

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT PHYSIQUE
N° : Ph/ENR/10/2022



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique Énergétique et
Energie renouvelable

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par:
BENGUEZZOU Djouhaina
SEHAIM Sohaib

Intitulé

Étude de la convection mixte dans une cavité en
présence d'un Hybride et Nano-Fluide

Soutenu le 16/ 06 /2022 devant le jury composé de:

NAHOUI Azzeddine	Université de M'sila	Président
BENDERRADJI Razik	Université de M'sila	Rapporteur
BRAHIMI Meryem	Université de M'sila	Co-Rapporteur
BOULECHFAR Hichem	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions **Dieu** pour le courage et la volonté sans lesquels cette étude n'aurait jamais vu le jour.

Nos vifs remerciements vont à nos très chers parents pour leurs efforts fournis et leurs conseils pendant toute ces années d'études.

D'abord nous tenons à exprimer toutes nos gratitude à notre encadreur **Dr. BENDERRADJI Razik** pour son inestimable aide et sa disponibilité, sa gentillesse et ces conseils judicieux tout au long de ce travail. , qui sans sa méthodologie, ses orientations et ses conseils précieux, n'aurait pas été accompli, sans oublier **Dr. Brahimi** pour son aide et son temps et ses efforts.

Nos vifs remerciements vont également aux Membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos remerciements les plus vifs au **Dr. NAHOUI Azzeddine**, pour avoir accepté de présider le jury, nous tenons à exprimer nos remerciements au **Dr. BOULECHFAR Hichem**, d'avoir accepté de juger et d'examiner ce travail.

Et enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

Ames chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien leur Encouragement.

Mes frères et mes sœurs.

Toute ma famille.

Toutes mes amies.

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du
secondaire ou de L'enseignement supérieur.*

La promotion de master 2 physique énergétique, énergie renouvelable, de

L'année universitaire 2021-2022 de M'sila.

Sohaib

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- ❖ *A mon cher père Mourad, et ma chère mère. qui m'ont éclairés le chemin en me donnant la main tout au long de mes années d'étude. Toutes les expressions de gratitude ne remplissent pas leur droit «Que dieu me les gardes».*
- ❖ *Mes frères« Saïd et anas» et mes sœurs*
- ❖ *Mon très cher grand-père , Ma très chère grand-mère.*
- ❖ *A tout ma famille, surtout ma tante marwa*
- ❖ *Toutes mes amies. Surtout Meryem et le staff administratif et pédagogique du département de physique*
- ❖ *Notre honorable professeur Dr. Benderradji Razik .A tous mes professeurs depuis mes premières années d'études.*
- ❖ *A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité*

La promotion de master 2 physique énergétique, énergie renouvelable, de l'année universitaire 2021-2022 de M'sila ;

Djoughaina

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Table des matières

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale

Chapitre i : généralité et revue bibliographiques

I.1. Introduction.....	4
I.2. Les Modes de transfert thermique.....	4
I.2.1. La Conduction.....	4
I.2.2. Rayonnement.....	5
I.2.3. La Convection :.....	6
I.3. Les Différents types de convection.....	7
I.4. Nano-fluide.....	9
I.4.1. Définition d'un nano-fluide.....	9
I.4.2. Définition des nanoparticules.....	10
I.4.3. Préparation de nanofluides.....	11
I.4.4. Propriétés thermo physiques des nanofluides.....	13
I.4.4.1. La fraction volumique.....	13
I.4.4.2. La Masse volumique :.....	13
I.4.4.3. Coefficient d'expansion thermique.....	14
I.4.4.4. La Chaleur spécifique.....	14
I.4.4.5. La viscosité dynamique.....	15
I.4.4.6. La conductivité thermique.....	16
I.5. Nanofluides hybrides.....	17
I.5.1. Propriétés thermo physiques des nanofluides hybrides.....	17
I.6. Les applications de nanofluide.....	18
I.7. Synthèse bibliographique.....	21

Chapitre II Modélisation et formulation mathématique

II.1. Introduction.....	39
II.2. Description du problème.....	39
II.3. Elément mathématique de base.....	40

II.3.1 Equation de continuité.....	40
II.3.2 Equation de quantité de mouvement	40
II.3.3. Equation de conservation d'énergie	40
II.4. Les hypothèses simplificatrices	41
II.5. Formulation des équations de problème (pour un nanofluide)	42
II.5.1. Equation de continuité.....	42
II.5.2. Equationsde quantité de mouvement (ou équation de Navier – Stokes).....	42
II.5.3.Equation de l'énergie	42
II.6. Les conditions aux limites	43
II.7:La forme adimensionnelle des équations des model mathématique.....	43
II. 7. 1. Grandeurs caractéristiques	43
II.7.2. Nombres adimensionnels	44
II.7.3.Les variables adimensionnelles.....	46
II.8. les conditions aux limites adimensionnelles	49
II.9.Modèle Numérique	50
II.9.1Procédure Numérique.....	50
II.9.2 Maillage.....	51
II.9.3 Présentation de GAMBIT et de FLUNET	53
<i>Chapitre III : Résultats et discussion</i>	
III.1. Introduction	57
III.2. Choix du maillage.....	58
III.3. Validation des résultats.....	58
III.3. Discussion des résultats	59
III.3.1. Effet du nombre de Richardson (Ri).....	59
III.3.2. Effet de types des nanoparticules.....	66
III.3.3. Effet de concentration des nanoparticules	70
III.4. conclusion.....	72
<i>Conclusion générale</i>	
<i>Références</i>	
<i>Résumés</i>	

Nomenclature

Symboles Latins

C_p : la chaleur massique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

C_{p_f} : la chaleur massique de fluide ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

C_{p_s} : la chaleur massique de fluide ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

C_{p_{nf}} : la chaleur massique de nanofluide fluide ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

C_{p_{nfh}} : la chaleur massique de nanofluide fluide hybride ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

G : Accélération de la pesanteur (m.s^{-2})

h : le coefficient d'échange par convection ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

k : La conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

k_f : La conductivité thermique du fluide de base ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

k_p : La conductivité thermique des particules solides ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

k_{nf} : La conductivité thermique de nanofluide ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

k_{nfh} : La conductivité thermique de nanofluide hybride ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

H : dimension caractéristique (m)

L : Longueur de cavité (m)

n : est un facteur de forme empirique

M : Emissance (W/m^2).

m : La masse (Kg)

p : pression du fluide (Pa)

P : pression adimensionnelle

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

T : La température (0 C) ou (K)

T_c : La température de paroi chaude

T_f : La température de paroi froide

t : Temps (s)

q : Puissance volumique dissipée

F : Force par unité de volume.

$\frac{dT}{dx}$:Gradient de température ($K .m^{-1}$).

dt :le temps caractéristique élémentaire (s)

V_p :volume des particules solides(m^3)

dQ :La quantité de chaleur élémentaire (J).

V_0 :vitesse caractéristique.

V_T : volume totale (m^3)

X, Y :Coordonnées cartésiennes

e, w, n, s : Faces du volume de contrôle est, ouest, nord, sud respectivement.

E, W, N, S :Nœuds des volumes de contrôle adjacents est, ouest, nord, sud respectivement

Symbole grecs

α : la diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$).

α_{nf} :La diffusivité thermique de nanofluide.

β :coefficient d'expansion thermique (K^{-1}).

β_p :coefficient d'expansion thermique de nanoparticule (K^{-1}).

β_f :coefficient d'expansion thermique de fluide (K^{-1}).

β_{nf} :coefficient d'expansion thermique de nanofluide (K^{-1}).

β_{nfh} :coefficient d'expansion thermique de nanofluide hybride (K^{-1}).

ϕ : La fraction volumique

μ : La viscosité dynamique ($N.s.m^{-2}$).

μ_f :La viscosité dynamique du fluide de base

μ_{nf} :La viscosité dynamique du nanofluide.

μ_{nfh} :La viscosité dynamique du nanofluide.

ν : Viscosité cinématique du fluide [m^2/s]

ρ_f :Masse volumique du fluide

ρ_s :Masse volumique de la nanoparticule.

ρ_{nf} :Masse volumique du nanofluide.

ρ_{nfh} :Masse volumique du fluide

ρ_0 : La masse volumique du fluide

λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Φ : Flux de chaleur (W)

Ψ : Le modèle de Hamilton et Crosser

θ : Variable adimensionnelle de la température

Indice :

C : chaude

f : Froid

f : Fluide de base

nf : Nanofluide.

nfh Nanofluide hybride

S : Particules solide.

Nombre adimensionnel :

Ri : Nombre de Richardson

Pr : Nombre de Prandtl

Ra : Nombre de Rayleigh

Re : Nombre de Reynolds

Gr : Nombre de Grashof

Nu : Nombre de Nusselt local

Nu_m : Nombre de Nusselt moyen

Exposants :

* Paramètre estimé.

' Paramètre Corrigé.

+ Paramètre adimensionnel.

