



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

N° : D02P202201M

Université 20 août 1955-Skikda

Faculté des Sciences

Département de Physique

Mémoire de Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Thème

Amélioration du transfert thermique dans une enceinte par l'utilisation d'un nanofluide hybride

Présenté par :

Roumayssa ABDENOUR et Fairouze BOUNOUARA

Soutenu le : 04/07/2022 devant le jury composé de :

N. SOTEHI	M C A	Université de Skikda	Président
A. BOUHEZZA	M C A	Université de Skikda	Rapporteur
K. BOUKERMA	M C B	Université de Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le clément et le bienveillant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Puis je remercie spécialement mon encadreur Aicha BOUHEZZA, Maitre de conférences « A » à l'université de 20 Août 1955 Skikda, qui a suivi et encadré ce travail avec compétence, pour nous avoir proposé ce sujet et pour ses visions, et ses conseils durant tous ce chemin.

Je tiens à remercier N. SOTEHI, Maitre de conférences « A » à l'université de 20 Août 1955 Skikda, bien voulu accepté de présider le jury.

J'exprime mes vifs remerciement à K. BOUKERMA, Maitre de conférences « B » à l'université de 20 Août 1955 Skikda pour sa participation au jury d'examen.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les professeurs du département de Physique en particulier et de la Faculté des Sciences en général, ainsi qu'à toute la promotion 2022 de l'université de 20 Août 1955 Skikda. Merci.

DEDICASE

À qui le Seigneur Tout-Puissant a honoré dans son cher livre... (Ma Mère Bien-Aimée).

Au chef de famille, qui n'a jamais hésité à me fournir un chemin de bonté et de bonheur (Mon père distingué).

A ceux sur qui j'ai compté dans les petits comme dans les grands... Mes sœurs bien-aimées « Khadija » « Hakima » Bilal « Boubaker » « Suhaib » et surtout « Oussama » que Dieu vous préserve

Et à mon cher mari, qui a apaisé les difficultés pour moi et mes enfants, la prunelle de mes yeux, "Baraa" "elbarae"

A toute ma famille et encore ma famille que j'aime et respecte...

A tous mes amis et connaissances qui m'ont soutenu même par une lettre

À tous, je dédie cet humble travail, demandant à Dieu Tout-Puissant de nous en faire bénéficier et de nous accorder le succès.

ROMAISA

DEDICASE

Je dédie cet humble travail au fruit de l'effort et du succès des honorables parents, que Dieu les protège, prenne soin d'eux et les perpétue. Lumière pour mon chemin, mon cher père "Alaoua", et ma mère bien-aimée, "Ramda".

Vers la famille généreuse qui m'a soutenu et qui est toujours composée des frères Hilal, sa femme et ses fils, Youssef, sa femme et sa fille, Norddine et sa fiancée, Abd Malik et sa femme, et les soeurs Najwa et Lubna.

Et aux compagnes du voyage suivant qui ont partagé avec moi ses moments heureux : zahia, Sana, Asma Dardar, Iman, Asmaa Lared, Sara Zero, Hoda, Chahra et Abir,

Et à ma collègue au mémoire Abd Nour Romaiassa, que Dieu lui accorde le succès, et au Département de Physique, à la Faculté des Sciences, et à toute la promotion de 2022 à l'Université du 20 août 1955 à Skikda, et à tous ceux qui ont marqué ma vie, aimés de mon cœur et oubliés de ma plume. Merci.

ملخص

يقدم هذا العمل دراسة عددية لانتقال الحرارة عن طريق الحمل الحراري المختلط في حاوية مربعة، مملوءة بنانوفلويد هجين. (Al₂O₃-Cu/Water). الخواص الفيزيائية للمائع ثابتة ماعد في حد الجاذبية حيث فراضية Boussinesq مطبقة.

جملة المعادلات المحصل عليها ثم حلها بواسطة برنامج Ansys Fluent .

الدراسة شملت تأثير الكسر الحجمي للجسيمات النانو مترية (ϕ) وعدد Reynolds على خطوط التيار ، وخطوط الحرارة ومعدل انتقال الحرارة (عدد Nusselt).

لاحظنا من خلال النتائج المحصل عليها أن زيادة عدد Reynolds له تأثير على خطوط التيار ، وخطوط الحرارة. يزداد معدل نقل الحرارة مع زيادة عدد Reynolds ، وزيادة الكسر الحجمي للجسيمات النانو مترية (ϕ) يعزز نقل الحرارة..

الكلمات المفتاحية: نانوفلويد الهجين ، حاوية مربعة ، الحمل الحراري المختلط ، Ansys Fluent ، Al₂O₃, Cu.

RESUME

Ce travail, présente une étude numérique du transfert de chaleur par convection mixte dans une cavité carrée bidimensionnelle remplie d'un nanofluide hybride ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu/Eau}$). Les propriétés thermo-physiques sont considérés constantes sauf dans le terme de gravité où l'hypothèse de Boussinesq est adoptée.

Le système d'équations gouvernant le problème est résolu à l'aide de Logiciel Ansys Fluent.

Les effets de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Reynolds sur les lignes de courant, les contours de température et le taux de transfert (nombre de Nusselt) ont été examinés.

Les résultats de cette étude montrent que l'augmentation du nombre de Reynolds a un effet sur les lignes de courant et les isothermes. Le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds, et l'accroissement de la fraction volumique de nanoparticules (ϕ) favorise le transfert thermique.

Mots clés : Nanofluide Hybride, Cavité Carrée, Convection Mixte, Ansys Fluent, Al_2O_3 , Cu.

ABSTRACT

This work presents a numerical study of mixed convection heat transfer in a two-dimensional square cavity filled with a hybrid nanofluid (Al₂O₃-Cu/Water).

The thermo-physical properties are considered constant except in the gravity term where the Boussinesq hypothesis is adopted.

The system of equations governing the problem is solved using Ansys Fluent software.

The effects of nanoparticle volume fraction and Reynolds number on streamlines, temperature contours and transfer rate (Nusselt number) were examined.

The results of this study show that increasing the Reynolds number has an effect on streamlines and isotherms.

The rate of heat transfer increases with increasing Reynolds number, and increasing the volume fraction of nanoparticles (ϕ) promotes heat transfer.

Keywords: Hybrid Nanofluid, Square Cavity, Mixed Convection, Ansys Fluent, Al₂O₃, Cu.

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

C_p	Chaleur spécifique à pression constante	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Gr	Nombre de Grashof	
g	accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
k	conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
H	Largueur et Longueur de la cavité	[m]
Nu	nombre de Nusselt	
p	pression	[Pa]
Re	nombre de Reynolds	
Ri	nombre de Richardson	
u	Composantes de la vitesse dans la direction x	[m.s ⁻¹]
U	vitesse de la paroi de cavité	[m.s ⁻¹]
V	Composante de la vitesse dans la direction y	[m.s ⁻¹]
T_c	Température de la paroi chaude	[K]
T_F	Température de la paroi froide	[K]
x	Coordonnée dans la direction x	
y	Coordonnée dans la direction y	

Symboles grecques

ρ	Masse volumique	[kg. m ⁻³]
μ	Viscosité dynamique	[kg. m ⁻¹ .s ⁻¹]
ν	Viscosité cinématique	[m ² .s ⁻¹]
α	Diffusivité thermique du fluide	[m ² .s ⁻¹]

β	Coefficient d'expansion thermique	[K ⁻¹]
ϕ	Fraction volumique	

Indices

nf	Nanofluide
hnf	Nanofluide hybride
f	Fluide de base
np	Nanoparticule
1	Nanoparticule 1
2	Nanoparticule 2

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Les trois modes de transfert de chaleur	04
Figure I. 2: schéma présentatif de transfert Conduction	05
Figure I. 3: schéma présentatif de transfert convectif	07
Figure I. 4: Principe physique de la convection naturelle	07
Figure I. 5 : Phénomène de la convection forcée	08
Figure I.6: phénomène de la convection mixte dans un échangeur de chaleur	09
Figure II.1 : <i>Configuration géométrique du problème étudié</i>	23
Figure III.1 : Schéma du maillage du domaine de calcul	31
Figure III.2 : Effet de la fraction volumique (Φ) sur les lignes de courant	34
Figure III.3 : Effet de la fraction volumique (Φ) sur les contours de température pour (a) : $Re = 2$ et (b) : $Re = 100$	37
Figure III.4 : Effet de la fraction volumique des nanoparticules (Φ) sur le nombre de Nusselt moyen pour (a) : $Re = 2$ et (b) : $Re = 100$..	39
Figure III.5 : Effet du nombre de Reynolds (Re) sur les lignes de courant pour (a) : $\phi = 0\%$ et (b) : $\phi = 4\%$...	41
Figure III.6 : Effet de la fraction volumique (Φ) sur les contours de température pour (a) : $\phi = 0\%$ et (b) : $\phi = 4\%$	43
Figure III.7 : Effet du type des nanoparticules sur le nombre de Nusselt moyen pour (a) : $\phi = 0\%$, (b) $\phi = 2\%$ et (c) : $\phi = 4\%$...	46

TABLE DES MATIERES

<i>TABLE DES MATIERES</i>		
<i>REMERCIEMENTS</i>		
RESUME		ii_
NOMENCLATURE		v
LISTE DES FIGURES		viii
TABLE DES MATIERS		x
INDRODUCTION GENERALE		02
CHAPITR I : Généralités sur le transfert de chaleur et les nano fluides		
I.1 Modes de transfert de chaleur		04
1.1.2 Introduction		04
I.1.3. Conduction		04
I.1.4. Rayonnemet		05
I.1.5. Convection		06
1.1.6. Types de convection		07
I.1.6.1. Convection libre ou naturelle		07
I.1.6.2. Convection forcée		08
I.1.6.3. La Convection mixte		08
I.2. Généralité sur les nanofluides		09
I.2.1 Introduction		09
I.2.2. Définition d'un nanofluide		10
I.2.3. Définition d'un nanofluide hybride		18
I. 3. Les proprietes thermo physique des nanofluides		11
I. 3. 1. La fraction volumique (ϕ)		11
I. 3. 2. La masse volumique (ρ)		11
I. 3.3 Chaleur spécifique		12
I. 3. 4. Conductivité thermique (k)		13
I. 3. 5. Viscosité dynamique (μ)		14
I. 3. 6. Coefficient d'expansion thermique		15
I.4. Les avantages des nanofluides		16
I.5. Les inconvénients des nanofluides		16
I.6. Les applications de nanofluides		17
I.7 TRAVAUX BIBLIOGRAPHIQUES DANS LEDOMAIN		19
CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE ET NUMERIQUE		
II.1 INTRODUCTION		23
II.2 MODELE PHYSIQUE		23

II.3 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES		24
II.4 FORMULATION MATHEMATIQUE DU PROBLEME		25
II.4.1 Equations de conservation		25
II.4.1.1 Equation de continuité		25
II.4.1.2 Equations de quantité de mouvement		25
II.4.1.3 Equation de l'énergie		26
II.4.2 Conditions aux limites		26
II.5 les propriétés thermo physique de nanofluid et nanofluid hybrid		26
II.6 Groupements adimensionnels		28
c) Nombre de Grachof		28
d) Nombre de Nusselt		28
e) Nombre de Reynolds		28
F)Nombre de Richardson		28
II.6 METHODE NUMERIQUE		29
<i>CHAPITRE III :RESULTATS ET DISCUSSION</i>		
III.1 INTRODUCTION		31
III.2 MAILLAGE		31
III.3 EFFET DE LA FRACTION VOLUMIQUE ϕ DES BNANOPARTICULES		32
III.3.1 Les lignes		32
III.3.2 Contours de température de courant		35
III.3.3 Nombre de Nusselt moyen		35
III.4 EFFET DU NOMBRE DE REYNOLDS		39
III.4.1 Les lignes de courant		39
III.4.2 Contours de température		41
III.4.3 Nombre de Nusselt moyen		43
CONCLUSION GENEAALE		48
REFERNENCE BIBILIOGRAPHIQUES		50

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le transfert de chaleur peut jouer un rôle important dans divers processus industriels. L'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermo-physiques des fluides utilisés. Le transfert thermique au sein des nanofluides ouvre depuis plusieurs années un portail de recherche important pour les études expérimentales, analytiques et numériques menant ce domaine à des publications liées à l'utilisation des nanofluides comme des fluides actifs. La présence des nanoparticules dans le fluide traditionnel améliore le transfert thermique d'une manière remarquable par rapport à un fluide traditionnel.

L'intensité du transfert de chaleur dépend principalement de la conductivité et de la capacité thermique des fluides caloporteurs. Or il s'avère que la conductivité thermique d'un fluide non métallique est très faible et que l'ajout de particules nanométrique dans un fluide (appelé alors nanofluide).

Dans le présent travail, nous étudions la convection mixte dans une cavité carrée bidimensionnelle remplie d'un nanofluide hybride ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu/Eau}$). La paroi inférieure est maintenue à une température constante T_C , et la paroi supérieure est maintenue à une température constante (T_F) avec ($T_C > T_F$). La paroi supérieure est animée d'un mouvement de translation. Les deux parois verticales sont adiabatiques. L'objectif de notre travail est d'étudier les effets de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Reynolds sur les champs dynamique et thermique de l'écoulement. Nous avons utilisé comme modèle mathématique les équations de conservation (de continuité, de quantité de mouvement et de l'énergie).

