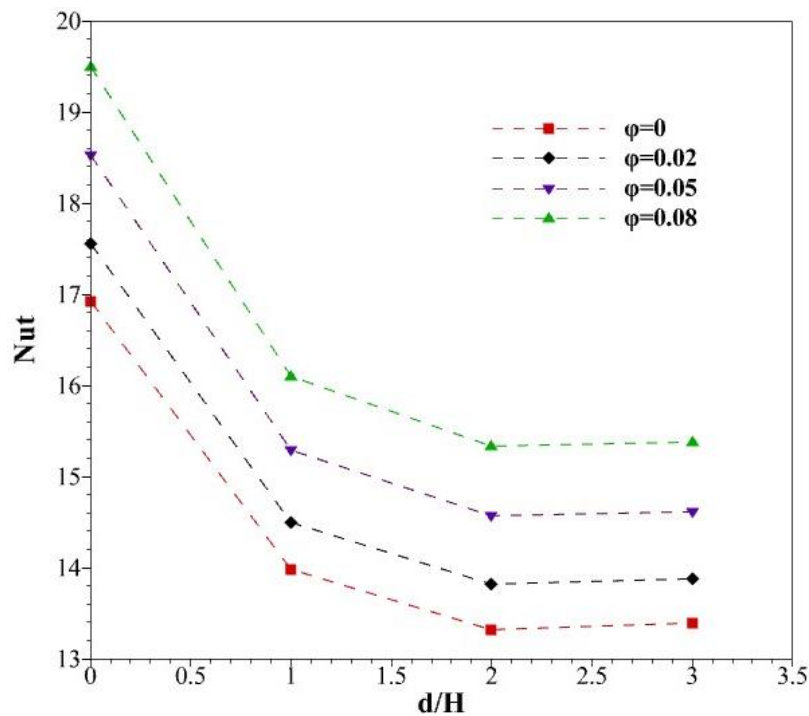


Figure 4.9- Effet de la distance de séparation entre les composants électroniques sur le nombre de Nusselt total de l'obstacle supérieur pour différentes fractions volumiques.

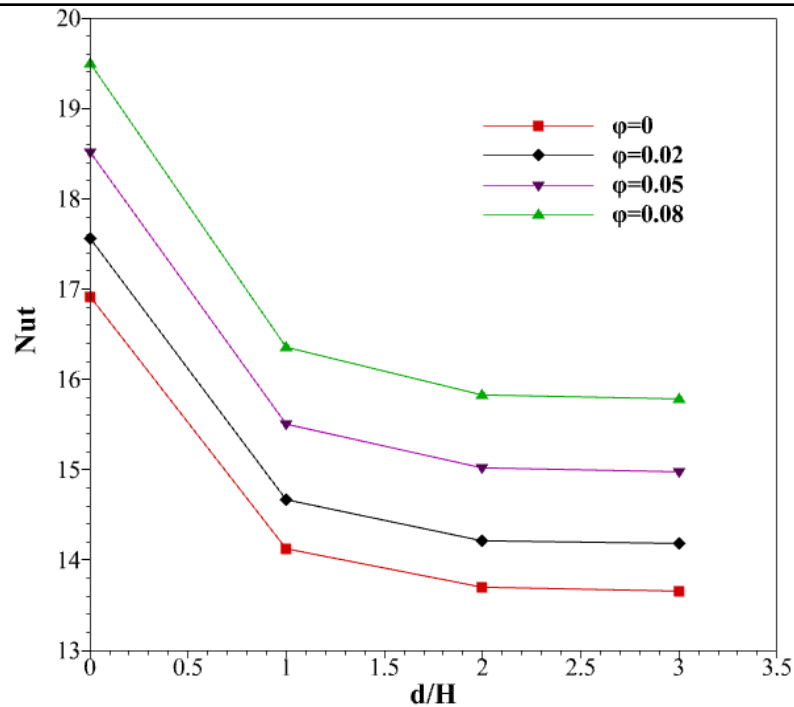


Figure 4.10– Effet de la distance de séparation entre les composants électroniques sur le nombre de Nusselt total de l'obstacle inférieur pour différentes fractions volumiques.