Liste des figures

N° de la figure	Titre de la figure	page
Figure I.1	<i>Transfert thermique par conduction à travers une barre</i>	5
Figure I.2	<i>La chaleur du soleil transmise par rayonnement</i>	6
Figure. I.3	<i>Action de fluide en mouvement dans la convection</i>	8
Figure. I.4	<i>Principe physique de la convection naturelle</i>	7
Figure. I.5	<i>Nano-fluides vue au microscope électronique : éthylène glycol/ cuivre à 0,5 %, eau/alumine, eau/or à 2 nm, Bang et Chang (2005)</i>	9
Figure. I.5	<i>nanotube de carbone</i>	10
Figure. I.6	<i>nanoparticules d'Argent</i>	10
Figure. II.1	<i>Géométrie de la cavité carrée ouverte</i>	39
Figure. II.2	<i>Conditions aux limites</i>	43
Figure. II.3	<i>Condition aux limites</i>	50
Figure. II.4	<i>Représentation d'un volume de contrôle bidimensionnel</i>	51
Figure II.5	<i>Schéma du maillage</i>	52
Figure II.6	<i>Le maillage utilisé</i>	52
Figure II.7	<i>Evolution de résidu</i>	53
Figure II.8	<i>L'interface de Gambit</i>	54
Figure II.9	<i>l'interface de Fluent</i>	55
Figure III.1	<i>Convergence du nombre de Nusselt moyen le long de la partie chauffée pour $Ri=0.1$ (nano-fluide Cu-eau ($\phi = 5\%$))</i>	58
Figure III.2	<i>Comparaison de la variation du Nusselt moyen au niveau de la paroi chaude</i>	59
Figure III.3	<i>Les contours des Isothermes du (Ag/Cu-Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri) et différents fraction volumiques</i>	61
Figure III.4	<i>Les contours des Isothermes du (Ag/Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri) et différents fraction volumiques</i>	62
Figure III.5	<i>Profil de la température le long de différents altitude de l'enceinte du (Ag/Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri). A ($x= 0.25H$), B ($x= 0.5H$) et C ($x= 0.75H$)</i>	62
Figure III.6	<i>Profil de la température le long de la section médiane de l'enceinte($x= 0.5H$).du (Ag/Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri)</i>	63
Figure III.7	<i>Les contours des lignes de courant dans l'enceinte du (Ag/Cu-Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri) et différents fraction volumiques</i>	64
Figure III.8	<i>Les contours des lignes de courant dans l'enceinte du (Ag/Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri) et différents fraction volumiques</i>	65
Figure.III.9	<i>Profil des vitesses transversales le long de l'axe (Y) de l'enceinte pour différents nombres de Richardson et différents position</i>	66
Figure.III.10	<i>Profil des vitesses longitudinales le long de l'axe (x) de l'enceinte pour différents nombres de Richardson et différents position ($y = 0.5 H$, $y = 0.25 H$ et $y = 0.75 H$)</i>	66
Figure III.11	<i>Variation du nombre de Nusselt moyen pour les différents nombre de Richardson Ri. ($\phi = 2\%$)</i>	67
Figure III.12	<i>Variation du nombre de Nusselt moyen pour les différents nombre de Richardson Ri. ($\phi = 4\%$)</i>	68

Figure III.13	<i>Variation du nombre de Nusselt moyen pour les différents nombre de Richardson Ri. ($\varphi = 8\%$)</i>	68
Figure III.14	<i>Variation du nombre de Nusselt local pour les différents types des Nanoparticules. Nombre de Richardson $Ri=0.1$, ($\varphi = 8\%$)</i>	69
Figure III.15	<i>Variation du nombre de Nusselt moyen pour les différents nombre de Richardson et les fractions volumiques. (Cu/Eau)</i>	70
Figure.III.16	<i>Profil des vitesses transversales le long de l'axe (Y) de l'enceinte pour différents fraction volumique à $x = 0.5 H$. $Ri = 0.1$</i>	71
Figure.III.17	<i>Profil des vitesses transversales le long de l'axe (Y) de l'enceinte pour différents fraction volumique à $x = 0.5 H$. $Ri = 10$</i>	72

La liste des tableaux

N° de tableau	Titre de tableau	Page
Tableau. I.1	<i>Les propriétés thermo-physiques de différents matériaux</i>	11
Tableau. II.1	<i>Conditions aux limites hydrodynamiques et thermiques</i>	49

Introduction générale

Le transfert de chaleur peut jouer un rôle important dans divers processus industriels. L'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermophysiques 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.

Récemment, des progrès importants se font dans un domaine de recherche fascinant de la physique : c'est la nanophysique qui brasse un large éventail de la physique, la nanophysique connaît un développement à l'échelle du nanomatériau et de la nanotechnologie. Les nanoparticules représentent aujourd'hui un enjeu technologique et économique majeur. Elles permettent des innovations très prometteuses dans de nombreux domaines fondamentaux tels que : la santé, l'énergétique et l'industrie... Les nanofluides tiennent déjà une place privilégiée concernant à titre d'exemple des fluides traditionnels (Eau, Éthylène glycol, etc.....).

L'objectif de notre étude consiste à étudier numériquement de l'écoulement laminaire stationnaire par convection mixte dans une cavité carrée ventilée contenant un cylindre froid T_f au centre et deux portes (Orifices) d'entrée et de sortie de l'écoulement. remplit le cas de fluide pur l'eau, et des mélanges de ce fluide de base et des nanoparticules (nano-fluide et nano-fluide hybride) (**Ag, Cu, Al₂O₃ et TiO₂**). chauffée isothermiquement par le bas par une source de chaleur (La source est maintenue la paroi inférieure à température constante), tandis que les autres parois sont maintenues adiabatiques, pour un nombre de Reynolds (Re) fixé à **Re = 100**, et le nombre de Grashof (Gr) varie de telle sorte que le nombre de Richardson prend les valeurs : $Ri = 0.1, 1, 10$ et 100 . L'effet de variation du nombre de Richardson et les fractions volumique des nanoparticules qui comprise entre (0% et 8%) a été également examiné profondément, Les équations qui régissent ont été résolues numériquement via la méthode des volumes finis.

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.

Dans le deuxième chapitre nous nous décrivons et formulons le modèle physique, mathématique et les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées, ainsi que la formulation numérique.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les principaux résultats numériques de cette simulation ou nous avons étudié l'effet du maillage, validation de nous résultats ainsi que leurs interprétations et analyse.

Enfin, une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus, est donnée à la fin de ce mémoire.

Chapitre I

Généralité et revue bibliographiques

I.1. Introduction

Le transfert thermique est la science qui tente à prédire la transmission de l'énergie entre les molécules ou les particules de la matière à différentes températures. Il est régi par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques déduites de l'expérimentation. Ce processus se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz...etc.) ou domestique (chauffage de l'habitat). Dans la littérature relative à cette discipline, on reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. [1]

L'amélioration du transfert de chaleur par convection est l'objet principal de plusieurs travaux, et pour se faire, un grand nombre de chercheurs ont mené une multitude d'essais numériques et expérimentaux portant sur la description des phénomènes géométriques gérant la convection, l'effet de la nature des systèmes dans lesquels elle a lieu (géométrie spécialement), et les propriétés des fluides impliqués (propriétés physico-chimiques). Ces Travaux n'ont touché que l'ordre macroscopique ou parfois microscopique du processus. Mais avec l'apparition et le développement rapide des nanosciences et nanotechnologies pendant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, la convection a pris une grande part de cette nouvelle richesse, et a pris un autre aspect de perfectionnement : c'est au niveau nanométrique de la matière du milieu convectif que les récents travaux ont été concentrés.

Les nanofluides sont alors l'un des fruits d'une telle richesse. Dotés de propriétés physico-chimiques particulières et intéressantes telle que leur importante conductivité thermique, les nanofluides offrent un coefficient de transfert thermique imbattable par les autres caloporteurs. Les études menées dans cette nouvelle direction ont fourni une riche bibliographie, mais très variée : bien qu'en majorité ils sont assez positifs.

I.2. Les Modes de transfert thermique

I.2.1. La Conduction

La conduction est le seul mécanisme qui participe au transfert de chaleur dans des solides uniformes, opaques et denses, Par conséquent, nous comprenons intuitivement que la conduction a une origine microscopique.

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. On définit le flux thermique de base $d\Phi$ Par exemple, la chaleur transférée par unité de temps, écrite comme :

$$\phi = \frac{dQ}{dt} = - \lambda S \frac{dT}{dx}$$

I.1

ϕ Le flux de chaleur en watt (W).

λ Conductivité thermique du milieu ($W .m^{-1}.K^{-1}$).

S Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

$\frac{dT}{dx}$ Gradient de température ($K .m^{-1}$).

dQ La quantité de chaleur élémentaire (J).

dt Le temps caractéristique élémentaire (s)

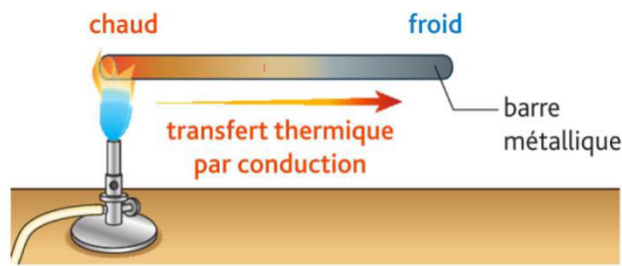


Figure I.1 : Transfert thermique par conduction à travers une barre [2].

I.2.2. Rayonnement

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus froid ; les deux corps ne se touchent pas, mais ils sont séparés par un milieu transparent tel l'air, ou le vide. Il s'agit d'un rayonnement électromagnétique, mais limité aux longueurs d'onde du "rayonnement thermique", dont l'absorption par certains corps à la propriété de transformer (en ou en partie) "l'énergie radiante" en chaleur, ou plus exactement, en énergie calorifique. Le rayonnement thermique est émis continuellement par tous les corps dans toutes les directions et à la vitesse de la lumière (dans le vide).