Dans ce contexte, trois chapitres ont été présentés dans cette mémoire.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les différents modes de transfert de chaleur et les nanofluides (nanofluides et nanofluides hybride), et leurs classements ainsi que leurs procédures de fabrication et leurs domaines d'application.

Le deuxième chapitre est consacré à définir dans ce chapitre nous décrivons et formulons le modèle physique, mathématique et les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées, ainsi que la méthode numérique.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les principaux résultats numériques de cette simulation et leurs Interprétations. Nous terminons par une conclusion générale dans laquelle nous dégagerons les principaux résultats obtenus au cours de cette étude.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR ET LES NANO FLUIDES

I.1 MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR

I.1.1 Introduction

Un transfert de chaleur ou transfert thermique entre deux corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les deux corps [1].

On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur :

- La conduction thermique ou diffusion thermique
- Le rayonnement thermique
- La convection

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques.

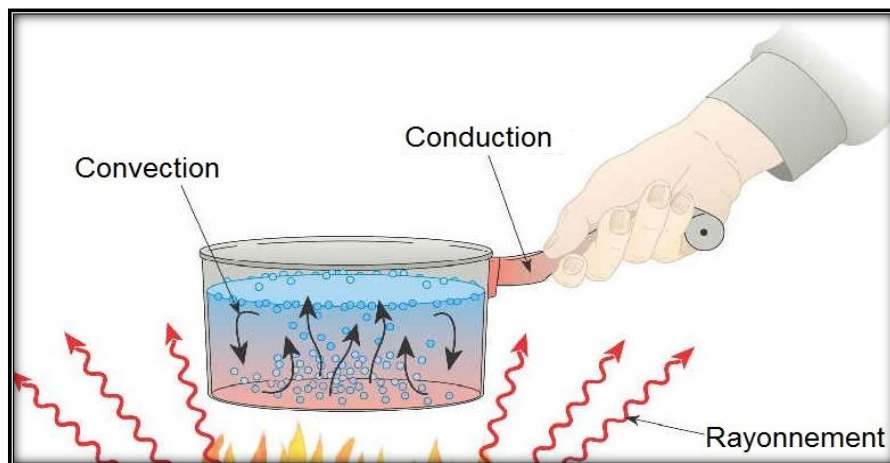


Figure I. 1 : *Les trois modes de transfert de chaleur* [01]

I.1.2. Conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur entre deux milieux en contact physique.

Dans la plupart des cas on étudie la conduction dans les milieux solides, puisque dans les milieux fluides (c'est-à-dire liquide ou gazeux), la

conductivité thermique est faible [02].

La conduction est le seul mécanisme intervenant dans le transfert de chaleur dans un solide homogène, opaque et compact.

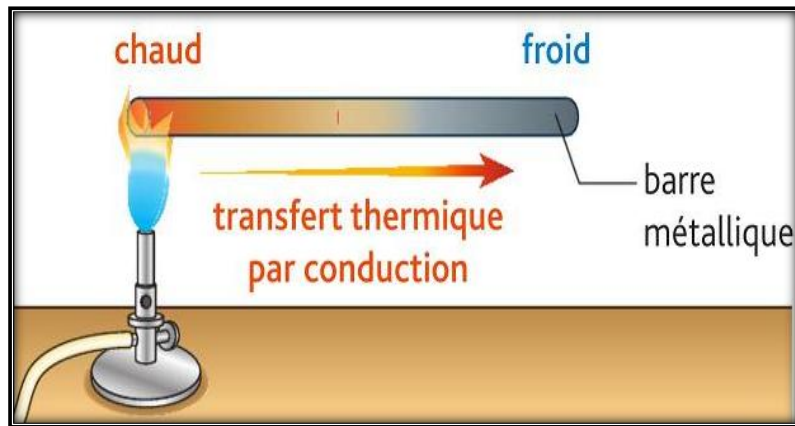


Figure I. 2 : Schéma présentatif de transfert par conduction [03.]

I.1.3. Rayonnement

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre froid sans nécessité de support matériel. C'est donc le seul mode où la chaleur peut se propager dans le vide. Le rayonnement thermique ne diffère des autres ondes électromagnétiques, comme les ondes hertziennes par exemple, que par son origine : la température.

En effet tout corps rayonne tant que sa température est différente de zéro Kelvin.

Les corps émettent de l'énergie par leur surface, sous forme d'un rayonnement d'ondes électromagnétiques, et ce d'autant plus que leur température est élevée. Inversement, soumis à un rayonnement, ils en absorbent une partie qui se transforme en chaleur [4].

Le rayonnement est un processus physique de transmission de la chaleur sans support matériel. Ainsi, entre deux corps, l'un chaud, l'autre froid, mis en vis-à-vis (même séparés par du vide), une transmission de chaleur s'effectue par rayonnement du corps chaud vers le corps froid : le

corps chaud émet un flux Q_1 et absorbe une partie du flux Q_2 émis par le corps froid. Comme $Q_1 > Q_2$, le bilan du flux est tel que le corps chaud cède de l'énergie au corps froid. A l'inverse, le bilan du flux peut être retrouvé sur le corps froid qui émet moins d'énergie qu'il n'en absorbe.

I.1.4. Convection

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

Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes [5].

D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux particules fluides adjacentes, l'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces particules. Ensuite ces dernières vont se mélanger avec d'autres particules situées dans une région à basse température et transfèrent une partie de leur énergie, celle-ci est à présent emmagasinée dans les particules fluides et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement [6].

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée, qui est le cas de la

présente étude avec la présence de nanofluides et si les deux causes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite mixte.

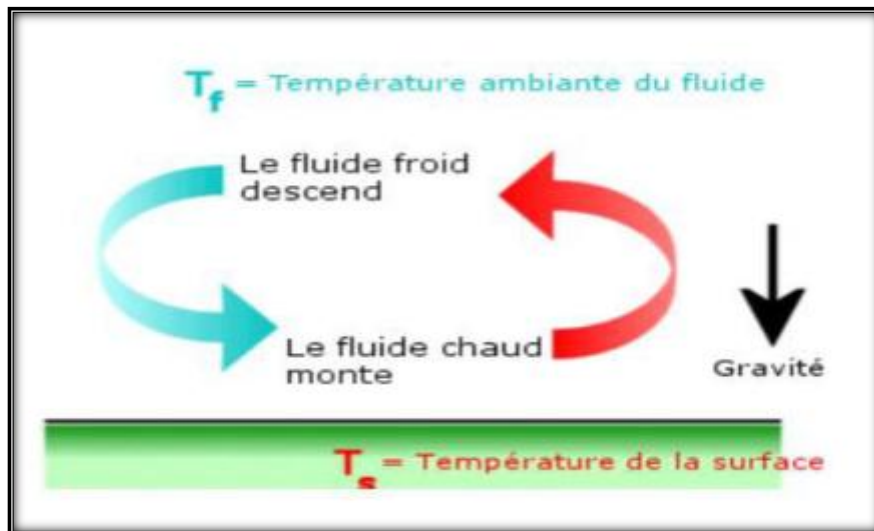


Figure I. 3 : Schéma présentatif de transfert convectif [07].

I.1.4.1 Types de convection

I.1.4.1.1 Convection libre ou naturelle

Dans ce type de convection le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide comme le montre la figure (I. 4)

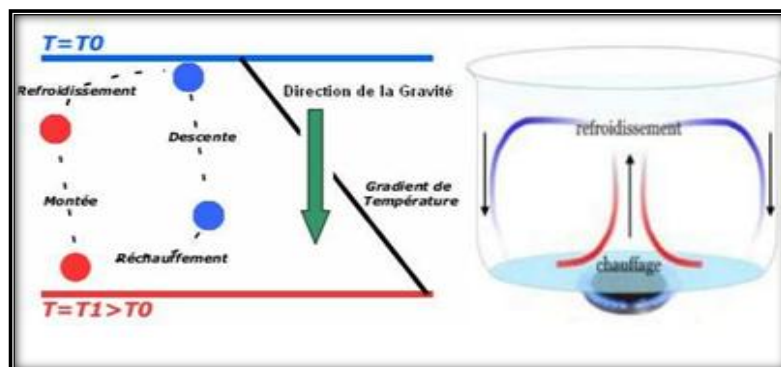


Figure I. 4 : Principe physique de la convection naturelle [08]

I.1.4.1.2 Convection forcée

Dans ce type de convection le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques (compresseur, pompe, ventilateur, etc...); c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide. L'étude de la transmission de chaleur par convection est donc étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides [5].

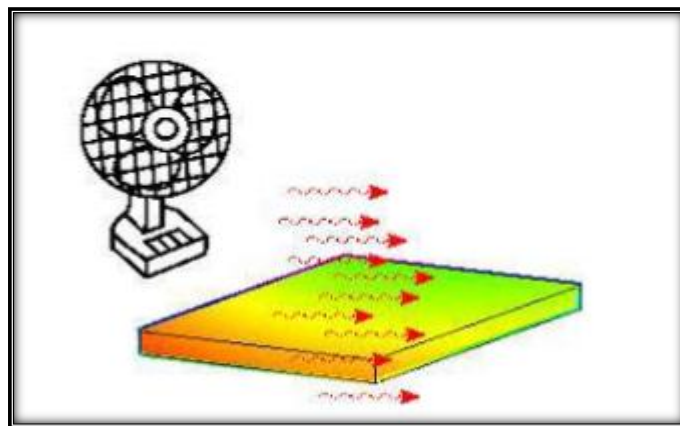


Figure I. 5 : Phénomène de la convection forcée [09]

I.1.4.1.3 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 [10].

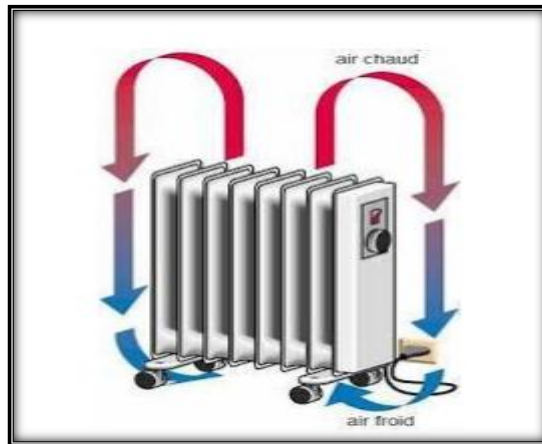


Figure I.6 : phénomène de la convection mixte dans un échangeur de chaleur [11]

I.2. GENERALITE SUR LES NANOFUIDES

I.2.1 Introduction

L'efficacité d'un processus de transfert thermique est généralement limitée par les propriétés thermo-physiques des fluides utilisés. La miniaturisation de nombreuses applications est conditionnée par la possibilité d'évacuer de façon efficace les puissances thermiques dissipées au sein des appareillages. Le considérable récent développement des recherches traitant des nanofluides est dû au fait qu'il est possible, pour certaines applications, d'accroître de façon non négligeable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pure une faible concentration de nanoparticules. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom de "Nanofluides". Ce terme a été introduit par Choi [4] au laboratoire d'Argonne en U. S. American 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspension colloïdale.

Dans cette étude on essaiera de montrer la potentialité de remplacer les fluides avec des nanofluides qui peuvent jouer le même rôle que ces

fluides ordinaire mais avec une bonne efficacité du dégagement de la chaleur.

L'adjonction des particules métalliques dans un fluide a mis en évidence une nette amélioration des capacités thermiques de celui-ci.

Les expériences effectuées sur les fluides caloporteurs avec des particules de taille micrométrique posent des problèmes de sédimentation des particules causant des chutes de pression lors de l'écoulement. Actuellement, il est possible de fabriquer des particules de l'ordre du nanomètre qui remédient à ces problèmes.

I.2.2. Définition d'un nanofluide

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométriques en suspension dans un liquide. Les études de ces fluides composites montrent des aptitudes particulièrement intéressantes du fait d'une meilleure conductivité thermique et d'un coefficient d'échange convectif significativement accru par rapport à des liquides classiques, l'eau en particulier. Une telle augmentation de la conductivité thermique du nanofluide ne peut pas seulement être imputée à la plus grande conductivité thermique des nanoparticules en suspension, l'amélioration vient d'une combinaison de plusieurs facteurs physiques simultanés [12].

Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agréations, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule, les solvants les plus utilisés sont :

- l'eau.
- l'éthylène glycol, EG.
- les huiles.
- le Toluène.

- Les fluides de réfrigération.

I.2.3 Les propriétés thermo physique des nanofluides

Les propriétés physiques du nanofluide dépendent essentiellement de fluide de base (liquide) et de la phase dispersée (nanoparticules) sous une forme solide, donc leur définition nécessite un retour aux propriétés de chacun de ses composants (fluide de base et nanoparticule) [13].