Les figures 4.9 et 4.10 montrent que dès que la distance entre les deux composants dépasse $2H$ l'augmentation supplémentaire de cette distance n'a pas vraiment d'impact sur le transfert de chaleur, et le nombre de Nusselt reste à peu près le même. Cela signifie que l'éloignement excessif des composants n'est pas bénéfique pour leur capacité à évacuer la chaleur. En augmentant la distance entre les composants de 0 à $3H$, l'amélioration du transfert de chaleur diminue d'environ 19 % pour le composant inférieur et 21 % pour le composant supérieur, pour toutes les fractions de nanoparticules testées. L'ajout de plus de nanoparticules, environ 8% de plus, entraîne une amélioration notable du transfert de chaleur. À $d=H$, cette amélioration est d'environ 15.2 % et à $d=3H$ elle est d'environ 14.87 % pour les deux composants.

En conclusion, l'analyse de l'effet de la distance de séparation entre les composants électroniques dans un canal horizontal souligne l'importance de trouver un équilibre optimal pour maximiser le transfert de chaleur par convection forcée. Cette étude fournit des informations précieuses pour la conception de systèmes de refroidissement efficaces pour les composants électroniques, en mettant en évidence l'impact significatif de la distance de séparation sur le processus de transfert de chaleur.

4.2.5. Analyse des Champs de Vitesse et de Température

Pour cette étude, nous avons examiné les champs de vitesse et de température des nanoparticules d' Al_2O_3 dans un canal, avec une fraction volumique de 10% à différentes positions, en tenant compte d'un nombre de Reynolds de 75 et d'un nombre de Grashof de 10^4 .

4.2.5.1. Le champ de vitesse

La figure 4.11 illustre à titre d'exemple, le champ de vitesse dans le canal pour le cas du nanofluid Al_2O_3 avec une fraction volumique de 10%. Le fluide entre avec une vitesse uniforme de 0.0064 m/s puis s'accélère en raison du rétrécissement de la section transversale du canal. Des vitesses maximales sont enregistrées dans la zone située entre les deux obstacles au milieu du canal et des vitesses minimales à proximité des obstacles ou, comme le montre la figure 4.12, formant une zone de recirculation. Après que l'écoulement ait parcouru une certaine distance, il prend une forme régulière, à mesure que la vitesse augmente depuis les parois jusqu'au centre du canal. Ainsi l'écoulement est établi et le profil de vitesse devient parabolique.