Le rayonnement thermique et la lumière peuvent être considérés comme des cas particuliers du rayonnement électromagnétique ; ils sont caractérisés par leurs longueurs

d'onde. L'exemple du rayonnement thermique le plus simple est celui du soleil L'équation de Stefan-Boltzmann qui permet de calculer le flux de chaleur transmis par rayonnement est:

$$\phi(w) = M \cdot S = \sigma \cdot T^4 \cdot S \quad \text{I.2}$$

Sachant que :

ϕ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W) $\sigma = 5,67.10^{-8}$ est la constante de Stefan-Boltzmann $[W / (m^2.k^4)]$

M : Emission (W / m²) .

T : Température absolue (K)

S : Surface (m²)

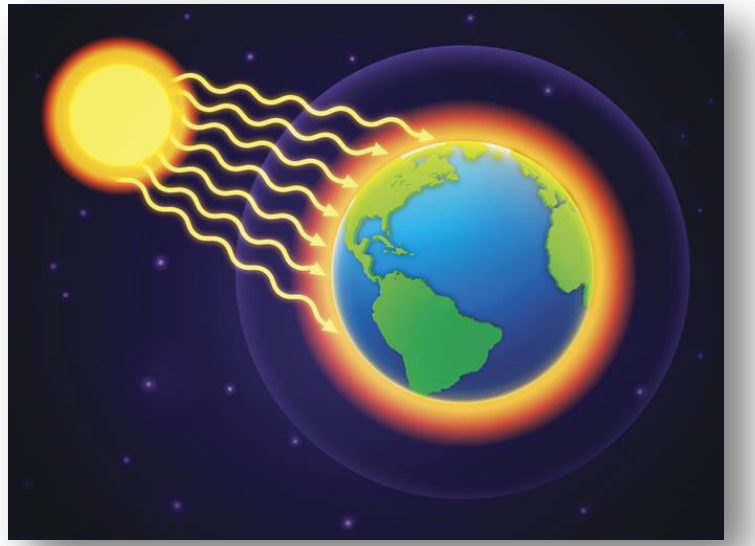


Figure I.2: La chaleur du soleil transmise par rayonnement [3].

I.2.3. La Convection :

La convection est un mode de transfert de chaleur qui se produit uniquement au sein des milieux fluides. Elle apparaît lorsqu'un fluide, liquide ou gaz, est en mouvement et présente des inhomogénéités spatiales de température. La convection intervient en particulier dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide en mouvement. Alors que la conduction peut être considérée comme un transfert d'énergie par des mouvements microscopiques, la convection est un transfert d'énergie dû à des mouvements macroscopiques .On a l'habitude de distinguer trois formes de convection :

- La convection naturelle ;
- La convection forcée ;
- La convection mixte.

La puissance transférée par convection est donnée par la relation :

$$\phi = hS(T_s - T_a) \quad \text{I.3}$$

Avec :

ϕ : Flux de chaleur transmis par convection (W).

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

T_s : Température de surface du solide ($^{\circ}K$).

T_a : Température du fluide loin de la surface du solide ($^{\circ}K$).

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

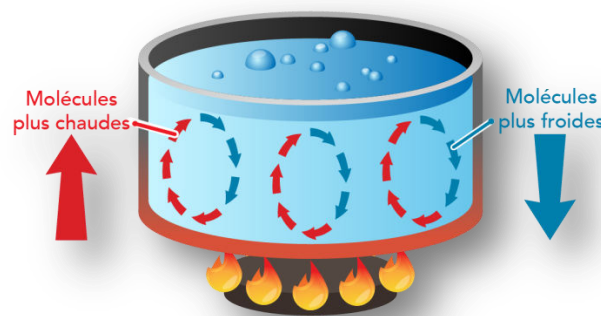


Figure. I.3 : Action de fluide en mouvement dans la convection [3].

I.3. Les Différents types de convection

I.3.1. Convection forcée

La convection forcée dans laquelle le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques, 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. La convection est dite forcée quand il existe une cause du mouvement autre que les variations de températures du fluide, cette cause étant la seule à prendre en compte en raison de son importance relative.

I.3.2. Convection naturelle

En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densité due au non uniformité du champ de température. Les couches chaudes, donc de poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, L'écoulement d'un fluide par convection naturelle due aux différences de température peuvent être résulté d'un chauffage ou d'un refroidissement par le bas, ou bien il résulte par des gradients de température provoquée par un chauffage ou un refroidissement par les côtés latéraux.

Les effets de convection naturelle sont familiers. On peut les observer quotidiennement dans l'eau que l'on chauffe dans un récipient, dans les panaches de certaines cheminées d'usines, la circulation atmosphérique, les vents, les tempêtes sont aussi des effets de la convection naturelle. En outre et selon les conditions aux limites, les études relatives à la convection sont souvent menés dans les cavités

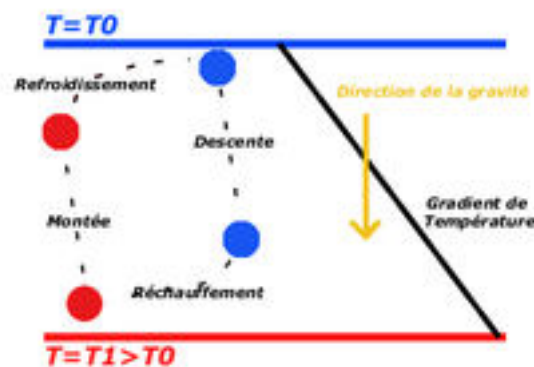


Figure. I.4 : Principe physique de la convection naturelle [4]

I.3.3. La convection mixte

La condition mixte s'exprimée comme suit $q = -\lambda \nabla T = h(T - T_0) + q_0$

Le coefficient d'échange h caractérise le flux emporté par convection par le fluide extérieur à température T_0 . Avec la convection combinée aux deux phénomènes précédents (convection naturelle et convection forcée) vitesses d'écoulement données. Fictives, dues aux deux types de convections

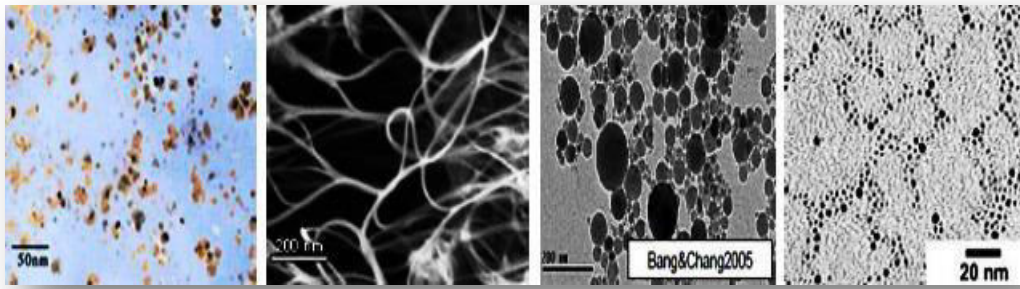


Figure. I.5 : Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol/ cuivre à 0,5 %, eau/alumine, eau/or à 2 nm, Bang et Chang (2005). [4]

I.4. Nanofluide

I.4.1. Définition d'un nanofluide

Avec les progrès récents en nanotechnologies, des particules de la taille des nanomètres peuvent être obtenues. Cet avancement technologique a donné l'idée de suspendre ces particules dans un liquide de base pour obtenir une amélioration de la conductivité thermique. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom « Nanofluides ». Ce terme a été introduit par Choi [5] au laboratoire d'Argonne en U.S American 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspension colloïdale.

Les nanofluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base. Le choix de ces liquides de base est primordial pour un nano-fluide, 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.4.2. Définition des nanoparticules

Les nanoparticules sont des particules dont les 3 dimensions sont dans la gamme 1-100 nm environ. Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire.

Les nanomatériaux peuvent être répartis selon le nombre de leurs dimensions qui se trouvent dans le domaine nanométrique comme suit :

- Trois dimensions (forme sphérique): tels que les Fullerènes (C60), nanoparticules sphériques (nano poudre de TiO₂, Ag,...),
- Deux dimensions (sous forme de ligne): comme les nanotubes, les nano-filaments, ...
- Une seule dimension (sous forme de plan):comme les films minces, couches minces,

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont :

- *Les nanoparticules des oxydes métalliques :*

1- l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃).

2- l'oxyde de cuivre (Cu).

3- l'oxyde de silicium (SiO₂).

4- l'oxyde de titanium (TiO₂).

- *Les nanoparticules métalliques :*

1- l'aluminium (Al).

2- le cuivre (Cu)

3- l'or (Au).