I. 2. 3.1 La fraction volumique (ϕ)

La fraction volumique des nanoparticules désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide +solide).

$$\phi = \frac{V_s}{V_t} \quad (I.1)$$

Où :

V_s : Volume de solide (nanoparticules)

V_t : Volume totale.

I. 3. 2.2 La masse volumique (ρ)

Pour calculer la masse volumique d'un nanofluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique ϕ à une température T donnée, nous revenons à la masse volumique de ce mélange [14].

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{v}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{v_f + v_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s}$$

À Partir de là on déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_s \quad (I.2)$$

Où :

ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide,

ρ_f : La masse volumique du fluide de basse,

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules solides.

I.3.2.3 Chaleur Spécifique

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène.

$$C_p = \frac{dQ}{m dT} \quad (I.3)$$

La chaleur spécifique d'une nanofluide est donnée par deux formules :

De nombreux auteurs dont Pak et Cho [15] ont utilisé la formule suivante :

$$(C_p) = (1 - \phi)(C_p)_f + \phi(C_p)_s \quad (I.4)$$

D'autres auteurs dont Xuan et Roetzel [16] ont utilisé :

$$(\rho C_p) = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (I.5)$$

Ce dernier résultat peut être retrouvé simplement en revenant à la définition de la chaleur spécifique du nanofluide.

$$\begin{aligned} (\rho C_p)_{nf} &= (\rho)_{nf} (C_p)_{nf} = \rho_{nf} \frac{Q_f + Q_s}{(m_f + m_s) \Delta T} = \rho_{nf} \frac{(m C_p)_f \Delta T + (m C_p)_s \Delta T}{(m_f + m_s) \Delta T} = \\ \rho_{nf} \frac{(\rho V C_p)_f + (\rho V C_p)_s}{\rho_f V_f + \rho_s V_s} &= \left(\frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \right) \left(\frac{(\rho V C_p)_f + (\rho V C_p)_s}{\rho_f V_f + \rho_s V_s} \right) = (\rho)_f (C_p)_f \left(\frac{V_f}{V_f + V_s} \right) \end{aligned} \quad (I.4)$$

Où :

$(C_p)_{nf}$: La chaleur spécifique du nanofluide,

(C_p) : La chaleur spécifique du fluide de basse,

(C_p) : La chaleur spécifique des nanoparticules.

I.3.2.4 Conductivité thermique (k)

La conductivité thermique est une propriété principale dans notre étude parce qu'elle joue un rôle important dans le phénomène de transfert de chaleur. Ils existent plusieurs modèles analytiques permettant de calculer diverses propriétés des matériaux hétérogènes comme la conductivité thermique. Plusieurs chercheurs ont essayé de lier l'évolution de la conductivité thermique aux différents paramètres physico-chimiques caractérisant les nanofluides comme : la fraction volumique des nanoparticules, la taille des nanoparticules, la température, la viscosité du fluide de base [14].

- **Modèle de Maxwell (1873) :**

Le modèle de Maxwell [15] et ses dérivés sont probablement les plus largement utilisés dans la littérature. Ce modèle de base suppose que les particules sont sphériques, de dimensions millimétriques ou microscopiques et sont dispersées en faible concentration [16].

Le modèle de Maxwell est donné par la formule suivante :

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_s + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_s)}{(k_s + 2k_f) + \phi(k_f - k_s)} \right] \quad (I.5)$$

Où,

ϕ : Fraction volumique,

k_{nf} : Conductivité thermique du nanofluide,

k_s : Conductivité thermique des nanoparticules solides,

k_f : Conductivité thermique du fluide de base.

- **Modèle de Hamilton et Crosser (1962)**

Ce modèle, dérive de celui de Maxwell, incorpore un facteur de forme n pour prendre en compte la forme non –sphérique des particules [17] :

$$K_{nf} = k_f \frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_s)\phi}{k_s + (n-1)k_f + (k_f - k_s)\phi} \quad (\text{I.6})$$

Quand $n = 3$ on retrouve le cas des particules sphériques et du modèle de Maxwell. Le cas $n = 1$ correspond à des particules cylindriques.

I.3.2.5 Viscosité dynamique (μ)

La viscosité peut être définie comme étant une propriété d'un fluide pourqu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement. On peut donc parler de la viscosité comme étant une mesure du frottement interne d'un fluide. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé. L'ajout de particules solides dans un liquide provoque une augmentation, plus ou moins importante, de la viscosité du mélange obtenu. Là encore, de nombreux facteurs peuvent être à l'origine des disparités constatées. Pour des nanoparticules identiques (nature, taille) et un même fluide de basse, la qualité de la dispersion, et la température peuvent influencer [8].

Considérablement sur la viscosité. La viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité dynamique du fluide de basse et la fraction volumique du nanofluide, pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes [9].

- **Modèle d'Einstein (1906) :**

La viscosité dynamique d'un nanofluide est donnée par la relation d'Einstein [11], pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines rigides la relation d'Einstein et la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\phi) \tag{I.7}$$

Où :

μ_{nf} : Viscosité dynamique du nanofluide,

μ_f : Viscosité dynamique du fluide de base,

ϕ : La fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation est valable juste pour $\phi \leq 0,03$.

- **Modèle de Brinkman (1952)**

Par contre, Brinkman a généralisé la formule pour qu'il puisse être utilisé dans une large plage de concentrations volumiques [18].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{(1-\phi)^{2,5}} \tag{I.8}$$

I.3.2.6 Coefficient d'expansion thermique

Nous nous intéressons dans le cadre de notre étude aux seuls fluides porteurs incompressible (masse volumique indépendante de la pression) mais dilatables. Cette variation de masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique.

$$\left(\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p\right) \tag{I.9}$$

Appelé également coefficient de dilatation isobare.

Le calcul de la valeur de ce coefficient pour les nanofluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides et par

analogie avec la relation qui détermine la masse volumique l'expression suivante [18] :

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (I.10)$$

Où,

β_{nf} : Coefficient d'expansion thermique du nanofluide.

I.2.4 Les avantages des nanofluides

Il est indéniable qu'un bon nanofluide apporte un coup de pouce à l'efficacité d'un système de refroidissement liquide quelconque sans avoir plus de bruit et sans consommer plus. Au contraire, l'efficacité générale étant améliorée, on peut penser à réduire la ventilation ou à prendre une pompe moins puissante, tout en gardant un niveau de performance identique si le silence de fonctionnement est la priorité [19]. Cependant les nanofluides offrent les avantages suivants :

- 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.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux fluides conventionnelles, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

I.2.5 Les inconvénients des nanofluides

On a vu que l'érosion des surfaces et la sédimentation sont des effets que l'on peut négliger avec un nanofluide. La corrosion reste un point à

vérifier, mais si on le choisit bien en prenant quelque chose d'inerte ou en l'adaptant à son circuit, alors il n'y aura aucun souci. Mais il présente pas mal d'inconvénients tels que :

- le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.
- instabilité des nanoparticules (dispersion).
- chute de pression accrue lors du pompage.
- le coût élevé des nanofluides.
- difficultés dans le processus de production.

Au cours de ce chapitre on a présenté des généralités sur les différents modes de transfert de chaleur et les nanofluides, les régimes d'écoulement, quelques groupements adimensionnels, les nanofluides et leurs classements ainsi que leurs procédures de fabrication et leurs domaines d'application [13].

I.2.6 Les applications de nanofluides

- L'industrie.
- Refroidissement des systèmes électroniques.
- Refroidissement des systèmes thermiques.
- Refroidissement des systèmes spatiaux.
- Refroidissement des systèmes militaires.
- Refroidissement des systèmes nucléaires.
- La biomédecine [20].

I.2.7 Définition d'un nanofluide hybride

Un matériau hybride est une combinaison de propriétés physiques et chimiques de deux ou plusieurs matériaux. Les deux nanoparticules ou plus sont dispersées dans un fluide de base pour obtenir les propriétés souhaitées pour des applications individuelles. La fabrication de nanofluides avec deux ou plusieurs nanoparticules similaires ou différentes est populaire en tant que nanofluide hybride. Les travaux sur les nanofluides hybrides sont peu nombreux [10].

De nombreuses études expérimentales sur les nanofluides hybrides restent encore à faire. Les nanofluides hybrides généralement utilisés sont $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CNT}$, Cu/TiO_2 , $\text{CNT}/\text{Fe}_3\text{O}_4$, et ainsi de suite. Le nanofluide hybride est un nouveau domaine de recherche pour les chercheurs en génie thermique pour obtenir un système de refroidissement amélioré.

I.2.8 Les propriétés thermo physique des nanofluides

I.2.8.1 La masse volumique

$$\rho_{hnf} = (1 - \phi_1 - \phi_2)\rho_f + \rho_1\phi_1 + \rho_2\phi_2 \quad (\text{I.11})$$

I.2.8.2 La capacité calorifique

$$(\rho C_p)_{hnf} = (1 - \phi_1 - \phi_2)(\rho C_p)_f + \phi_1(\rho C_p)_1 + (\rho C_p)_2\phi_2 \quad (\text{I.12})$$

I.2.8.3 Coefficient d'expansion thermique

$$(\beta)_{hnf} = [(1 - \phi_1 - \phi_2)(\rho\beta)_f + \phi_1\rho_1\beta_1 + \phi_2\rho_2\beta_2]/\rho_{hnf} \quad (\text{I.13})$$

I.2.8.4 La conductivité thermique

$$k_{hnf} = \frac{(k_{hp} + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_{hp})}{(k_{hp} + 2k_f) + \phi(k_f - k_{hp})} \quad (I.14)$$

$$k_{hp} = \frac{\phi_1 k_1 + \phi_2 k_2}{\phi} \quad \text{Avec : } \phi = \phi_1 + \phi_2$$

I.2.8.5 La viscosité dynamique

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi_1)^{2.5} (1 - \phi_2)^{2.5}} \quad (I.15)$$

I.2.8.6 Diffusivité

$$\alpha_{hnf} = \frac{k_{hnf}}{(\rho C_p)_{hnf}} \quad (I.16)$$

I.3 TRAVAUX BIBLIOGRAPHIQUES DANS LEDOMAIN

Suriya uma devi .S.and S.P.anjali devi [20] Ce travail compare les caractéristiques de transfert de chaleur des nanofluides traditionnels avec celles des nanofluides hybrides émergents. Le nanofluide hybride, un nouveau type de fluide conventionnel, a été utilisé pour améliorer le transfert de chaleur de l'écoulement dans la couche limite. Un nouveau modèle de propriétés thermo-physiques est utilisé pour étudier les effets de la force de Lorentz sur une surface d'étirement tridimensionnelle soumise à un échauffement. Les comparaisons sont obtenues grâce à l'étude paramétrique numérique qui a été réalisée pour explorer les effets de divers paramètres physiques impliqués dans le problème. De cette étude, on observe que le taux de transfert de chaleur du nanofluide hybride (Cu-AlO₃/eau) est supérieur à celui du nanofluide (Cu/eau) même en présence d'un de champ magnétique externe.

S. Suresh et al. [18] dans ce travail, des particules hybrides AlO-Cu ont été synthétisées par la technique de réduction à l'hydrogène à partir du mélange de poudres d'AlO et de CuO dans des proportions pondérales de 90:10 obtenues à partir d'une synthèse par voie chimique. Des nanofluides hybrides AlO-Cu/eau avec des concentrations volumiques de 1% à 2 ont été préparés ensuite en dispersant la poudre de nano composites synthétisés dans de l'eau déminéralisée. Les résultats expérimentaux ont montré que la conductivité thermique et la viscosité des nanofluides hybrides préparés augmentent avec la concentration volumique des nanoparticules. La conductivité thermique et la viscosité des nanofluides ont été mesurées, et il a été constaté que l'augmentation de la viscosité est sensiblement supérieure à l'augmentation de la conductivité thermique.

Ayads Abedalh et al. [19] ont présenté une étude expérimentale de transfert de chaleur de nanofluides hybrides dans un conduit rectangulaire chauffé par flux laminaire est réalisée expérimentalement. Les nanoparticules solides utilisées sont Al_2O_3 et de TiO_2 en suspension dans de l'eau pure. Le processus de préparation du nanofluide hybride pour 1 %, 2% et 3 % de fraction massique a été mené. Le conduit est chauffé par le bas à l'aide d'un radiateur électrique et les autres parois sont isolées. Les résultats de l'amélioration du transfert de chaleur et de la chute de pression sont indiqués. Ils ont été observés que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds et de la fraction massique tandis que le facteur de frottement diminue avec la diminution du nombre de Reynolds et l'augmentation de la fraction massique.

Nur Syazana Anuar et al. [21] ont étudié l'influence des forces de flottabilités sur l'écoulement du nanofluide hybride Ag-MgO/eau dans une plaque perméable inclinée. Les équations différentielles partielles (PDE) sont converties en un système d'équations différentielles ordinaires (ODE) en employant une transformation de similarité appropriée. Le modèle

mathématique simplifié est ensuite résolu numériquement à l'aide du solveur `bvp4c` du logiciel MATLAB. Les résultats révèlent également que l'augmentation des valeurs de la fraction volumique des nanoparticules d'Ag dans le nanofluide MgO/eau diminue le nombre de Nusselt local. De plus, le nombre de Nusselt local augmente lorsque l'angle d'inclinaison augmente.