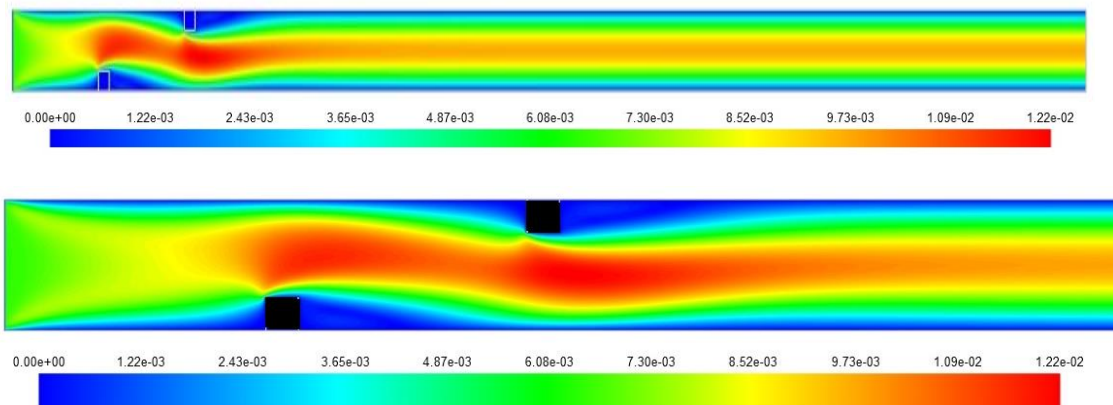


Figure 4.11 Champ de vitesse

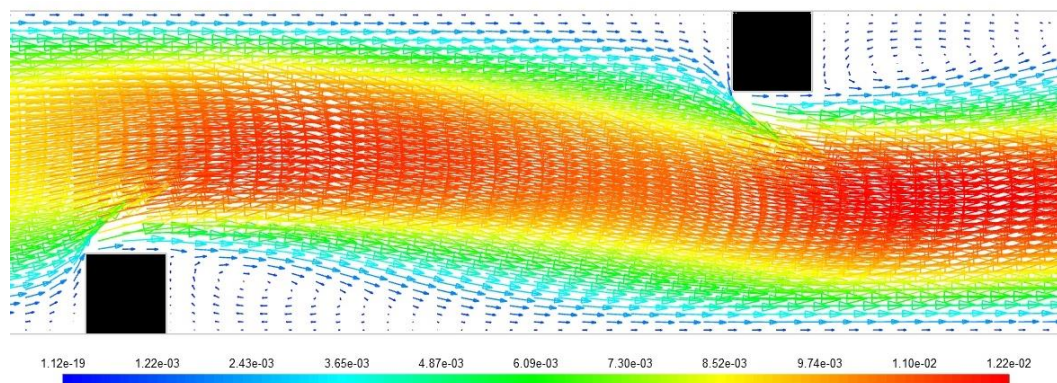


Figure 4.12 Vecteurs de vitesse à proximité des obstacles

4.2.5.2. Profil de vitesse

Pour obtenir plus de détails sur le profil de vitesse et de température, on utilise des lignes à des différentes positions le long du canal comme le montre la figure 4.13.

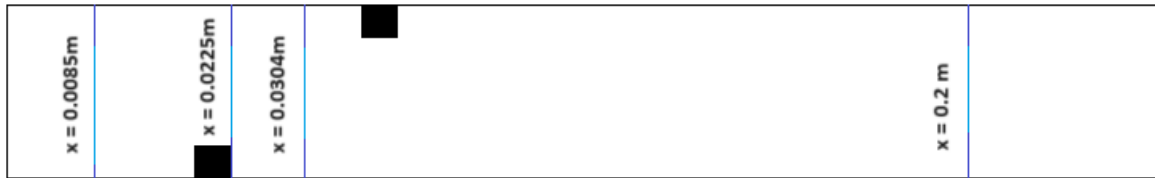


Figure 4.13- Les différents positions pour la projection de profils de vitesse et de température

La figure 4.14 présente le profil de la vitesse axiale dans le canal étudié dans ce travail pour des stations localisées à : $x = 0.0085\text{ m}$, $x = 0.0304\text{ m}$, $x = 0.0225\text{ m}$ et à $x = 0.2\text{ m}$.