4- l'argent (Ag)

- *Les nanoparticules non métalliques :*

1- les nanotubes de carbone (CNT)

2- le diamant (C)

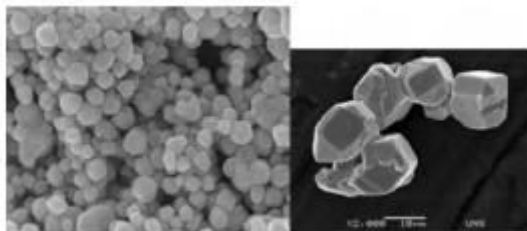


Figure. I.6: nanotube de carbone [4]

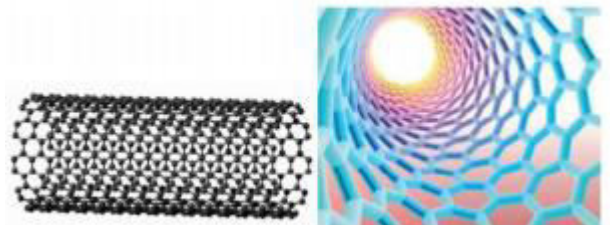


Figure. I.7: nanoparticules d'Argent [4]

Les nanoparticules, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels, voir le tableau. I.1 :

Tableau. I.1 : Les propriétés thermo-physiques de différents matériaux [6]

	Nanoparticules et fluide de base	k (W/m.K)	ρ (Kg/m ³)	C_p (j/Kg.K)	μ (Pa.s)
Métallique (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80,2	7870	447	
	Ni	90,7	8900	444	
	Au	317	19,300	129	
	Ag	429	10,500	235	
	C (diamant)	2300	3500	509	
Oxyde Métallique (solides)	SiO ₂	1,38	2220	745	
	TiO ₂	8,4	4157	710	
	Al ₂ O ₃	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
Liquides Non métalliques	L'eau	0,600	998.2	4183	0,0001003
	Ethylène-glycol (EG)	0,252	1111.4	2349	0,0157

I.4.3.Préparation de nanofluides

Le point délicat est la fabrication de si petits morceaux de matière plus ou moins bien calibrés. Inutile d'essayer d'en faire chez soi en ponçant un bout de cuivre pour en faire de la poussière par exemple. Ça ne fera que des particules de taille micrométrique au mieux, qui encrasseront le circuit. Les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories :

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

En général, les nanoparticules utilisées pour la synthèse de nanofluides sont à base d'oxydes, de nitrures, de carbures, de métaux purs ou d'alliages, de nanotubes de carbone (NTC). On trouve également des particules composites pouvant utiliser des polymères.

Il y a deux méthodes principales pour obtenir un nanofluide :

1. 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.
2. 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.

Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de recherches pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en œuvre et pour obtenir des particules de taille voulue. Chaque méthode a ses inconvénients et certains ne sont pas aptes à produire de grandes quantités de nanoparticules pour une production de masse vu les contraintes inhérentes au procédé. Les principaux moyens peuvent être :

- ✓ Le mécano-synthèse (broyage à haute énergie).
- ✓ La précipitation chimique (réduction de sels métalliques par exemple).
- ✓ Les dépôts chimiques ou physiques en phase vapeur (CVD ou PVD).
- ✓ Les dépôts chimiques en phase vapeur assistés par plasma (PECVD).
- ✓ La condensation de vapeurs par détente brutale dans des tuyères supersoniques.
- ✓ La pulvérisation cathodique radiofréquence.
- ✓ La sublimation par ablation laser (vaporisation d'un échantillon par impulsion laser).
- ✓ La pyrolyse laser (interaction entre un faisceau laser continu et un flux de réactifs).
- ✓ La désintégration d'électrodes submergées par passage d'étincelles (comme pour un usinage par électroérosion).

I.4.4. Propriétés thermo physiques des nanofluides

Les propriétés thermo physiques (conductivité thermique, masse volumique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et cinématique, etc.) des fluides de base sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des paramètres thermo physiques du nanofluide obtenus (la nature des nanoparticules, leur taille, la fraction volumique φ , la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu...etc.,).

I.4.4.1. La fraction volumique

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nanofluide, puisque le calcul de toutes les autres propriétés se base sur la fraction volumique du nanofluide. Et on peut définir la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules+ fluide de base). La valeur de la fraction volumique varie entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{V_p}{V_T} \quad \text{I.4}$$

V_p : volume de la nanoparticule. [m^3].

V_T : volume totale [m^3].

I.4.4.2. La Masse volumique :

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

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} = \frac{\rho_f V_f + \rho_p V_p}{V_f + V_p} \quad \text{I.5}$$

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

$$\varphi = \frac{\text{volume de la nanoparticule}}{\text{volume total du nanofluide}} = \frac{V_p}{V_p + V_f}$$

On en déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad \text{I.6}$$

Où :

ρ_{nf} : Masse volumique du nanofluide. ρ_p

ρ_f : Masse volumique du fluide.

I.4.4.3. Coefficient d'expansion thermique

La variation de la masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique $\beta_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ appelé également coefficient de dilatabilité. Pour calculer la valeur de ce coefficient pour les nanofluide de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nano-fluide, Par analogie avec la relation I.3, On déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_p \quad \text{I.7}$$

Où :

β_{nf} : Coefficient de dilatabilité du nano-fluide.

β_p Coefficient de dilatabilité de la nanoparticule.

β_f Coefficient de dilatabilité du fluide.

I.4.4.4. La Chaleur spécifique

La chaleur spécifique C est la capacité calorifique par unité de masse d'un corps homogène.

On appelle la chaleur spécifique C d'un corps le rapport de la quantité élémentaire de chaleur qui lui est communiquée lors d'un processus quelconque à la variation correspondante de température du corps : $C = \frac{dQ}{dT}$

Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano-fluide, on peut citer les deux modes :

Xuan and Roetzel [7] ont utilisé :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \quad \text{I.8}$$

Pak and Cho [8] on utilise:

$$(C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(C_p)_f + \varphi(C_p)_p \quad \text{I.9}$$

Où :

$(C_p)_{nf}$: Chaleurs spécifique du nanofluide.

$(C_p)_f$: Chaleurs spécifique du fluide de base.

$(C_p)_p$: Chaleurs spécifique des nanoparticules.

I.4.4.5. La viscosité dynamique

La viscosité peut être définie comme étant une propriété d'un fluide pour qu'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.

De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées afin d'estimer ou de mesurer la viscosité dynamique des nano-fluide, et de quantifier l'importance des principaux paramètres qui l'influencent. Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux modèles les plus utilisés dans le cas des nano-fluide.

✓ *Modèle d'Einstein*

Pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 - 2.5\varphi) \quad \text{I.10}$$

Avec :

μ_{nf} : La viscosité dynamique du nano-fluide.

μ_f : La viscosité dynamique du fluide de base.

✓ *Modèle de Brinkman [9]*

A étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 - \varphi)^{-2.5} \quad \text{I.11}$$

✓ *Modèle de Batchelor [10]*

A montré que la viscosité n'est pas seulement une fonction linéaire de φ , comme l'indique la relation d'Einstein mais une fonction non linéaire de φ

$$\mu_{nf} = \mu_f(2.6\varphi^2 + 2.5\varphi + 1) \quad \text{I.12}$$

✓ *Maiga et al. [11]*

À partir de résultats de mesures ont proposé la corrélation suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f(123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \quad \text{I.13}$$

✓ *Pack and Cho [8]*

Ont proposé, quant à eux une corrélation pour les nanoparticules Al_2O_3 dispersés dans l'eau donnée par :

$$\mu_{nf} = \mu_f(533\varphi^2 + 39.11\varphi + 1) \quad \text{I.14}$$

Donc pour notre travail, on a utilisé le modèle de Brinkman qui est le plus utilisé par les chercheurs.

I.4.4.6. La conductivité thermique

La conductivité thermique généralement est une propriété importante et principalement dans notre étude parce qu'elle joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur elle peut indiquer clairement l'efficacité du transfert de chaleur du fluide ou du solide, la conductivité dépend de la température. En plus de sa variation en fonction de la température, la conductivité thermique du nanofluide varie en fonction de la fraction volumique aussi.

Des relations utilisées précédemment pour le calcul de la conductivité thermique d'une suspension de particules de plus grande taille de l'ordre micromètres ou millimètres dans un fluide, ont été adoptées pour calculer la conductivité thermique des nanofluides.

✓ *Modèle de Maxwell [12]*

Le modèle de Maxwell est satisfaisant pour les suspensions contenant des particules sphériques de concentrations volumiques relativement faibles mais ne tient pas compte de l'effet de la taille ni de la forme des particules. Il est à noter aussi que l'effet des interactions inter-particules est négligé dans ce modèle.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} \quad \text{I.15}$$

Avec :

k_{nf} : La conductivité thermique du nano-fluide.

k_f : La conductivité thermique du fluide de base.

k_p : La conductivité thermique de la nanoparticule.

✓ *Modèle de Hamilton-Crosser [13]*

Le modèle de Hamilton et Crosser a été établi pour résoudre la limite de modèle de Maxwell. Puisque ce dernier n'a valable que dans le cas des particules sphériques une chose qui rend le modèle non efficace pour la description du phénomène étudié, pour cela le modèle du Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la conductivité thermique du nanofluide quel que soit la forme de la nanoparticule, et ça en introduisant la

notion du facteur géométrique appelé la sphéricité (ψ). La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_p)\psi}{k_p + (n-1)k_f + (k_f - k_p)\psi} \quad \text{I.16}$$

Où n est un facteur de forme empirique donné par : $n = \frac{3}{\psi}$, $n = 3$ pour les particules sphériques et $n = 6$ pour les particules cylindriques. Pour $\psi = 1$ (particules sphériques), le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell.

✓ **Modèle de Yu et Choi : [13]**

Ils ont proposé de modéliser les nanofluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique, cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2(1+\beta)^3(k_f - k_p)\psi}{k_p + 2k_f + (1+\beta)^3(k_f - k_p)\psi} \quad \text{I.17}$$

Avec :

β : Rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

I.5. Nanofluides hybrides

Un matériau hybride est une substance qui combine simultanément les propriétés physiques et chimiques de différents matériaux et fournit ces propriétés en phase homogène et un nanofluide hybride est un fluide de base contenant un nano composite dispersé. Ou plus d'un matériau de nanoparticules.