Abdolreza Moghdassi et al. [21] ont présenté une étude numérique d'un écoulement laminaire d'un nanofluide hybride $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu/Eau}$ dans un tube circulaire horizontal. Le nanofluide hybride à base d'eau Al_2O_3 et $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$ avec une concentration volumique de 0, 1% et une taille moyenne de particules de 15 nm a été pris en compte. Les résultats obtenus montrent que le coefficient de transfert de chaleur et le nombre de Nusselt moyen pour le nanofluide hybride $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu /Eau}$ sont plus élevés par rapport à $\text{Al}_2\text{O}_3\text{/Eau}$ et à l'eau pure.

CHAPITRE II
MODELISATION MATHEMATIQUE ET
NUMERIQUE

II.1 INTRODUCTION

Ce chapitre porte de façon générale sur la modélisation des écoulements et des transferts de chaleur dans des enceintes. Pour cela, nous présentons le modèle physique et les hypothèses simplificatrices.

Nous formulons le problème physique régissant le phénomène de convection mixte. Nous exprimons les équations de conservation et les conditions aux limites sous forme dimensionnelle. Nous décrivons la méthode numérique utilisée pour résoudre les équations de conservation.

II.2 MODELE PHYSIQUE

La configuration étudiée est schématisée sur la figure II.1. On considère une cavité carrée remplie d'un nanofluide hybride ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cu} / \text{Eau}$). Les parois verticales sont considérées adiabatiques. La paroi inférieure de la cavité est soumise à une température constante (T_c) et la paroi supérieure est maintenue à une température constante (T_f) avec ($T_c > T_f$). La paroi supérieure se déplace avec une vitesse U .

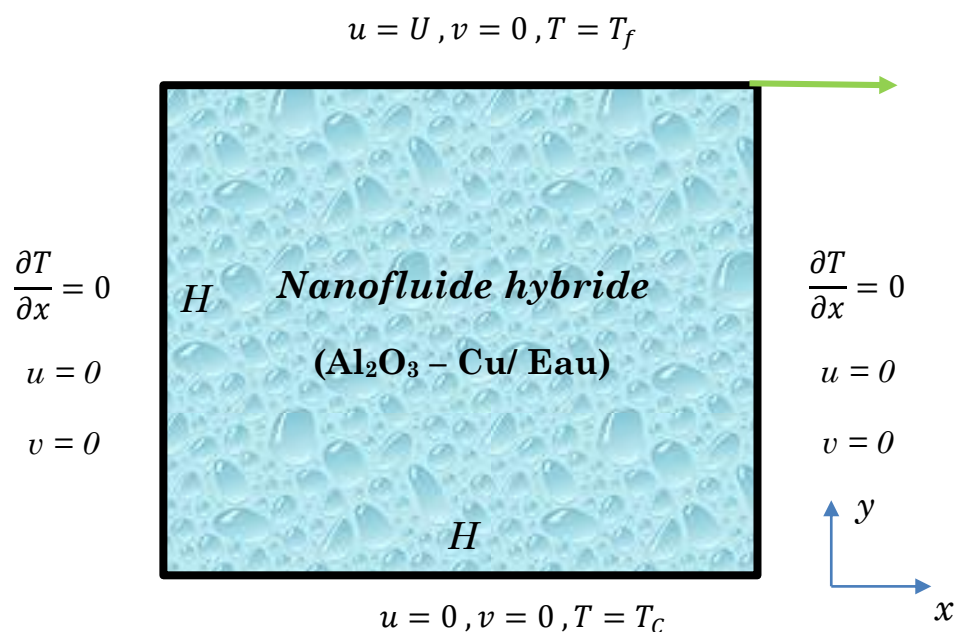


Figure II.1 : Configuration géométrique du problème étudié

II.3 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Pour étudier le phénomène de la convection mixte, nous avons pris en considération les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'écoulement est supposé bidimensionnel, et laminaire.
- L'écoulement du nanofluide hybride et le transfert de chaleur sont permanents.
- Le nanofluide hybride est newtonien et incompressible ($\rho = cte$).
- Le transfert par rayonnement est négligeable.
- Les propriétés thermo-physiques du nanofluide hybride sont constantes, sauf pour la variation de la masse volumique qui est estimée par l'approximation de Boussinesq [18] :

$$\rho = \rho_0[1 - \beta_T(T - T_0)] \quad (\text{II.1})$$

- La dissipation visqueuse est négligeable.

Les propriétés thermo physiques du fluide et des nanoparticules sont regroupées dans le tableau II. 1 [22] :

	Eau	Cu	Al ₂ O ₃
ρ (kg.m ⁻³)	997.1	8933	3970
C_P (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4179	385	765
k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.613	401	40
β (K ⁻¹)	21×10^{-5}	1.67×10^{-5}	0.85×10^{-5}
μ (kg.m ⁻¹ s ⁻¹)	0.855×10^{-3}		

Tableau II. 1 : Propriétés thermo physiques de l'eau et des nanoparticules

II.4 FORMULATION MATHEMATIQUE DU PROBLEME

II.4.1 Equations de conservation

II.4.1.1 Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.2})$$

II.4.1.2 Equations de quantité de mouvement

Les équations de conservations de quantité de mouvement, connue sous le nom d'équations de Navier –Stokes, sont obtenues par l'application de la deuxième loi de la dynamique à une particule de fluide passant à travers un volume de contrôle infinitésimal. Elles s'écrivent pour un fluide incompressible et stationnaire comme suit [13] :

Equation de quantité de mouvement suivant (Ox)

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{hnf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_{hnf}}{\rho_{hnf}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II. 3})$$

Equation de quantité de mouvement suivant (Oy)

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{hnf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_{hnf}}{\rho_{hnf}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{hnf}}{\rho_{hnf}} g(T - T_F) \quad (\text{II.4})$$

II.4.1.3 Equation de l'énergie

L'équation de l'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Cette équation pour un fluide newtonien, incompressible, s'écrit sous la forme suivante :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{hnf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.5})$$

II.4.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites qui s'appliquent à ce problème sont les suivantes :

- A la paroi supérieure : $y = H$ (II.7)

$$u = U, v = 0, T = T_F \quad (\text{II.8})$$

- A la paroi inférieure : $y = 0$

$$u = 0, v = 0, T = T_C$$

- Sur la paroi verticale gauche : $x = 0$ (II.9)

$$u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

- Sur la paroi verticale droite : $x = H$ (II.10)

$$u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

II.5 Les propriétés thermo physique de nanofluide et nanofluides hybride

On utilise le modèle à une seule phase qui considère le nanofluide hybride comme milieu continu. Les propriétés du nanofluide et nanofluide hybride, on peut calculer par les formules suivantes :

- La masse volumique du nanofluide est donnée par :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_s \quad (\text{II.11})$$

- La masse volumique du nanofluide hybride est donnée par :

$$\rho_{hnf} = \phi_1 \rho_{np1} + \phi_2 \rho_{np2} + (1 - \phi_1 - \phi_2) \rho_f \quad (\text{II.12})$$

Où ϕ est la fraction volumique des nanoparticules.

- La diffusivité thermique du nanofluide :

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (\text{II.13})$$

• La diffusivité thermique du nanofluide hybride :

$$(\beta)_{hnf} = \frac{\phi_1(\rho\beta)_{np1} + \phi_2(\rho\beta)_{np2} + (1 - \phi_1 - \phi_2)(\rho\beta)_f}{(1 - \phi_1 - \phi_2)\rho_f + \phi_1\rho_{np1} + \phi_2\rho_{np2}} \quad (\text{II.14})$$

• La capacité calorifique du nanofluide :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi (\rho C_p)_s \quad (\text{II.15})$$

• La capacité calorifique du nanofluide hybride :

$$(\rho C_p)_{hnf} = \phi_1(\rho C_p)_{np1} + \phi_2(\rho C_p)_{np2} + (1 - \phi_1 - \phi_2)(\rho C_p)_f \quad (\text{II.16})$$

• Le coefficient de dilatation thermique du nanofluide peut être exprime par :

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (\text{II.17})$$

• La viscosité du nanofluide est approximée par le modèle de Brinkman [21] :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (\text{II.18})$$

• La viscosité du nanofluide hybride est approximée par le modèle de Brinkman [12] :

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi_1)^{2.5}(1 - \phi_2)^{2.5}} \quad (\text{II.19})$$

• La conductivité thermique effective du nanofluide est approximée par le modèle de Maxwell [8] :

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_{np} + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_{np})}{(k_{np} + 2k_f) + \phi(k_f - k_{np})} \right] \quad (\text{II.20})$$

• La conductivité thermique effective du nanofluide hybride est approximée par le modèle de Maxwell [8] :

$$\frac{k_{hnf}}{k_f} = \left[\frac{(k_{hp} + 2k_f) - 2(\phi_1 + \phi_2)(k_f - k_{hp})}{(k_{hp} + 2k_f) + (\phi_1 + \phi_2)(k_f - k_{hp})} \right] \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$k_{hp} = \frac{\phi_1 k_{np1} + \phi_2 k_{np2}}{\phi_1 + \phi_2}$$

II.6 Groupements adimensionnels

➤ Nombre de Grachof

C'est le rapport entre la force de gravité causant le mouvement du fluide et la force de viscosité.

$$Gr = \frac{g\beta H^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (\text{II.22})$$

➤ Nombre de Reynolds

Il représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité.

$$Re = \frac{UH}{\nu} \quad (\text{II.23})$$

➤ Nombre de Richardson

Ce nombre représente l'importance relative de la convection naturelle à la convection forcée et jouent un rôle important pour indiquer les régimes de convection :

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (\text{II.24})$$

➤ Nombre de Nusselt

Les échanges thermiques sont caractérisés par un nombre adimensionnel dit nombre de Nusselt qui est le rapport entre le flux échangé par convection à celui échangé par conduction.

Le coefficient de transfert de chaleur local et le nombre de Nusselt sont calculés à l'aide ces équations :

$$h(x) = \frac{q}{T_c - T_m} \quad (\text{II.25})$$

$$Nu(x) = \frac{h(x)H}{k_{hnf}} \quad (\text{II.26})$$

Où T_c et T_m sont la température du nanofluide hybride à la paroi et la température moyenne du nanofluide hybride, respectivement.

Le nombre de Nusselt moyen est défini par :

$$\overline{Nu} = \frac{1}{H} \int_0^H Nu \, dx \quad (\text{II.27})$$

II.7 METHODE NUMERIQUE

De nombreuses méthodes numériques existent pour la résolution des types d'équations différentielles,

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

Avec Ansys Fluent, vous pouvez créer des modèles physiques avancés et analyser une variété de phénomènes fluides. Dans notre travail nous avons effectué une simulation numérique moyennant le code de calcul Ansys Fluent, qui acquiesce la résolution des équations de transport par la méthode des volumes finis. Des adaptations de débit et des conditions aux limites sont utilisées.

CHAPITRE III
RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'étude numérique de la convection mixte une cavité remplie d'un nanofluide hybride . L'étude est axée, d'une part, sur les influences de la fraction volumique des nanoparticules (Φ) et le nombre de Reynolds sur l'aspect thermique et dynamique de l'écoulement.

Les résultats, sont obtenus pour l'eau comme fluide pure et le nanofluide hybride (Cu (50%) – Al₂O₃ (50%)/Eau), nous avons varié le nombre de Reynolds (Re) de 2 jusqu'à 100 et la fraction volumique des nanoparticules ($\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$) varie de 0% à 4%.

III.2 MAILLAGE

Pour la résolution numérique du problème nous avons adopté un maillage uniforme selon les deux directions x et y, sa taille est (120 x 120).