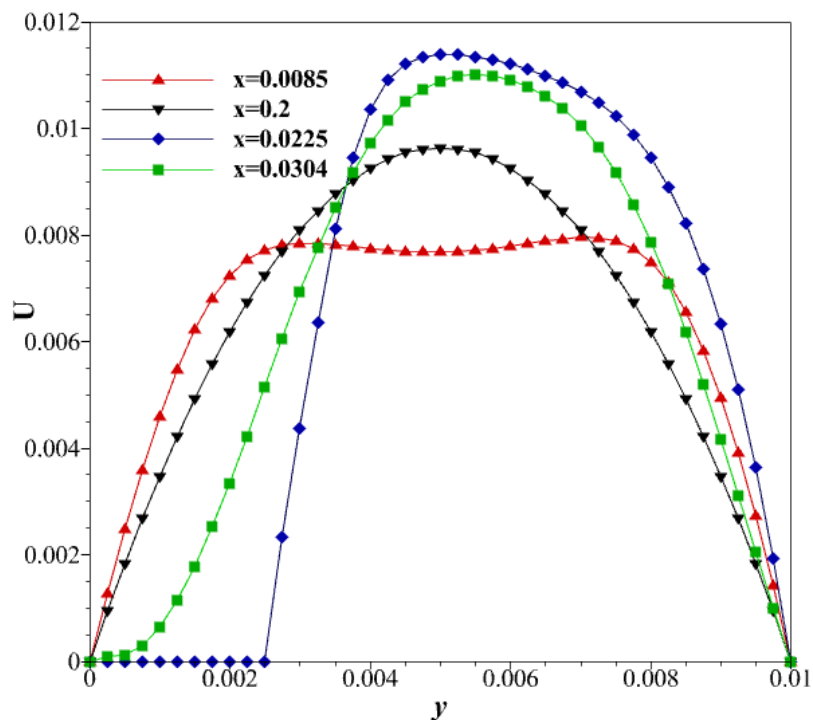


Figure 4.14- Profil de vitesse axiale pour différentes stations.

- À $x = 0.0085\text{ m}$ (proche de l'entrée)

À l'entrée du canal, le profil de vitesse est relativement uniforme, indiquant un écoulement laminaire initial. La vitesse du fluide est maximale au centre du canal et diminue vers les parois en raison de la friction.

Résultats des simulations et discussion

- À $x = 0.0304$ m (entre les deux composants électroniques)

Entre les deux composants, le profil de vitesse montre une légère perturbation due à l'obstacle des composants électroniques. Il y a une augmentation de la vitesse dans les régions proches des composants en raison de la réduction de la section effective du canal.

- À $x = 0.0225$ m (sur un composant électronique)

La vitesse atteint son maximum car la section de passage diminue en raison de la présence du composant électronique, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse du fluide pour maintenir le débit constant.

Cette augmentation de vitesse favorise la convection forcée et améliore significativement le transfert de chaleur localisé.

- À $x = 0.2$ m (devant la sortie)

À proximité de la sortie, la vitesse du fluide est presque entièrement développée et uniforme, sauf près des parois où la vitesse est réduite.

4.2.5.3. Le champ de température

La figure 4.15 illustre le champ de la température dans le canal pour le nanofluid Al_2O_3 avec une fraction de 10%. Le fluide pénètre dans le canal avec la température $T_i = 298$ K et interagit au niveau des composants chauds avec la température des surfaces ce qui provoque une augmentation de la température du fluide et le transfert de chaleur entre le liquide et la région de surface des deux composants. Le profil de température augmente dans la direction d'écoulement.

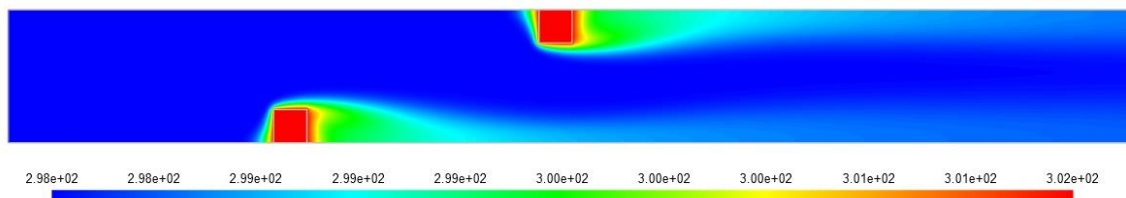


Figure 4.15–Distribution de la température dans le canal

On utilise les lignes de la figure 4.13 pour avoir plus de détails sur le profil de température.

Résultats des simulations et discussion

Sur la figure 4.16 le profil de la température dans le canaest présenté ;pour des stations localisées à: $x = 0.0085 m$, $x = 0.0304m$, $x = 0.0225m$ et à $x = 0.0225m$.