Les Nanofluides hybrides Sont un mélange composite d'énergie nanométrique métallique avec un fluide de base utilisé pour améliorer le taux de transfert de chaleur dans différentes applications.

I.5.1. Propriétés thermo physiques des nanofluides hybrides

❖ *La fraction volumique*

$$\Phi_{hnp} = \varphi_1 + \varphi_2 \quad \text{I.18}$$

❖ *La Masse volumique*

$$\rho_{hnf} = (1 - \varphi_{hnp})\rho_f + \varphi_1\rho_1 + \varphi_2\rho_2 \quad \text{I.19}$$

Où :

ρ_{hnf} : Masse volumique du nanofluide hybride.

ρ_f : Masse volumique du fluide.

ρ_1 : Masse volumique de la première nanoparticule.

ρ_2 : Masse volumique de la seconde nanoparticule.

❖ **Coefficient d'expansion thermique**

$$(\rho\beta)_{hnf} = (1 - \varphi_{hnp})(\rho\beta)_f + \varphi_1(\rho\hat{\alpha})_1 + \varphi_2(\rho\beta)_2 \quad \text{I.20}$$

Où :

β_{hnf} : Coefficient de dilatabilité du nanofluide hybride.

❖ **La Chaleur spécifique**

$$(\rho C_p)_{hnf} = (1 - \varphi_{hnp})(\rho C_p)_f + \varphi_1(\rho C_p)_1 + \varphi_2(\rho C_p)_2 \quad \text{I.21}$$

Où :

$(C_p)_{hnf}$: Chaleurs spécifique du nanofluide hybride.

❖ **La viscosité dynamique :**

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi_1)^{2.5}(1-\varphi_2)^{2.5}} \quad \text{I.22}$$

μ_{hnf} : La viscosité dynamique du nanofluide hybride.

❖ **La conductivité thermique**

$$\frac{k_{hnf}}{k_f} = \left\{ \frac{k_1\varphi_1 + k_2\varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2} + 2k_f + 2(k_1\varphi_1 + k_2\varphi_2) - 2(\varphi_1 + \varphi_2)k_f \right\} \times \left\{ \frac{k_1\varphi_1 + k_2\varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2} + 2k_f - 2(k_1\varphi_1 + k_2\varphi_2) + (\varphi_1 + \varphi_2)k_f \right\} \quad \text{I.23}$$

Avec :

k_{hnf} : La conductivité thermique du nanofluide hybride.

I.6. Les applications de nanofluides

Les nanofluides peuvent être employées pour améliorer le transport de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermique. Dans cette section, quelques exemples d'application seront présentés tel que le transport, la micro- électronique, le nucléaire et la biomédicale.

- **Refroidissement des systèmes thermiques**

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules .L'addition des nanoparticules dans ces liquides améliore le taux de refroidissement. Ce point est étudié par plusieurs groupes de chercheurs, Boudjeniba et al [14], ils ont concerné une étude de l'amélioration des transferts suite à l'incorporation des nanoparticules dans les solutions utilisées

principalement pour le refroidissement des systèmes énergétiques et l'effet du facteur de forme sur le mouvement ascendant des courants fluides.

- **Refroidissement des systèmes électroniques**

Dans les circuits intègres, les nanofluides ont été considérés comme fluides de refroidissement pour cela plusieurs études ont été effectuées. Tsai et al [15] ont employé un nanofluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un ordinateur.

- **Refroidissement des systèmes nucléaires**

L'institut de technologie du Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour les nouvelles nanotechnologies (nano-fluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûreté neutronique, et la performance économique des systèmes nucléaires.

- **Refroidissement des systèmes militaires**

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermiques très élevés ($q > 500$ à 1000 W/cm^2), où les nanofluides ont montrés leur efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaires, y compris les véhicules militaires, les sous-marins, et les diodes lasers à haute puissance.

- **La biomédecine**

Nanofluides et nanoparticules dans Science biomédicale. Par exemple, afin d'éviter certains effets secondaires de cette méthode Formes traditionnelles de traitement du cancer. Les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues. Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de la région chirurgicale.

Les nano fluides peuvent fournir une solution intéressante pour le refroidissement Miroirs, cibles et filtres laser et à rayons X haute puissance

I.6.1. Les avantages des nanofluides

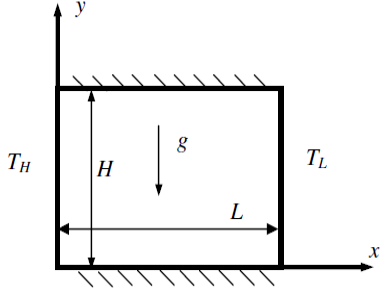
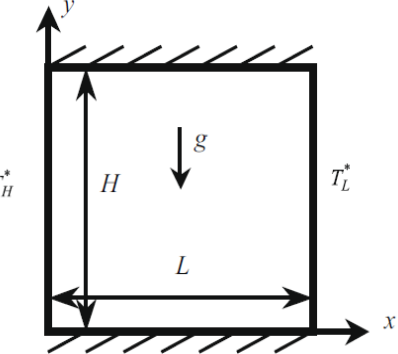
- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Volume réduit par rapport au liquide pur pour obtenir une équivalence d'intensification de transfert de chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux fluides conventionnels, favorisant ainsi la miniaturisation du système.

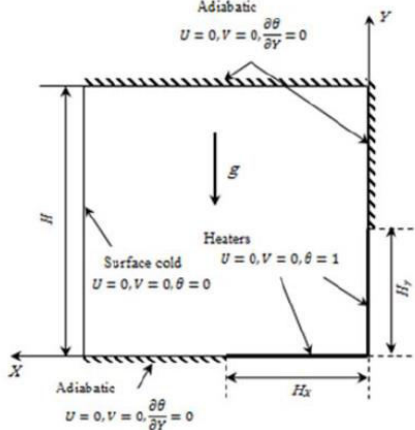
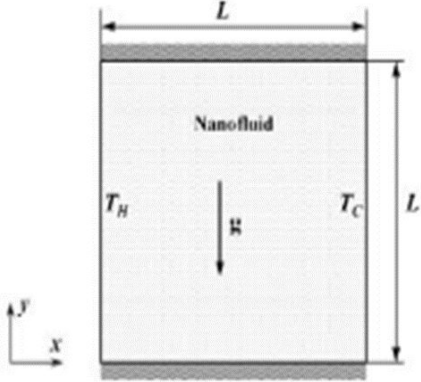
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominance du mouvement Brownien des particules.

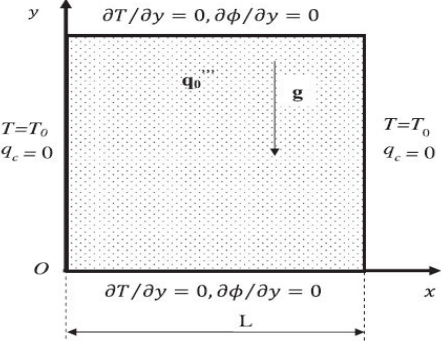
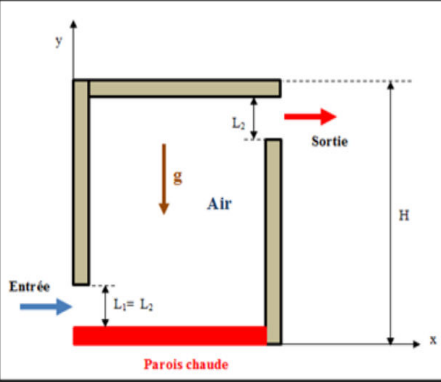
I.6.2. Les inconvénients des nanofluides

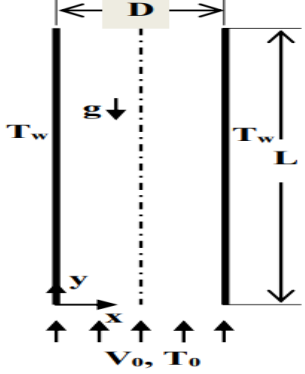
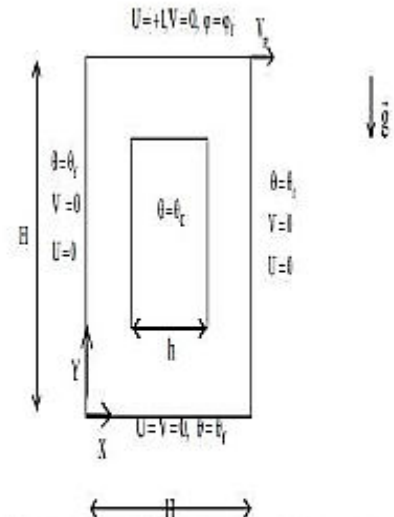
- Le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- Le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés
- Instabilité des nanoparticules (dispersion).
- Chute de pression accrue lors du pompage.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés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

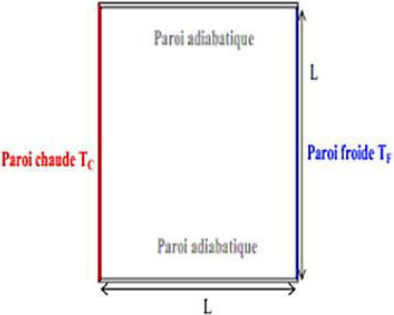
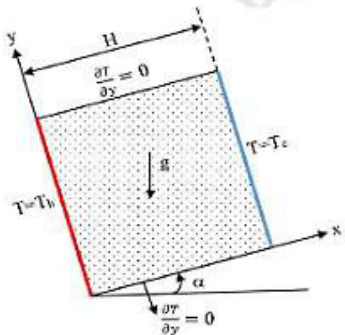
I.7. Synthèse bibliographique