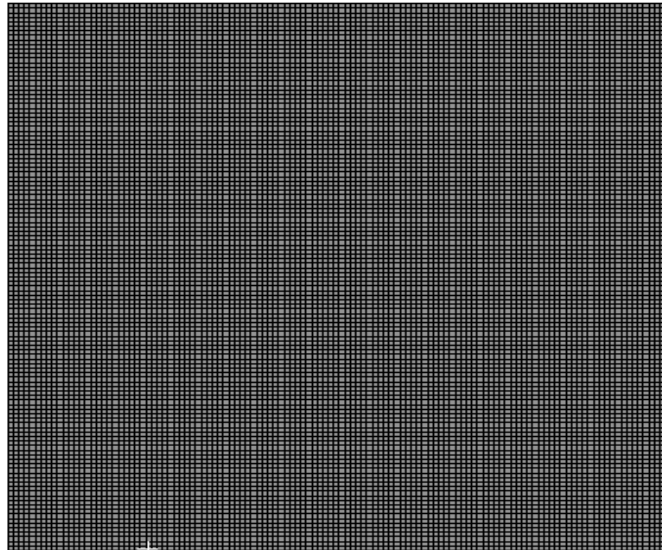
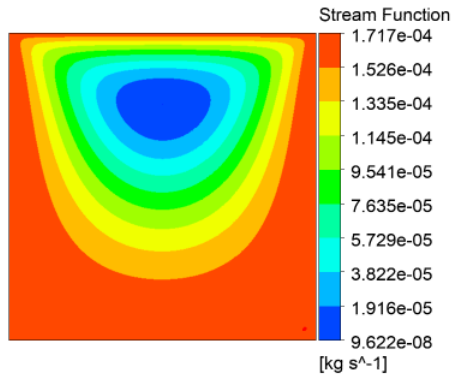


Figure III.1 : *Schéma du maillage du domaine de calcul*

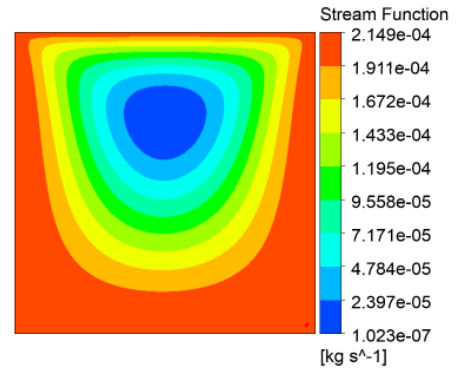
III.3 EFFET DE LA FRACTION VOLUMIQUE Φ DES NANOPARTICULES

III.3.1 Les lignes de courant

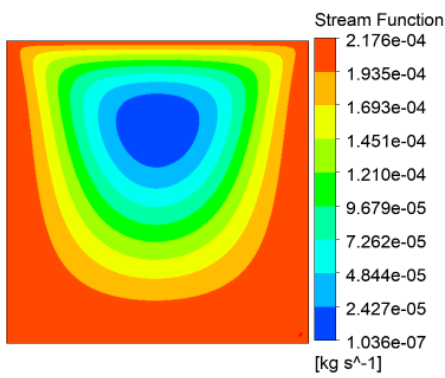
La figure (III.2) illustre l'effet de la fraction volumique des nanoparticules Φ sur les lignes de courant pour deux nombre de Reynolds. On observe pour le nombre de Reynolds $Re = 2$ proche de la paroi supérieure un mouvement de rotation du fluide dans le sens antihoraire avec l'existence d'une cellule. La taille de cette cellule augmente légèrement avec l'accroissement de la fraction volumique des nanoparticules. Pour le nombre de Reynolds $Re = 100$, on remarque pour $\Phi = 0\%$ proche de la paroi supérieure un mouvement de rotation du fluide dans le sens antihoraire avec l'existence d'une cellule, par contre proche de la paroi inférieure un mouvement de rotation du fluide dans le sens horaire avec l'existence d'une autre cellule. Mais pour $\Phi > 0\%$, on remarque la disparition de la cellule inférieure, et le centre de la cellule supérieure se déplace dans le sens du mouvement de la paroi supérieure.



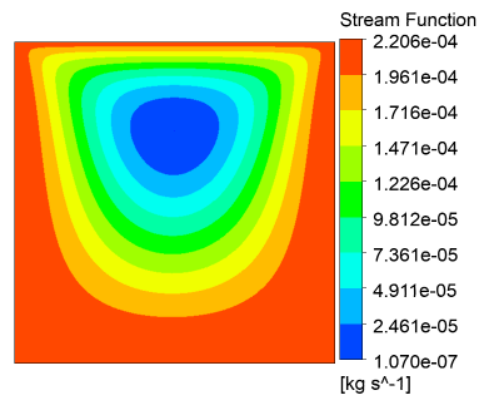
$\phi = 0 \%$



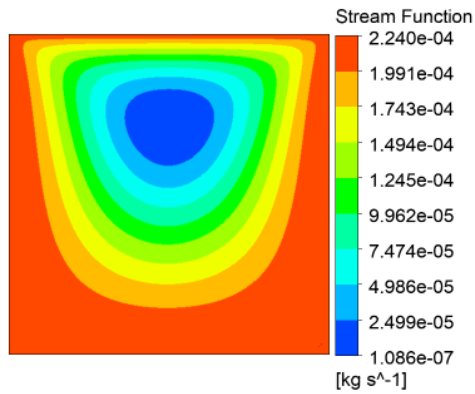
$\phi = 1 \%$



$\phi = 2 \%$

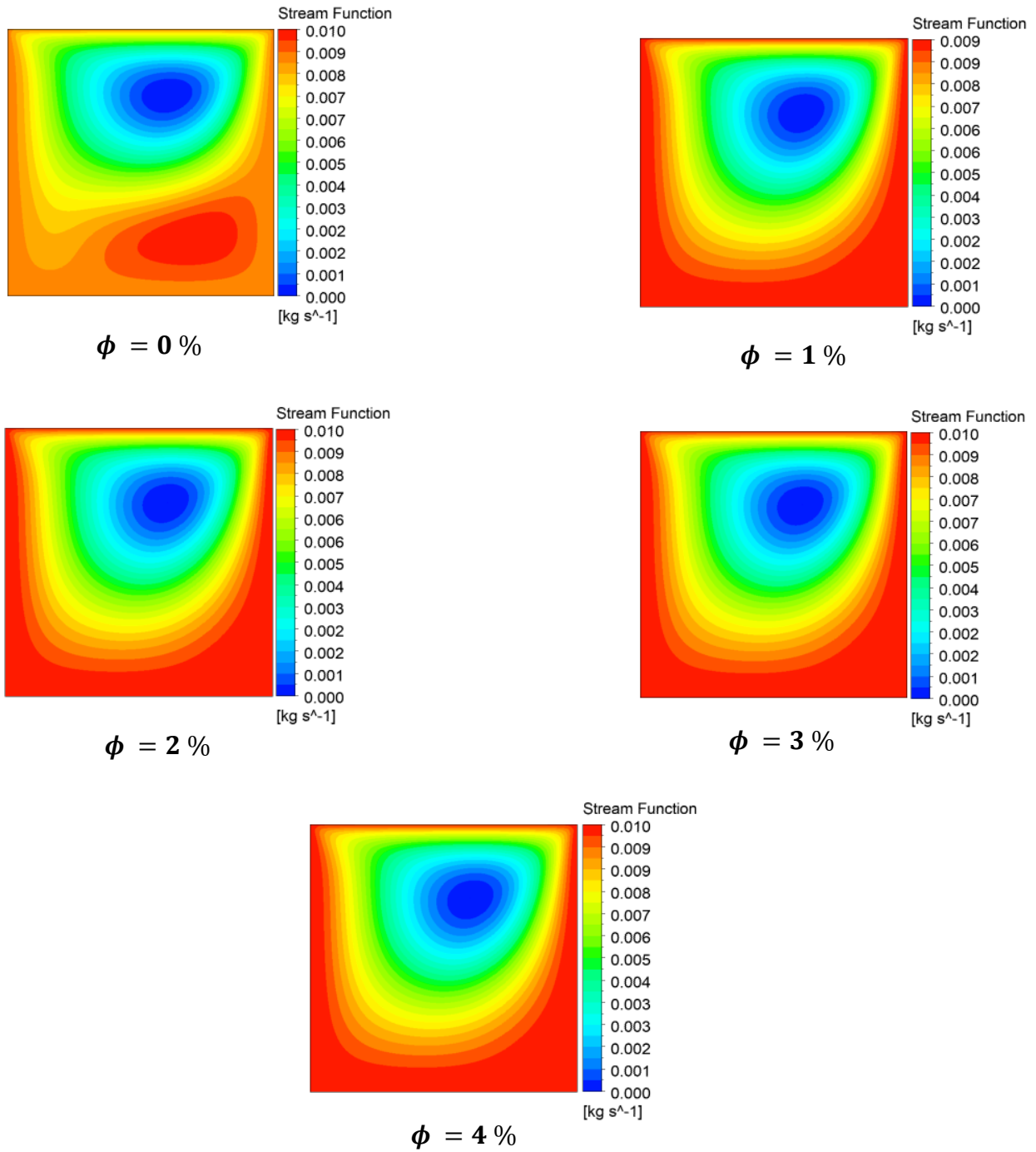


$\phi = 3 \%$



$\phi = 4 \%$

(a) : $Re = 2$



(b) : $Re = 100$

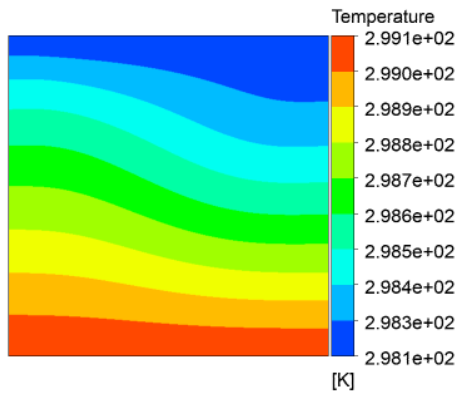
Figure III.2 : Effet de la fraction volumique des nanoparticules (Φ) sur les lignes de courant pour (a) : $Re = 2$ et (b) : $Re = 100$

III.3.2 Contours de température

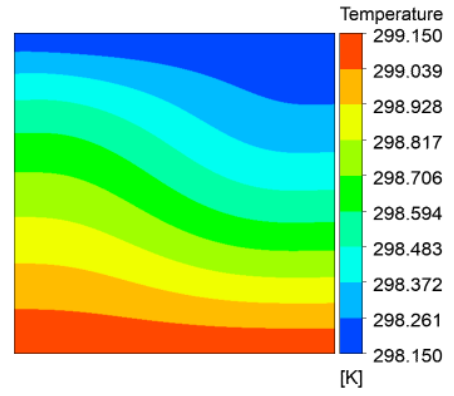
La figure (III.3) représente l'effet de la fraction volumique des nanoparticules Φ sur les contours de température pour deux nombres de Reynolds. On remarque pour le nombre de Reynolds $Re = 2$ les contours de température presque parallèles (distorsion faible), Cela montre que le transfert de chaleur se fait par conduction. Pour le nombre de Reynolds $Re = 100$, on remarque des distorsions très importantes de les contours de température, cela montre que le transfert de chaleur se fait par convection. On note aussi que les isothermes deviennent légèrement distorsées avec l'accroissement de la fraction volumique des nanoparticules, donc une amélioration de transfert de chaleur.

III.3.3 Nombre de Nusselt moyen

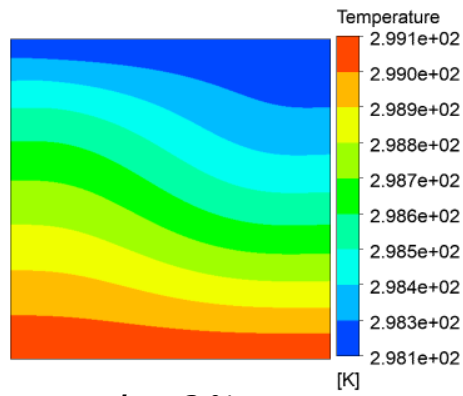
La figure (III.4) présente l'effet de la fraction volumique des nanoparticules sur le nombre de Nusselt moyen pour deux nombre de Reynolds. On constate que le nombre de Nusselt accroît avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules pour les deux cas, ce que contribue sur l'augmentation de la conductivité thermique et également un bon transfert de chaleur.