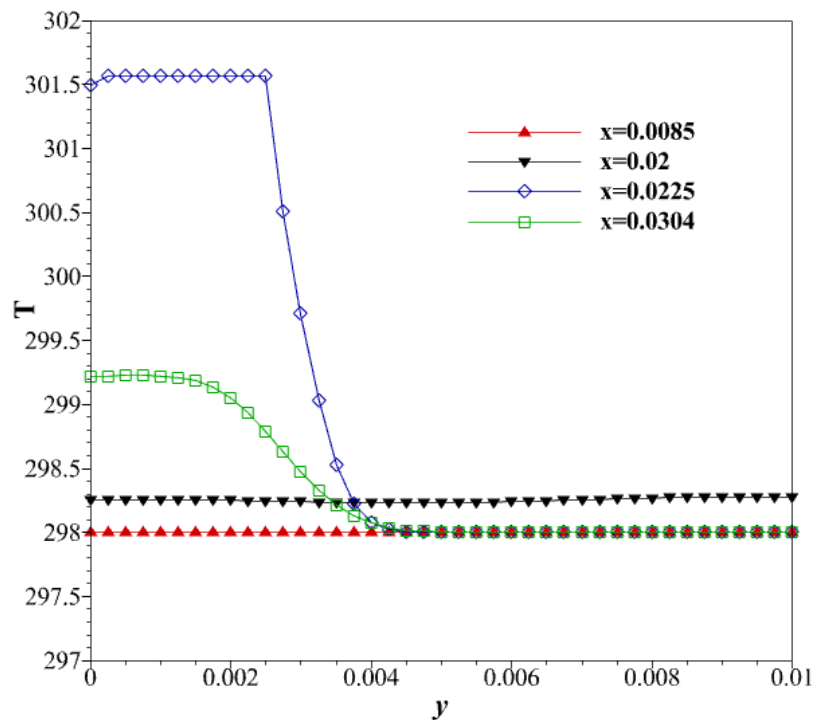


Figure 4.16–Profil de température pour différentes stations

- À $x = 0.0085 m$ (proche de l'entrée)

La température est relativement homogène à l'entrée, car le fluide n'a pas encore commencé à absorber de chaleur des composants électroniques.

- À $x = 0.0304 m$ (entre les deux composants électroniques)

La température commence à augmenter entre les composants électroniques à mesure que le fluide absorbe de la chaleur. Un gradient de température se développe, avec des températures plus élevées près des composants et plus basses au centre du canal.

- À $x = 0.0225 m$ (sur un composant électronique)

La température est maximale sur la surface du composant électronique, car c'est la principale source de chaleur. La dissipation thermique est influencée par la conductivité thermique et la fraction volumique.

- À $x = 0.2$ m (devant la sortie)

La température est plus uniforme comparée aux autres positions, car le fluide a déjà absorbé la chaleur des composants électroniques et atteint un équilibre thermique

- En conclusion ; La présence des composants électroniques perturbe les profils de vitesse et de température, créant des gradients thermiques et des variations de vitesse.

Les profils de vitesse et de température à différentes positions dans le canal montrent que l'interaction entre la dynamique d'écoulement et le transfert de chaleur est cruciale.

4.2.6. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a révélé que les performances thermiques des nanofluides sont fortement influencées par le type de nanoparticule, la fraction volumique, le nombre de Reynolds et la distance de séparation entre les composants. Les nanofluides à base de cuivre se sont distingués par leur efficacité supérieure. L'augmentation du nombre de Reynolds a amélioré le transfert de chaleur en intensifiant la convection, tandis qu'une distance de séparation optimale entre les composants a maximisé l'efficacité de refroidissement. Ces découvertes fournissent des directives cruciales pour la conception de systèmes de refroidissement avancés pour les composants électroniques.

Conclusion générale et perspectives

Dans un monde où la technologie électronique joue un rôle central, la gestion efficace de la chaleur est essentielle pour assurer la performance et la durabilité des dispositifs électroniques modernes. Cette étude a exploré le potentiel des nanofluides comme solution de refroidissement innovante, en se concentrant sur leur application dans le contexte spécifique du refroidissement des composants électroniques.