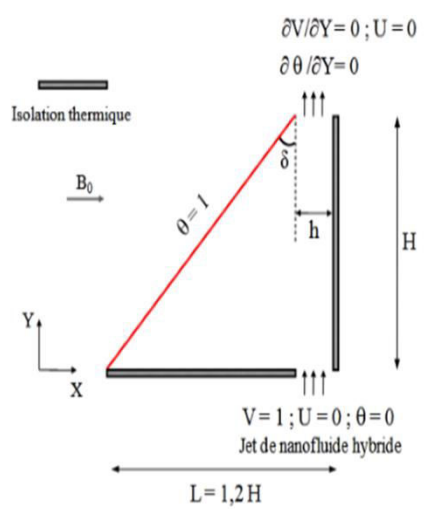
Auteur	Année	Configuration	Paramètre	Méthode	Observation
<p>Khanafer K., K. Vafai, and M. Lightstoal. [16]</p>	<p>2003</p>	 <p>Fig. 1. Schematic for the physical model.</p>	<p>$10^3 \leq Gr \leq 10^5$</p>	<p>Volumes- finis approchée</p>	<p>Le taux de transfert de chaleur augmenté avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.</p>
<p>Lin, K.C. and A. Violi, [17]</p>	<p>2010</p>	 <p>Fig. 1. Schematic of the physical model used in this study.</p>	<p>$10^3 \leq Ra \leq 10^6$</p> <p>$5 \leq d_{Al_2O_3} \leq 250\text{nm}$</p> <p>$0 \leq \phi \leq 5\%$</p> <p>$A=1.0$</p>	<p>Volumes- finis</p>	<p>L'amélioration de transfert de chaleur peut être attribuée à l'effet dominant du mouvement brownien causé par la convection de chaleur.</p>

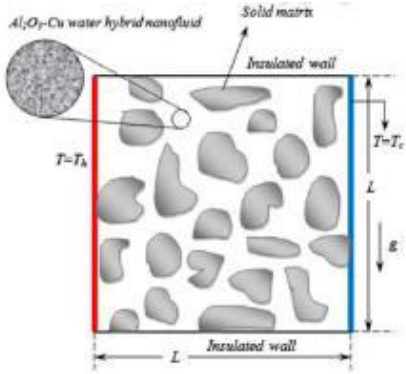
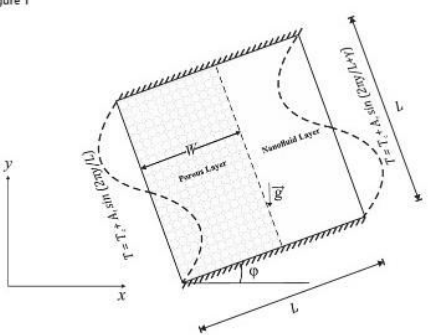
<p>Tayebi T. and Saadaoui, K, [18]</p>	<p>2013</p>		<p>$10^3 \leq Ra \leq 10^6$</p> <p>$0 \leq \phi \leq 10 \%$</p> <p>$0.25 H \leq H_x \leq 0.5H$</p> <p>$0.25 H \leq H_y \leq 0.5H$</p>	<p>Méthode de volumes Finis</p>	<p>Le transfert de chaleur est une fonction croissante du nombre du Rayleigh et la fraction volumique des nanoparticules.</p> <p>De plus le taux de transfert est plus élevé lorsque la longueur horizontale de l'élément chauffant est supérieure à celle de la longueur verticale.</p>
<p>Minh Tuan Nguyen, Abdelraheem M. Aly Sang-wooklee [19]</p>	<p>2015</p>		<p>$10^3 \leq Ra \leq 10^9$</p> <p>$0 \leq \theta \leq 0.05$</p> <p>$0.4 \leq \epsilon \leq 0.9$</p> <p>Pr = 6.2</p>	<p>Méthode des différences finies</p>	<p>Des valeurs de Rayleigh plus élevées réduit à l'augmentation du nombre de Darcy ou de façon équivalente, de la perméabilité de la matrice poreuse.</p> <p>-L'augmentation de la fraction de volume solide des nanoparticules entraîne une diminution notable de la température maximale de la source de chaleur.</p>

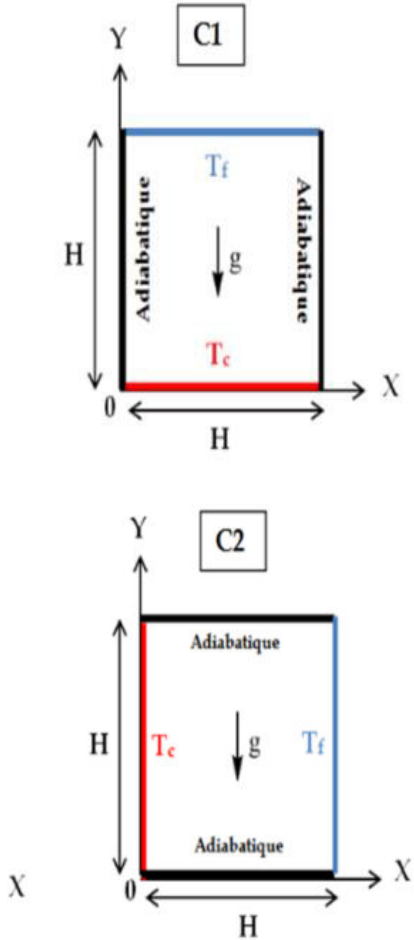
<p>Groșan ,T . Revnici ,Pop , I.& Ingham. , D. B. [20]</p>	<p>2015</p>		<p>$10 \leq Ra \leq 100$</p> <p>$1 \leq Le \leq 10$</p> <p>$Nb = 0.1$</p>	<p>Méthode des différences finies</p>	<p>L'ajout de nanoparticules dans des milieux poreux saturés de fluide réduit la température et améliore le transfert de chaleur lorsque la valeur de la conductivité thermique des nanoparticules est beaucoup plus élevée que la conductivité thermique de la structure solide du milieu poreux.</p>
<p>Samir HOUAT, Zine elabidine Bouayed [21]</p>	<p>2015</p>		<p>$Pr = 0.71$</p> <p>$Gr = 10^5$</p> <p>$10^3 \leq Ra \leq 10^5$</p>	<p>Méthode de volumes Finis</p>	<p>Les résultats indiquent que le modèle TLBM à double population utilisé, a tous les avantages, y compris une bonne stabilité numérique et la capacité à gérer en général les problèmes de transfert de chaleur par convection.</p>

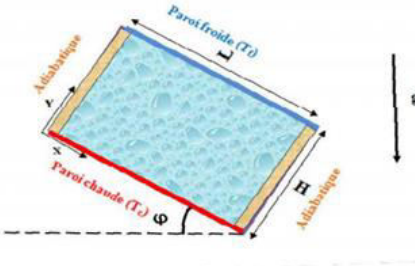
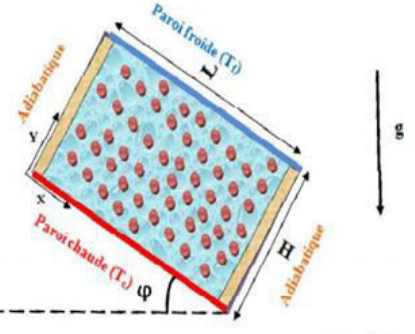
<p>E.belahmadi , R. BESSAÏH [22]</p>	<p>2016</p>		<p>$800 \leq Re \leq 1800$ $0.009\text{m} \leq D \leq 0.02\text{ m}$ $0 \leq \phi \leq 0.1$ $10^4 \leq Gr \leq 10^6$</p>	<p>Méthode de volumes Finis</p>	<p>Les résultats montrent que l'augmentation du transfert de chaleur en convection mixte est proportionnelle à l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, le nombre de Reynolds Re et le nombre de Grashof Gr.</p>
<p>Abdelkader boutra , Karim RAGUI , Nabila labsi , youb khaled benkahla, Rachid bennacer [23]</p>	<p>2016</p>	 <p>Figure 1 : Schématisation de problème physique et des conditions aux limites.</p>	<p>$Ri = 0,01_1_100$ $AR = 0.3_0.5_0.7$ $\phi = 0_0.1$</p>	<p>Volumes finis</p>	<p>L'augmentation de la concentration du nanofluide et du rapport de forme de l'obstacle permet d'améliorer le transfert thermique. Notons que l'addition des nanoparticules élargie l'étendue de la cellule fermée, localisée au-dessus de l'obstacle. Le transfert thermique se fait de l'obstacle chaud vers les molécules du fluide adjacent, par conduction, puis se propage par la suite dans la cavité par convection. Pour la région au-dessus de l'obstacle où les isothermes sont fortement incurvées, l'effet de la convection forcée est dominant. En outre, l'addition de nanoparticules permet une meilleure propagation de la chaleur vers les parois.</p>