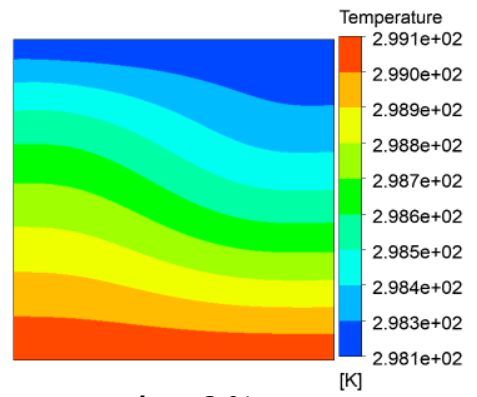
$\phi = 0\%$



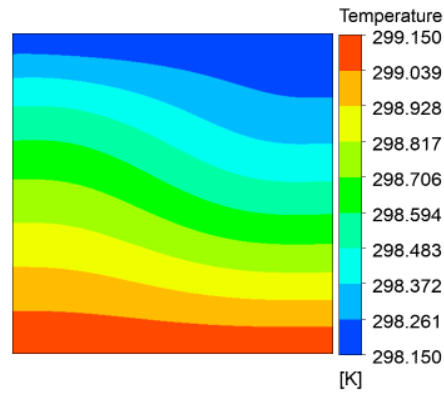
$\phi = 1\%$



$\phi = 2\%$

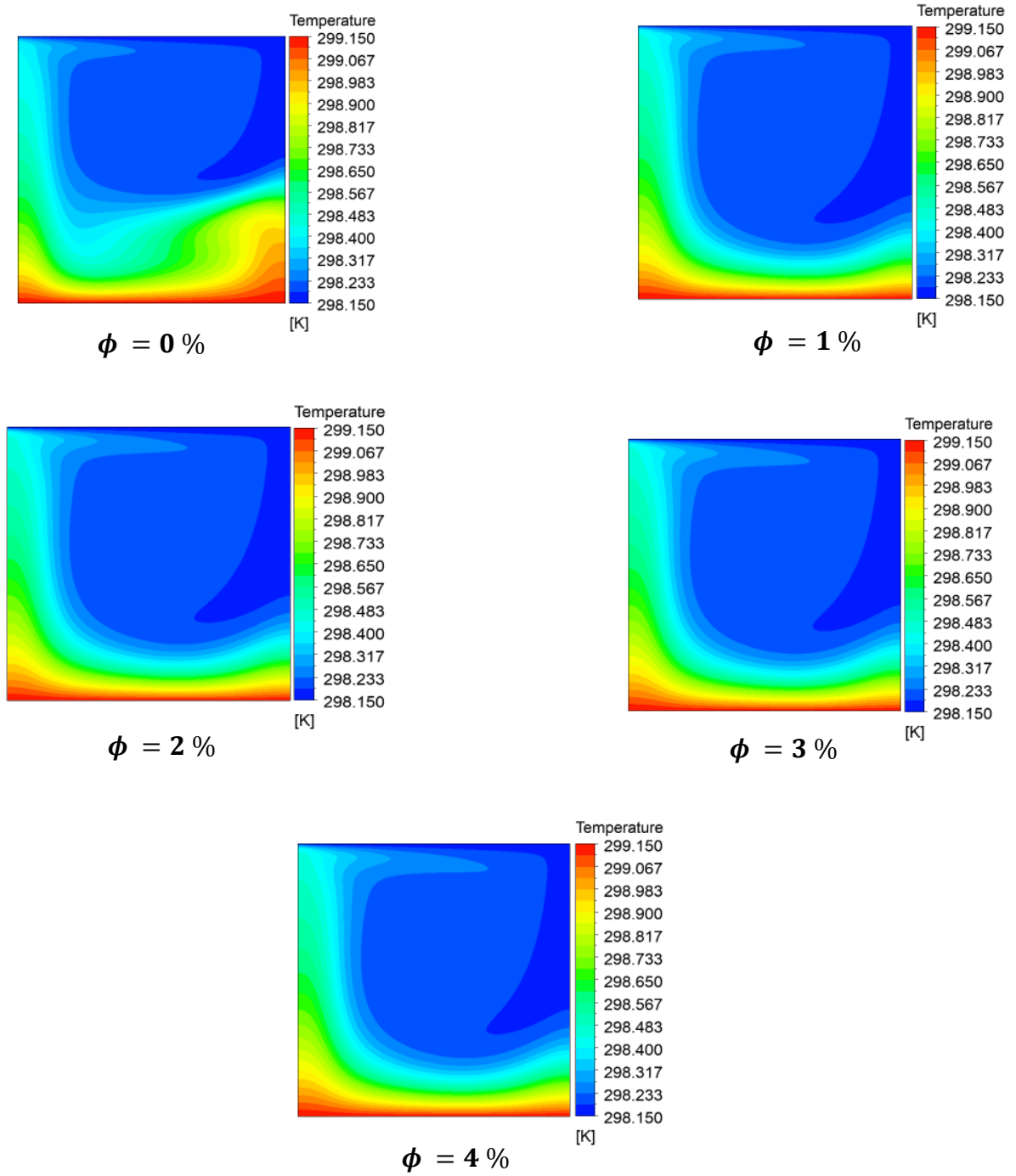


$\phi = 3\%$



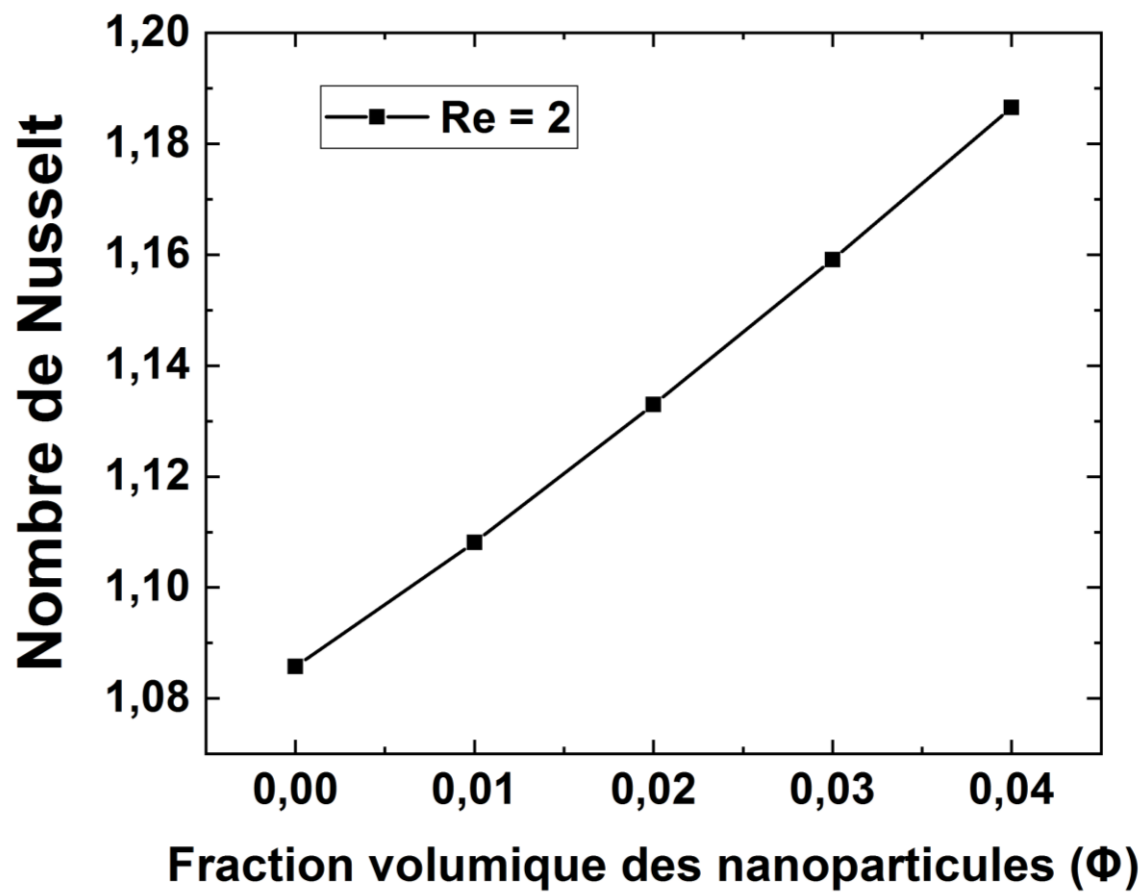
$\phi = 4\%$

(a) : $Re = 2$

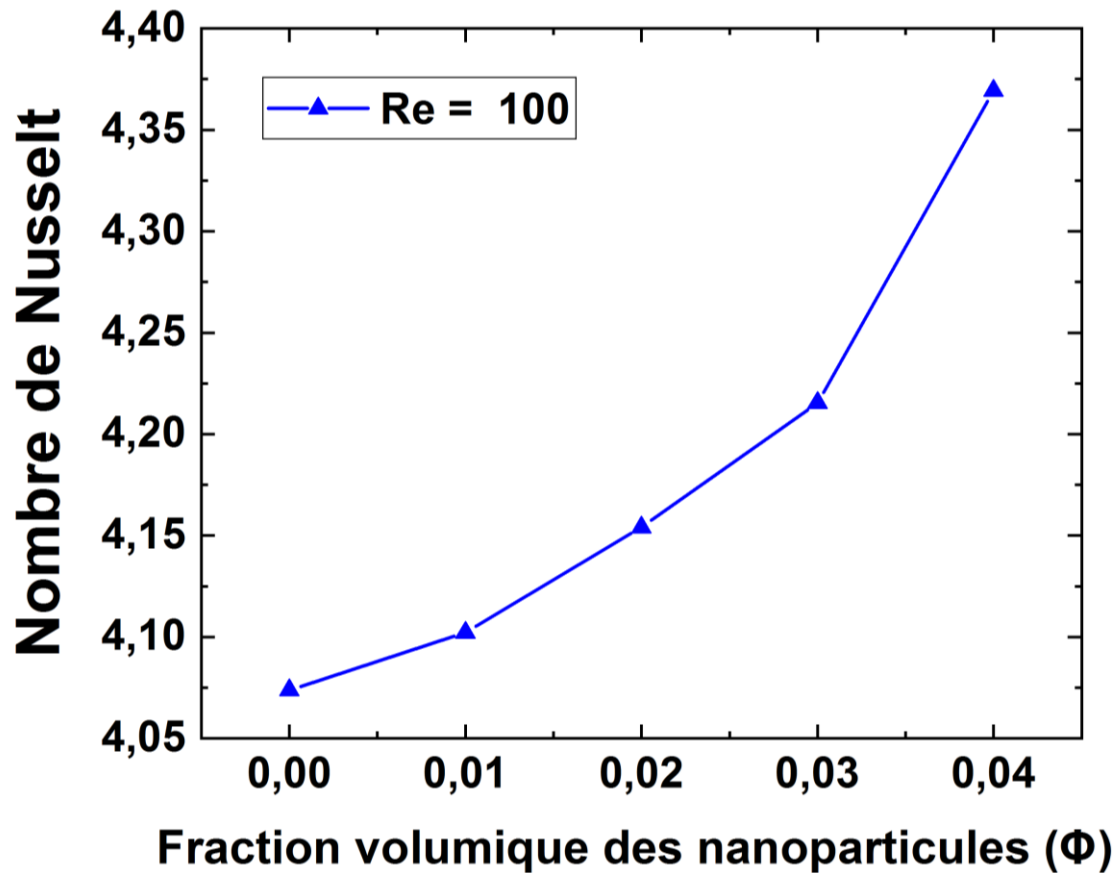


(b) : $Re = 100$

Figure III.3 : Effet de la fraction volumique des nanoparticules (Φ) sur les contours de température pour (a) : $Re = 2$ et (b) : $Re = 100$



(a)



(b)

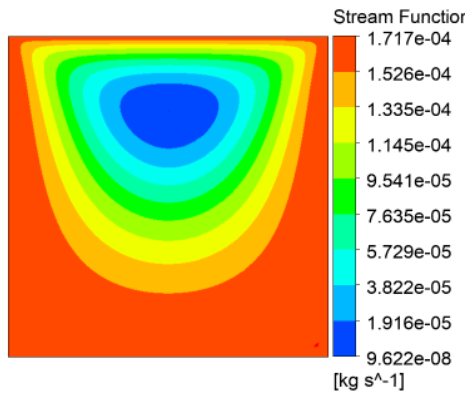
Figure III.4 : Effet de la fraction volumique des nanoparticules (Φ) sur le nombre de Nusselt moyen pour (a) : $Re = 2$ et (b) : $Re = 100$

III.4 EFFET DU NOMBRE DE REYNOLDS

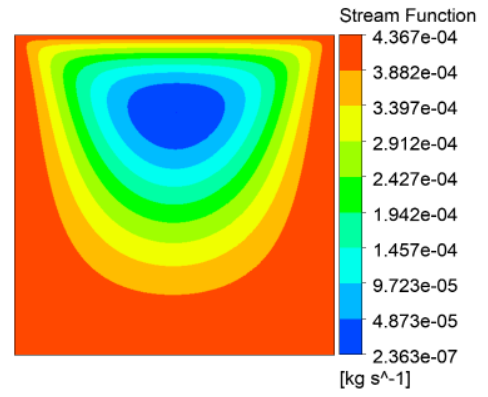
III.4.1 Les lignes de courant

La figure (III.5) illustre l'effet du nombre de Reynolds sur les lignes de courant. On remarque pour $\Phi = 0\%$ l'accroissement du nombre de Reynolds nous donne deux zones de recirculation. Par contre pour $\Phi = 4\%$, on observe

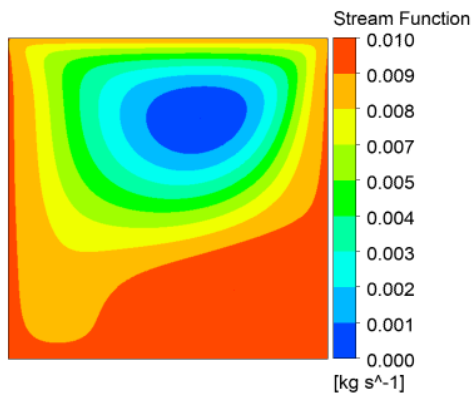
une seule zone de recirculation quel que soit la valeur du nombre de Reynolds, cette zone change avec l'augmentation du nombre de Reynolds.