À travers une analyse approfondie, nous avons examiné les performances thermiques des nanofluides en tenant compte de divers paramètres, tels que le volume fraction, le nombre de Reynolds et la distance de séparation entre les composants, ainsi que le type de nanoparticules. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Une amélioration du transfert de chaleur est observée dans toutes les variétés de nanofluides.
- L'augmentation de la concentration des nanoparticules entraîne une amélioration du coefficient de convection moyen pour tous les types de nanofluides, attribuable à l'accroissement de leur conductivité thermique.
- L'augmentation de la fraction volumique du nanofluide améliore le refroidissement de chaque composant.
- L'augmentation de la distance de séparation entre les composants diminue le nombre de Nusselt total des composants électroniques, et la meilleure configuration pour améliorer le refroidissement des composants est celle de $d/H = 0$.
- Il a été constaté que l'amélioration du système de refroidissement est obtenue en utilisant des nanoparticules de cuivre. De plus, comme le nombre de Reynolds augmente, le nombre de Nusselt total des deux composants augmente, ce qui indique que les échanges de chaleur deviennent plus importants.

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte différents paramètres lors de la conception et de l'optimisation des systèmes de refroidissement électronique utilisant des nanofluides. Ils fournissent des indications précieuses pour développer des approches plus efficaces et durables pour répondre aux défis croissants de dissipation thermique dans les

dispositifs électroniques miniaturisés. Ainsi, cette étude ouvre la voie à une nouvelle ère d'innovation dans le domaine de l'ingénierie thermique, avec des implications significatives pour l'avenir de la technologie électronique.

Concernant les travaux futurs possibles, plusieurs pistes peuvent être envisagées. L'étude des effets de différentes géométries de canaux et de l'optimisation multi-paramètres peut déterminer les configurations idéales pour les nanofluides. L'examen des nanofluides bi- ou tri-composants, ainsi que des effets de la turbulence et l'instationnarité, offre des possibilités pour améliorer les performances thermiques. Des essais expérimentaux sont nécessaires pour valider les modèles théoriques, et l'exploration de nanoparticules fonctionnalisées pourrait améliorer leur stabilité et leur efficacité. Enfin, l'intégration de systèmes de refroidissement hybrides, combinant nanofluides et technologies avancées, représente une voie prometteuse pour développer des solutions de refroidissement ultra-performantes pour les dispositifs électroniques.

Références

- [1] Choi, S. U., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles (No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
- [2] Noukas, S. S. A., & Rebia, D. (2020). Effet de la dimension d'un coude arrondi sur l'amélioration du transfert thermique : application pour les nanofluides (Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret).
- [3] Grine, W. (2021). Modèles prédictifs de la conductivité thermique des nanoparticules pour simulation des nanofluides (Doctoral dissertation).
- [4] Okba, B. O. U. A. F. I. A. Développement thermique de l'écoulement d'un nanofluide entre deux plaques parallèles.
- [5] LABIED, A. (2021). Nano-Fluides et distillation solaire des eaux saumâtres, Perspectives Et Défis (Doctoral dissertation).
- [6] Wang, X. Q., & Mujumdar, A. S. (2007). Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International journal of thermal sciences*, 46(1), 1-19.
- [7] S.S. Briki, & A. Mekefes. (2020). Étude numérique de l'effet des nanoparticules sur le transfert de chaleur dans une cavité remplie de nanofluide (Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila).
- [8] Rachid, B. (2022). Analyse thermo énergétique de la convection thermique d'un écoulement des nanofluides dans des microcanaux (Doctoral dissertation, university center of abdalhafid boussouf-MILA).
- [9] Pak, B. C., & Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11(2), 151-170.
- [10] Xuan, Y., & Roetzel, W. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of heat and Mass transfer*, 43(19), 3701-3707
- [11] BENABDERRAHMANE, A. (2017). Etude Numérique de l'application des Nanofluides dans l'amélioration du Transfert Thermique dans les Capteurs Solaires (Doctoral dissertation).
- [12] Einstein, A. (1956). *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. Courier Corporation.
- [13] Brinkman, H. C. (1952). The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of chemical physics*, 20(4), 571-571.