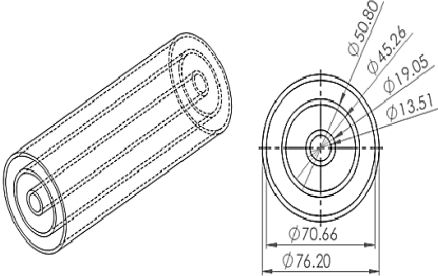
<p>DADDA Mouham Ed Lamine</p> <p>[24]</p>	<p>2016</p>	 <p>Figure II.1 : Géométrie du problème</p>	<p>$10^3 < Ra < 10^6$</p> <p>$Pr = 0.7$</p>	<p>Volumes finies</p>	<p>. Pour un nombre faible de Rayleigh, de l'ordre de 10^3, on a remarqué la dominance du mode de transfert de chaleur par conduction. Au-delà de cette valeur, la convection domine et apparaît d'une manière plus à partir pour $Ra = 10^5$. En revanche, on a conclu que le nombre de Nusselt moyen augmente parallèlement avec l'augmentation de l'échange thermique, ce qui montre que la convection naturelle est très sensible à la variation du nombre de Rayleigh. On peut dire, alors, que : L'augmentation du nombre de Rayleigh améliore l'écoulement par la convection naturel.</p>
<p>Sabah .Y.M otlagh, S.Taghizade h et H .Soltanipour</p> <p>[25]</p>	<p>2016</p>		<p>$100 \leq Ra \leq 10000$</p> <p>$0 \leq \varphi \leq 0.04$</p> <p>$0.5 \leq \varepsilon \leq 0.9$</p> <p>$0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$</p>	<p>Méthode des volumes finies</p>	<p>Pour les nombres de Ra et les fractions φ, les nanoparticules de Cu montrent un taux de transfert de chaleur plus élevé et une distribution uniforme par rapport aux nanoparticules d'Al2O3. à haute porosité Rayleigh nombres toute fraction de volume de nanoparticules, le taux de transfert de chaleur augmente avec la réduction de la porosité.</p>

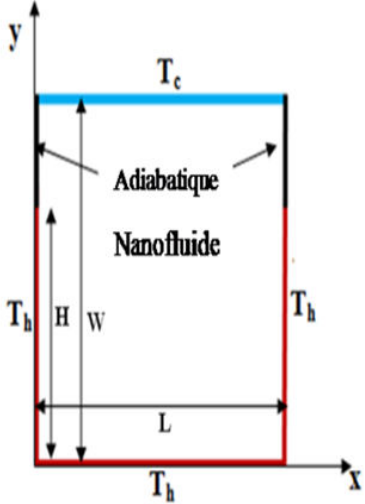
<p>M.BENZE MAa , Y.K. BENKAHL A, A.BOUDIA F, S.OUYAHI A, [26]</p>	<p>2017</p>	 <p>The diagram shows a triangular cavity with a horizontal base of length $L = 1,2H$ and a vertical right side of height H. The hypotenuse is at an angle $\theta = 1$. The top horizontal boundary is labeled 'Isolation thermique' with boundary conditions $\partial V / \partial Y = 0; U = 0$ and $\partial \theta / \partial Y = 0$. The bottom horizontal boundary is labeled 'Jet de nanofluide hybride' with boundary conditions $V = 1; U = 0; \theta = 0$. A magnetic field B_0 is applied horizontally. A coordinate system (X, Y) is shown at the bottom-left corner. A boundary layer of thickness h is indicated near the top-right corner.</p> <p>Figure 1 : Cavité considérée et conditions aux limites adimensionnelles</p>	<p>$10 \leq Re \leq 400$</p> <p>$0 \leq Ha \leq 100$</p> <p>$0 \leq \phi \leq 0,02$</p>	<p>Volume finis</p>	<p>Les résultats obtenus ont permis de faire ressortir les points suivants :</p> <p>L'application d'un champ magnétique uniforme a montré sur le plan hydrodynamique, un ralentissement de l'écoulement ascendant du nanofluide hybride dans la cavité. Ceci a permis de conclure, qu'augmenter le nombre de Hartmann a des conséquences sur les champs hydrodynamique et thermique. Ainsi, cette augmentation a entraîné d'importants gradients de température et de vitesse près de la paroi active.</p> <p>Les performances thermiques de la cavité se voient améliorées par l'augmentation de l'inertie du fluide ainsi que l'intensification du champ magnétique. D'une manière générale, l'ajout de nanoparticules permet d'améliorer le transfert thermique, à l'exception du cas où $Re = 400$ qui tend à aliéner l'effet de la présence des nanoparticules. Finalement, il y apparaît au travers de cette étude que l'apport des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique, devient moins probant avec l'augmentation du nombre de Hartmann.</p>
---	-------------	--	--	---------------------	---

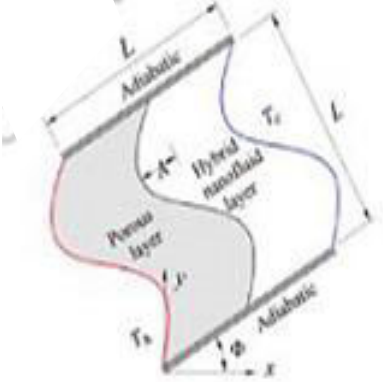
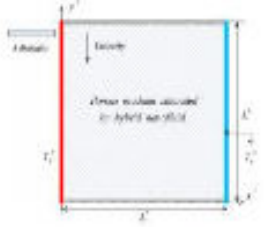
<p>S .A .Mehryan, F .Kashkooli, M.Ghalambaz et Ali.J.Chamkha [27]</p>	<p>2017</p>		<p>$1 \leq Ra \leq 1000$</p> <p>$0 \leq \varphi \leq 0.02$</p> <p>$0.3 \leq \varepsilon \leq 0.9$</p>	<p>Méthode des éléments finies</p>	<p>La présence de Cu-Al₂O₃ et provoque une augmentation extrême de la vitesse du nano fluide à mesure que Ra augmente, Force du flux de nano fluide à diminuer pour toutes les valeurs de Ra.</p>
<p>Alsabery A. I., chamkha ,, A. J., Saleh , H., & Hashim , I. [28]</p>	<p>2017</p>	<p>Figure 1</p> 	<p>$105 \leq Ra \leq 10^6$</p> <p>$10^{-5} \leq da \leq 10^{-3}$</p> <p>$0 \leq \varphi \leq 0.2$</p> <p>$0 \leq \Delta \leq 1$</p> <p>$0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$</p> <p>$0.1 \leq W_p \leq 0.9$</p>	<p>Méthode des différences finies</p>	<p>A faible épaisseur de couche poreuse, Ag apparait avec une amélioration de transfert de chaleur par rapport à d'autres nanoparticules. -En augmentent l'épaisseur de la couche poreuse, la nanoparticule d'Al₂O₃ tend à transporter plus de chaleur dans la cavité. Ceci est du à thermique de la nanoparticule d'Al₂O₃.</p>

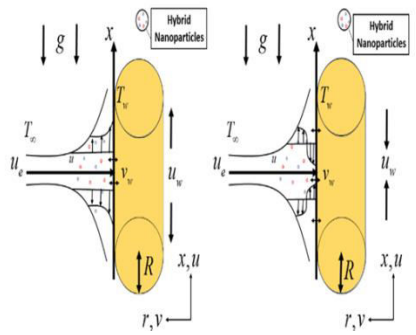
<p>TRODI Amira [29]</p>	<p>2018</p>		<p>$d_p = 0.13_1_2_5_7.5_10$</p> <p>$103 \leq Ra \leq 106$</p> <p>$\phi = 0.0_0.05_0.1$</p>	<p>Méthode des Volume finie</p>	<p>Les principaux résultats qu'on peut ressortir de cette thèse sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le transfert de chaleur s'intensifie en augmentant le nombre de Ra ainsi que la fraction en volume des nanoparticules. Le nanofluide basé sur la suspension sphéroïdale aplatie ($d_p=0.13$) semble être le nanofluide le plus performant, d'une part. D'autre part, l'amélioration du transfert de chaleur, pour le cas des nanoparticules de forme sphéroïdale allongée, est plus probante en augmentant le rapport d'aspect. - Le taux d'amélioration du transfert thermique s'accroît en diminuant le nombre de Rayleigh indépendamment de la cavité, de la forme et du rapport d'aspect des nanoparticules.-La cavité aux parois verticales différentiellement chauffées offre de meilleure performance thermique. - Les résultats obtenus par le nanofluide hybride ont montré une meilleure performance thermique en comparaison avec le fluide de base et le nanofluide contenant seulement les NPs d' Al₂O₃ ou de Cu. Cette amélioration du transfert de chaleur devient plus probante avec l'augmentation de la teneur volumique en NPs de Cu.
---------------------------------	-------------	--	---	---	---