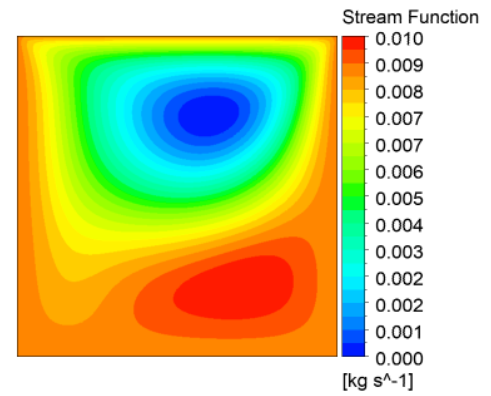
Re = 2



Re = 5

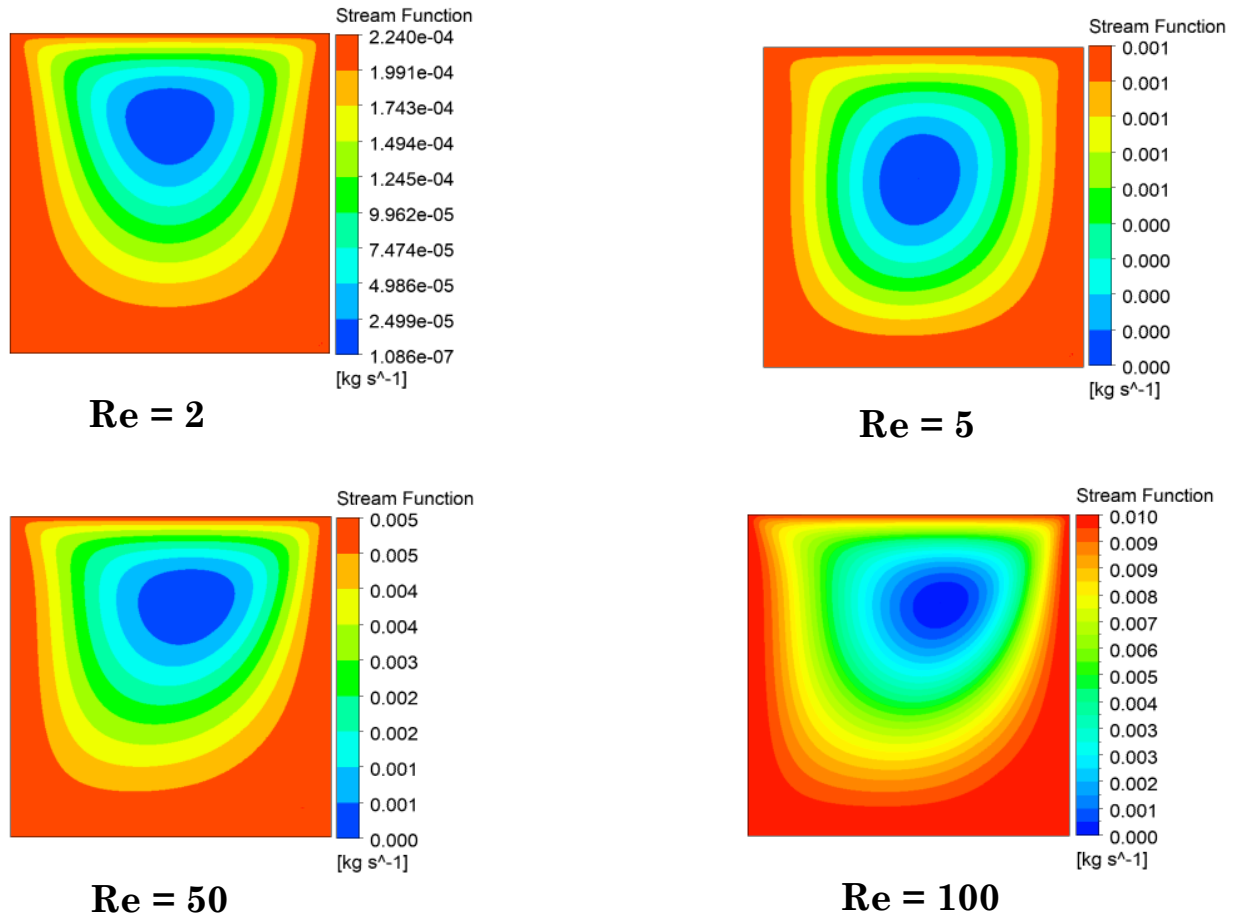


Re = 50



Re = 100

(a) : $\phi = 0\%$

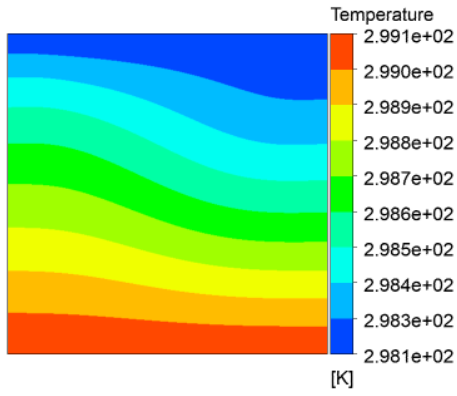


(b) : $\phi = 4\%$

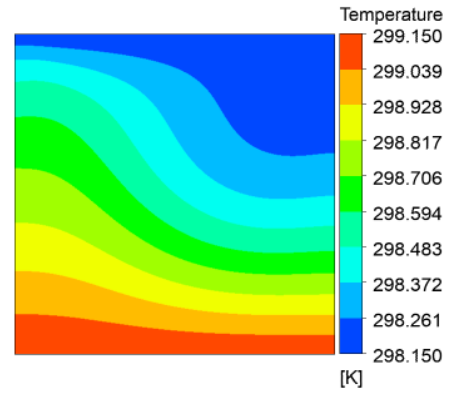
Figure III.5 : *Effet du nombre de Reynolds (Re) sur les lignes de courant pour (a) : $\phi = 0\%$ et (b) : $\phi = 4\%$*

III.4.2 Contours de température

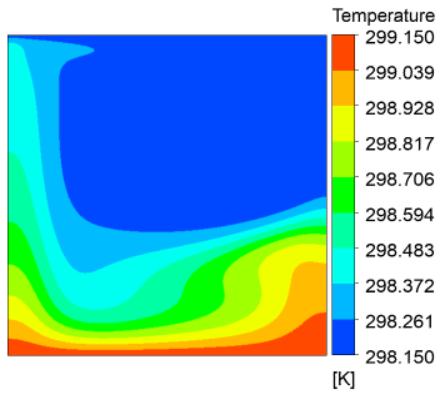
La figure (III.6) représente l'effet du nombre de Reynolds sur les contours de température. On remarque pour les deux cas les distorsions des isothermes deviennent très importantes avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Ceci traduit l'amélioration du transfert de chaleur.



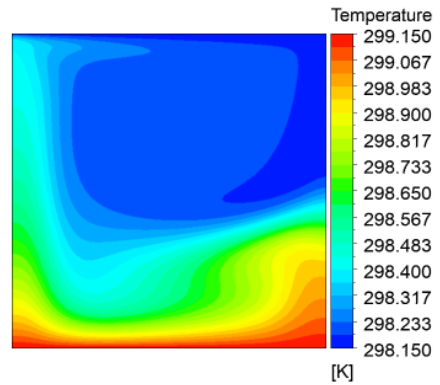
Re = 2



Re = 5



Re = 50



Re = 100

(a) : $\phi = 0\%$

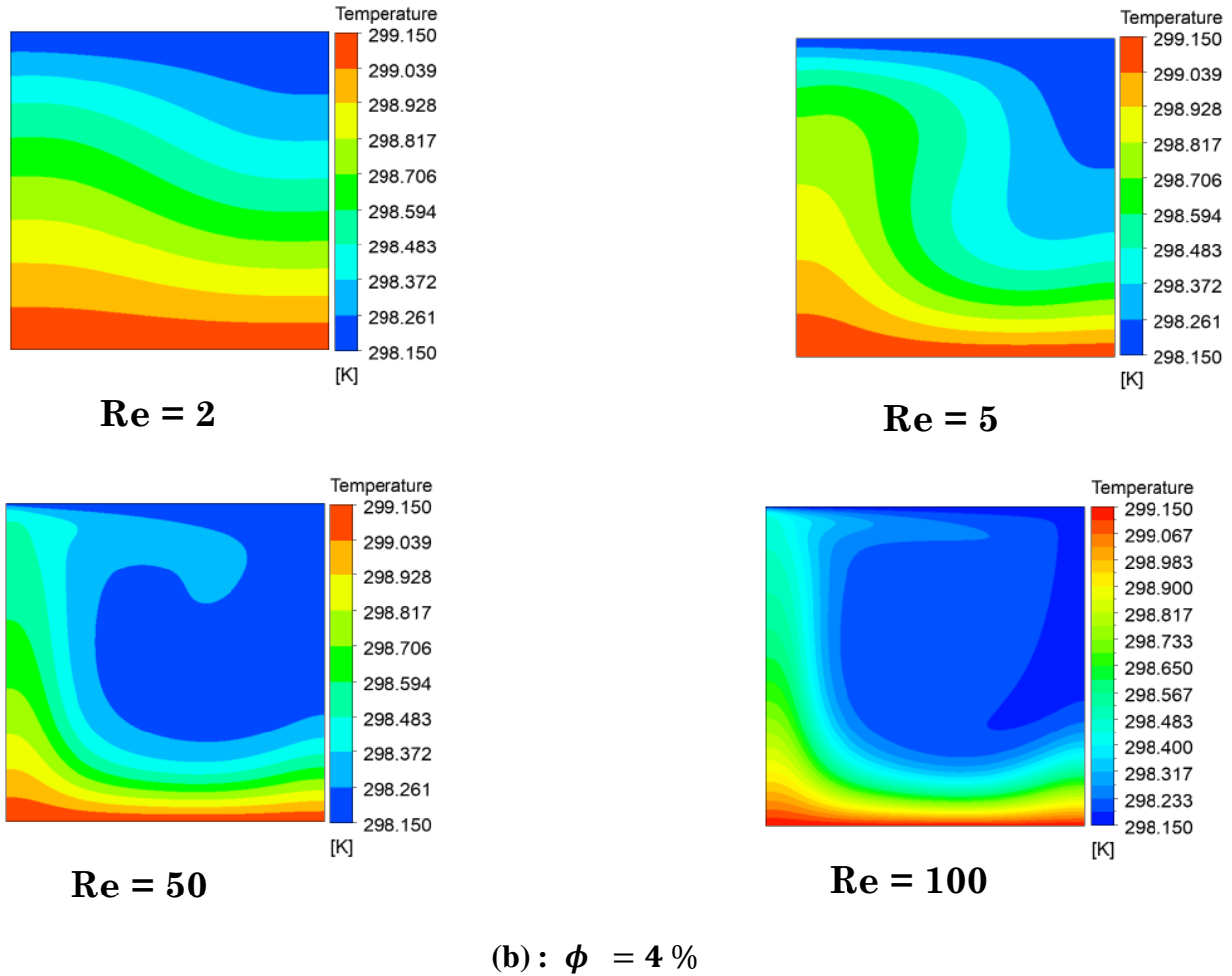
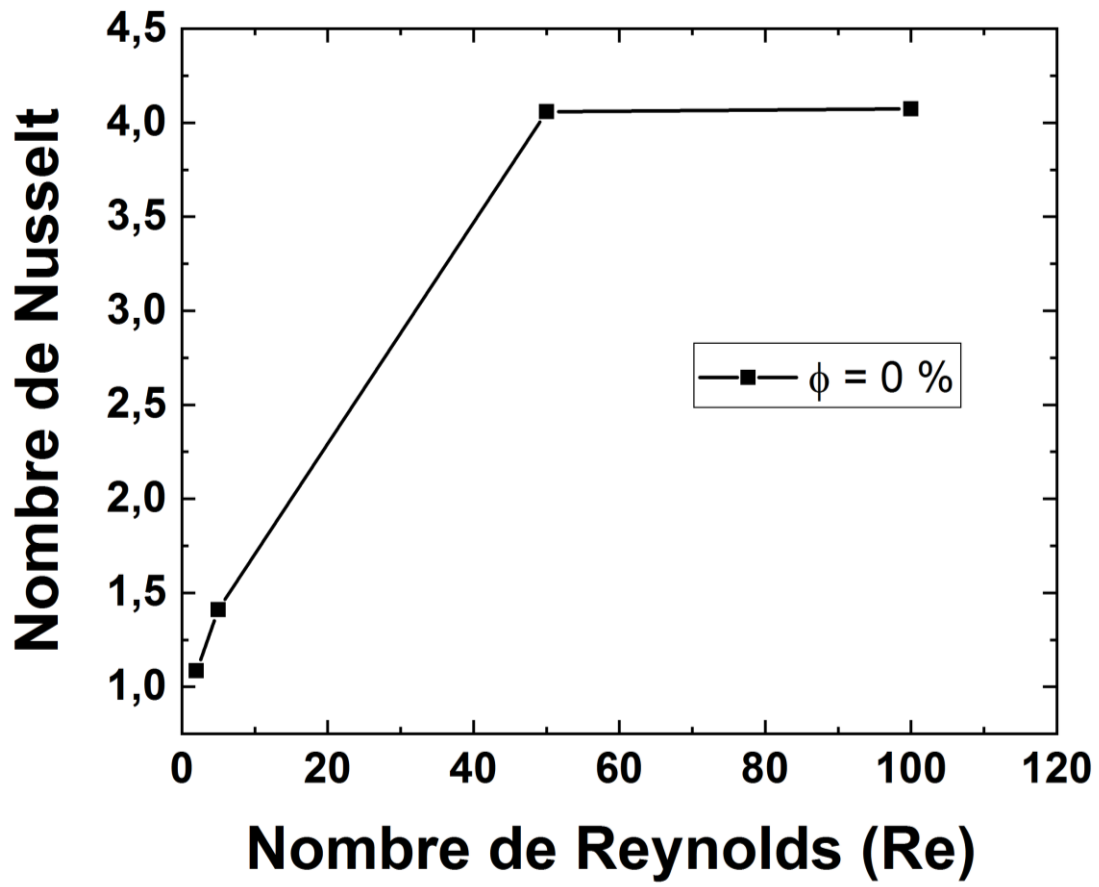