Références

- [14] Batchelor, G. (1976). Brownian diffusion of particles with hydrodynamic interaction. *Journal of Fluid Mechanics*, 74(1), 1-29.
- [15] Wang, X., Xu, X., & Choi, S. U. (1999). Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 13(4), 474-480.
- [16] Maxwell, J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism* (Vol. 1). Oxford: Clarendon Press.
- [17] Hamilton, R. L., & Crosser, O. K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, 1(3), 187-191.
- [18] Islam, Z. I. D. "L'intensification des échanges thermiques dans les échangeurs de chaleur par nano fluides" Application à un échangeur double enveloppes".
- [19] (Slama, S. (2020). *Ecoulement et transfert de chaleur dans un canal rempli d'un milieu poreux anisotrope saturé d'un nanofluide et soumis à un chauffage oscillatoire* (Doctoral dissertation).
- [20] Chaib, L., & Chekini, K. (2015). *Modélisation et simulation du transport de nanoparticules dans un écoulement de fluide dans une conduite* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou).
- [21] Darzi, A. R., Farhadi, M., & Sedighi, K. (2013). Heat transfer and flow characteristics of Al₂O₃-water nanofluid in a double tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 47, 105-112.
- [22] Ruvo, T. H., Shuvo, M. S., & Saha, S. (2024). Revisiting thermo-physical property models of Al₂O₃-Water nanofluid for natural convective flow. *Heliyon*.
- [23] Ruvo, T. H., Saha, S., Mojumder, S., & Saha, S. (2023). Mixed convection in an open T-shaped cavity utilizing the effect of different inflow conditions with Al₂O₃-water nanofluid flow. *Results in Engineering*, 17, 100862.
- [24] Krishna, V. M., Kumar, M. S., Muthalagu, R., Kumar, P. S., & Mounika, R. (2022). Numerical study of fluid flow and heat transfer for flow of Cu-Al₂O₃-water hybrid nanofluid in a microchannel heat sink. *Materials Today: Proceedings*, 49, 1298-1302.
- [25] Mukeshkumar, P. C., & Kumar, A. (2023). Numerical study on the performance of Al₂O₃/water nanofluids as a coolant in the fin channel heat sink for an electronic device cooling. *Materials Today: Proceedings*.
- [26] Esfe, M. H., Arani, A. A. A., Niroumand, A. H., Yan, W. M., & Karimipour, A. (2015). Mixed convection heat transfer from surface-mounted block heat sources in a horizontal channel with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 783-791.

Références

- [27]27. Hadi, D. (2020). Etude de la convection d'un nano-fluide dans des microcanaux verticaux.
- [28]28. CHADI, K. (2020). Modélisation et simulation du refroidissement des éléments à base de composants électroniques par des nanofluides (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).
- [29] LABIDI, A. (2021). Effet des nano-fluides sur la convection forcée dans conduite de section rectangulaire (Doctoral dissertation).
- [30] Godunov, S. (1959). Finite difference methods for the computation of discontinuous solutions of the equations of fluid dynamics. *Mat. Sb.*, 47, 271-306.
- [31] Glimm, J. (1965). Solutions in the large for nonlinear hyperbolic systems of equations. *Communications on pure and applied mathematics*, 18(4), 697-715.
- [32] Patankar, S. V., & Spalding, D. B. (1967). Heat and mass transfer in boundary layers.
- [33] Patankar, S. (2018). Numerical heat transfer and fluid flow. CRC press.
- [34] Bousdid, I. E., & Fedjiri, N. (2022). Refroidissement par air forcé d'un bloc générateur de la chaleur (Mémoire de master).
- [35] Mdouki, R. (2014). Investigation pour le Retardement du Phénomène de Décrochage dans les Compresseurs par une Méthode Passive Originale (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [36] KHALED, B. (2012). Modélisation de la Convection Naturelle dans une Enceinte avec une Paroi munie d'un Bloc (Doctoral dissertation).
- [37] BAAMEUR, W., & BOUTICHE, S. (2021). Etude de la convection naturelle d'un nanofluide dans une cavité ondulée avec milieux poreux (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-).
- [38] Hssain, M. A., Mir, R., & El Hammami, Y. (2020). Numerical Simulation of the cooling of heated electronic blocks in horizontal channel by mixed convection of nanofluids. *Journal of Nanomaterials*, 2020(1), 4187074.