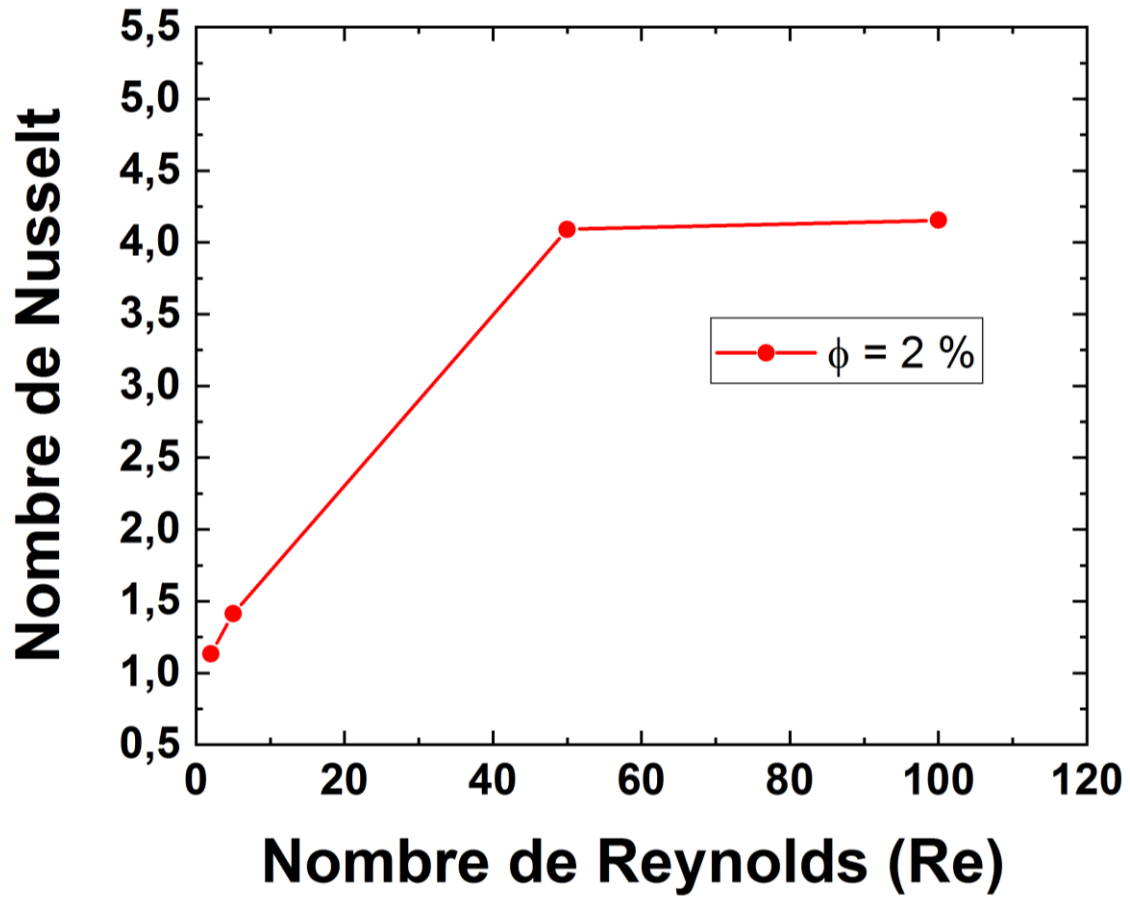
Figure III.6 : Effet de la fraction volumique (Φ) sur les contours de température pour (a) : $\phi = 0\%$ et (b) : $\phi = 4\%$

III.4.3 Nombre de Nusselt moyen

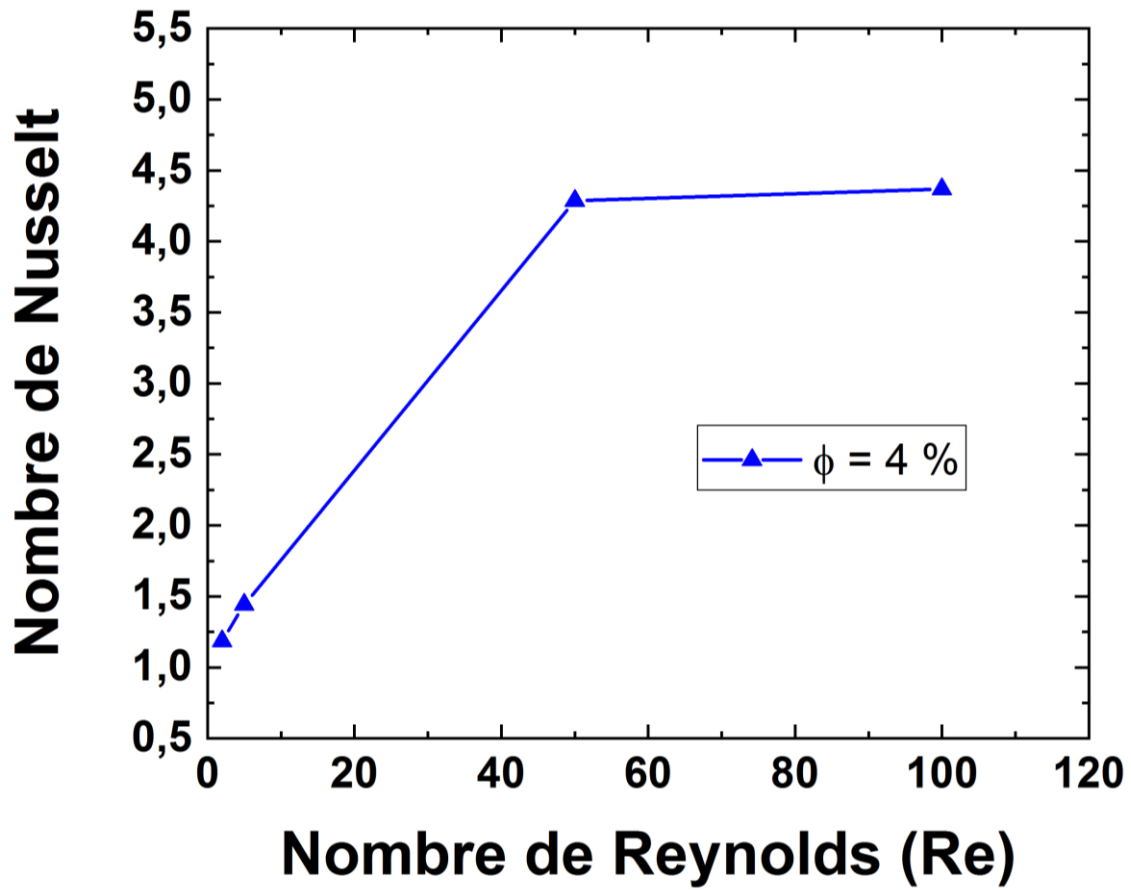
La figure (III.7) présente l'effet du nombre de Reynolds sur le nombre de Nusselt moyen pour différentes fraction volumique des nanoparticules. On constate que le nombre de Nusselt moyen accroît avec l'augmentation du nombre de Reynolds pour différentes fraction volumique des nanoparticules. Donc l'augmentation du nombre de Reynolds et la fraction volumique des nanoparticules améliore le transfert thermique.



(a)



(b)



(c)

Figure III.7 : Effet du nombre de Reynolds sur le nombre de Nusselt moyen pour (a) : $\phi = 0\%$, (b) $\phi = 2\%$ et (c) : $\phi = 4\%$

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons présenté une étude numérique du transfert de chaleur par convection mixte dans une cavité carrée bidimensionnelle remplie d'un nanofluide hybride ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu/Eau}$).

Le nanofluide hybride est Newtonien et incompressible avec des propriétés thermo-physiques constantes sauf dans le terme de gravité où l'hypothèse de Boussinesq a été adoptée. Logiciel Ansys Fluent a été utilisé pour résoudre le système d'équations gouvernant le problème. Les effets de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Reynolds sur les lignes de courant, les contours de température et le taux de transfert (nombre de Nusselt) ont été examinés.

Les résultats ont été obtenus pour un nombre de Richardson $Ri = 1$, le nombre de Reynolds (Re) varie de 2 jusqu'à 100, et la fraction volumique des nanoparticules ($\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$) varie de 0% à 4%.

Les résultats principaux se résument comme suit :

- ✓ L'augmentation du nombre de Reynolds a un effet sur la structure de l'écoulement.
- ✓ Les distorsions des isothermes deviennent plus importantes avec l'accroissement du nombre de Reynolds.
- ✓ Le taux de transfert de chaleur (nombre de Nusselt) augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds.
- ✓ L'augmentation de la fraction volumique de nanoparticules (Φ) favorise le transfert thermique.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERNENCE BIBILIOGRAPHIQUES

- [1] Fourier, J. Théorie Analytique de la Chaleur. Paris: Chez Firmin Didot. (1822).
- [2] Dr.Nebali.A. Cours TDM. Département de Genie mécanique (UMMTO), 2013.
- [3] E.E. (Stathis) Michaelides, Nanofluidics: Thermodynamic and Transport Properties, Springer International Publishing Switzerland. 2014.
- [4] Sarit K .Das, Stephen U.S. Choi, Wenhua Yu. Nanofluids Science and Technology.WILEY, (2007).
- [5] Soufi E., H., Application des Nanofluide pour le refroidissement : étude d'un cas d'une géométrie simple, Thèse de Master en Génie Chimique, Université Kasdi Merbah d'Orugla, (2013).
- [6] Pak, B. C. and Cho, Y.I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, 11(2), pp.151-170, (1998).
- [7] Xuan, Y. and Roetzel, W. Conception for heat transfer correlation of nanofluids, *International Jouranal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), pp.3701-3707 , (2000).
- [8] Maxwell, C. A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford University Press, Cambridge, UK, (1904).
- [9] Hamilton, R. L. and Crosser, O.K. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3)pp.187-191, (1962).

- [10] Site web: <https://fr.lambdageeks.com/nanofluid/>
- [11] Einstein, A. Investigations on the Theory of Brownian movement. Dover Publication, New Yor, (1956).
- [12] Brinkman, H C. The viscosity of concentrated suspensions and solution, J.Chem. Phys., 20, pp.571-581, (1952).
- [13] Cebeci T., Bradshaw P. (1984) Physical and computational aspects of convective heat transfer, Springer –Verlag, New York.
- [14] GHADBANE Abdelouahab,' Etude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluide dans un échangeur de chaleur', Université de M'sila, (2019).
- [15] Eiyad Abu-Nada , Hakan F. Oztop, Effects of inclination angle on natural convection in enclosures filled with Cu–water nanofluid, International Journal of Heat and Fluid Flow 30, pp. 669–678,(2009).
- [16] Site web :<https://www.fr.m.wikipedia.org/wiki/convection>.
- [17] Suriya Uma Devi. S and S.P. Anjali Devi. Numerical Investigation on Three Dimensional Hybrid Cu u Al₂O₃/Water Nanofluid Flow over a Stretching Sheet with Effecting Lorentz Force Subject to Newtonian Heating. Department of Applied Mathematics, Bharathiar University, Coimbatore 641 046, India, (2016)
- [18] S. Suresh, K.P. Venkitaraj, P. Selvakumar, M.Chandrasekar, Synthesis of Al₂O₃–Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 388 41–48, (2011).

- [19] Ayad S. Abedalh , Zaid A. Shaalan , Husam Naufal Saleh Yassien, Mixed convective of hybrid nanofluids flow in a backward-facing step Case Studies in Thermal Engineering 25 100868, (2021).
- [20] Nur Syazana Anuar, Norfifah Bachok, Ioan Pop, Influence of buoyancy force on Ag-MgO/water hybrid nanofluid flow in an inclined permeable stretching/shrinking sheet, International Communications in Heat and Mass Transfer 123 105236 , (2021).
- [21] Abdolreza Moghadassi, Ehsan Ghomi, Fahime Parvizian, A numerical study of water based Al_2O_3 and Al_2O_3 -Cu hybrid nanofluid effect on forced convective heat transfer, International Journal of Thermal Sciences 92 50-57, (2015).
- [22] M. A. Mansour et al., Effects of heat source and sink on entropy generation and MHD natural convection of A Al_2O_3 -Cu/water hybrid nanofluid filled with square porous cavity, Thermal Science and Engineering Progress (2017).