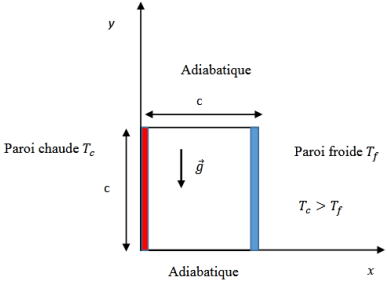
<p>Bouhabel bourhane et Guermat zouhir. [30]</p>	<p>2018</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cavité saturée par l'eau pure :  <p>Figure 2.1: géométrie du problème pour cas de l'eau pure</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cavité saturée par un nanofluide :  <p>Figure 2.1: géométrie de problème pour nanofluide</p>	<p>$Ra=10^3_10^4_10^5$</p> <p>$\varphi= 0_0.4$</p> <p>$0^\circ \leq \gamma \leq 18$</p>	<p>volumes finis</p> <p>L'augmentation du nombre de Rayleigh nous a permis d'observer que ce dernier influe directement sur la structure de l'écoulement ainsi que sur le transfert de chaleur.</p> <p>L'augmentation de la fraction volumique du nanofluide favorise d'avantage de transfert de chaleur.L'effet du nombre de Rayleigh sur le taux d'échange de chaleur a été mis en évidence et le transfert thermique augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh.</p> <p>Le transfert thermique en présence des nanoparticules de Cu s'améliore comparativement à celui en présence des nanoparticules de CuO, Al et Al2O3 pour les grandes valeurs de Rayleigh.</p> <p>La valeur de Rayleigh de transition du régime conductif en régime convectif $Rac1$ et la valeur de Rayleigh débutant la convection thermique oscillatoire $Rac2$ seront déplacés pour le nanofluide Eau/Cu.</p> <p>L'existence des angles critiques dépendent du Rapport de forme A et du nombre de Rayleigh Ra. Au voisinage de $\theta \approx 0^\circ$, l'écoulement est multicellulaire pour un rapport de forme supérieur à 1 et monocellulaire pour une cavité carré. En changeant l'inclinaison la structure d'écoulement et dans le cas $\theta \approx 180^\circ$ le fluide est en régime purement conductor. Le taux d'échange de chaleur varie selon la variation de l'inclinaison et le rapport de forme.</p>
--	-------------	--	---	---

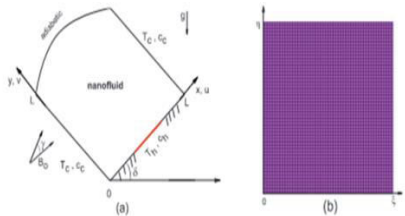
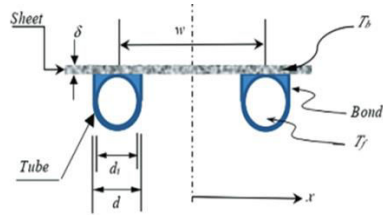
<p>RAGUEB Haithem KHALDI Abdelbasset [31]</p>	<p>2019</p>		<p>$2000 \leq Re \leq 100000$ $V = 6-10$ $\phi = 0\% , 1\% , 2\%$ $(Pe > 100)$</p>	<p>la méthode des volumes finis</p>	<p>Les résultats de simulation numérique ont montré l'influence importante de l'utilisation du Nanofluide hybride sur le comportement globale de l'échangeur à triple tube concentrique. On remarque que pour un débit constant, l'utilisation du nanofluide à l'intérieur du tube centrale diminue l'efficacité globale de l'échangeur, que ce soit en écoulement parallèle ou contre-courant. Par contre, lorsque le nanofluide hybride est introduit dans l'espace annulaire externe, on remarque une nette amélioration de l'efficacité. A la suite de ces résultats, dans le cas où le débit est une contrainte (fixe), nous recommandons d'utiliser ce nanofluide que dans l'espace annulaire externe afin d'obtenir des meilleures performances.</p>
--	-------------	---	---	---	---

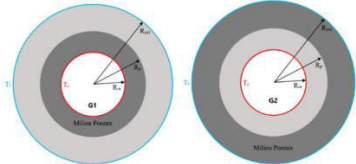
<p>BOUDAOU Warda [32]</p>	<p>2019</p>		<p>$Ra = 10^2 - 10^4 - 10^6$ $\phi = 0 - 0.3$</p>	<p>Volumes finis</p>	<p>Les nano-fluides peuvent améliorer le transfert thermique comparativement aux fluides conventionnels du transfert thermique dus à l'existence des nanoparticules dans les fluides de base.</p> <p>Non seulement l'augmentation de la concentration de volume des nanoparticules provoque des augmentations dans le transfert de chaleur par convection, mais également augmente légèrement les pertes de pression.</p> <p>Les résultats constatent que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et la fraction volumique.</p> <p>Il n'y a aucune influence de la paroi ondulée sur l'exécution de transfert thermique. Cette remarque est confirmée dans le cas de la génération de l'entropie, où aucun impact de la paroi supérieure ondulée sur l'évolution de la génération de l'entropie, ceci est dû probablement sur l'effet des forces de flottabilité qui sont toujours influencés vers le sens de la gravité.</p> <p>En d'autres termes, la génération de gradient de température et d'entropie due au transfert de chaleur se concentre le long des parois latérales. Pour tous les cas étudiés avec différents nombres de Ra, et différentes valeurs de la fraction volumique.</p>
-----------------------------------	-------------	--	---	--------------------------	---

<p>Hakim T. Kadhim ,Faris A. Jabbar , Aldo Rona [33]</p>	<p>2020</p>		<p>$10^4 \leq Ra \leq 10^7$ $0 \leq \varphi \leq 0.2$ $10^{-2} \leq Da \leq 10^{-5}$ $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ $0.2 \leq WP \leq 0.8$ $1 \leq N \leq 4$</p>	<p>La méthode des éléments finis</p>	<p>On constate que l'angle d'inclinaison est Un paramètre de contrôle très influent pour le nano fluide hybride dans l'enceinte. Le modèle prédit que l'ajout de nanoparticules améliore le transfert de chaleur entre les parois opposées de la cellule par rapport au fluide pur sur toute la plage d'inclinaison de l'angles</p>
<p>S.A.M. Mehryan Ghalambaz, M., Chamkha, A. J , & Izadi, M [34]</p>	<p>2020</p>	 <p>Fig. 1. A schematic view of the geometry of the physical model.</p>	<p>$10 \leq Ra \leq 103$ $0,1 \leq \epsilon \leq 0,9$ $0 \leq \varphi \leq 0,02$ $1 \leq H \leq 1000$</p>	<p>La méthode des éléments finis</p>	<p>La dispersion des nanoparticules hybrides Ag-MgO entraîne une réduction de taux de transfert de haleur à travers le solide et phases fluides du milieu poreux. De plus, l'utilisation d'hybride des nanoparticules affaiblissent la condition LTNE</p>

<p>NS Khashi'ie , EH Hafidzuddin</p> <p>[35]</p>	<p>2020</p>		<p>$Pr=6.2$ $0 \leq \gamma \leq 0.1$ $-0.1 < \varepsilon < 0.5$</p>	<p>la méthode des volumes finis</p>	<p>Les résultats sont : Les solutions de similarité (première et seconde) sont atteintes pour le boîtier du cylindre rétractable lorsqu'une faible grandeur du paramètre de succion est imposée. Pas de solution(s) possible(s) si le cylindre est le paramètre imperméable ou d'injection est appliqué.</p> <p>Les valeurs plus élevées de la courbure γ et des fractions volumiques des nanoparticules de cuivre ϕ_2 paramètres peut gonfler le coefficient de frottement cutané réduit et le nombre de Nusselt local dans la plage spécifique valeur du paramètre d'aspiration.</p> <p>La première solution de similarité existe pour toutes les valeurs du paramètre de flottabilité jusqu'au point critique alors que la deuxième solution de similarité est impossible pour le flux convectif forcé et plus grande ampleur du flux d'assistance.</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'exécution de l'analyse de stabilité prouve la fiabilité de la première solution. <p>. Les présents résultats ne s'appliquent qu'à la combinaison de nanoparticules de cuivre et d'alumine seulement. Cependant, d'autres chercheurs peuvent étendre l'étude en utilisant d'autres nano-fluides hybrides ou paramètres physiques pour obtenir le résultat souhaité.</p>
--	-------------	---	--	---	---

<p>Brahimi Meryem ,Debih Maroua</p> <p>[36]</p>	<p>2020</p>	 <p>Figure (II.1) : Géométrie de la cavité carrée fermée.</p>	<p>$Ra = [10^2 - 2.5 \times 10^5].$</p> <p>$Pr = 0.71$</p>	<p>la méthode des volumes finis et l'algorithme SIMPLER</p>	<p>Les résultats obtenus représentent l'influence du nombre de Rayleigh sur la structure de l'écoulement généré par la convection naturelle ainsi que sur le transfert thermique et interprétés respectivement par la fonction de courant ψ en fonction est les nombres de Nusselt moyen et local. On a fait varier le nombre de Rayleigh de 10^2 jusqu'à 2.5×10^5, ou nous avons constaté que au-delà de cette dernière valeur notre code présente une instabilité pendant le calcul. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du nombre de Rayleigh, fait accélérer l'écoulement dans la cavité et le transfert de chaleur passe d'un mode conductif pour la faible valeur de $Ra \leq 10^3$ à un mode convectif sous l'effet de l'intensification de la convection naturelle et par conséquent le taux d'échange de la chaleur entre la paroi et le fluide augmente ce qui se traduit par l'augmentation des nombres de Nusselt moyen et local.</p>
---	-------------	--	--	---	---

<p>RujdaParveen PriyajitMondal Tapas Ray Mahapatra</p> <p>[37]</p>	<p>2021</p>	 <p>Fig. 1. Schematic representation of (a) physical geometry and boundary conditions in dimensional form, and (b) computational domain of grid size 81 x 81.</p>	<p>$10^3 < Ra < 10^5$ $0 < Ha < 60$ $1 < Le < 6$ $-2 < Br < 2$ $Pr = 6.2$</p>	<p>la méthode des volumes finis.</p>	<p>Les principales conclusions tirées de ces travaux sont listées ci-dessous :</p> <ul style="list-style-type: none"> . Le nombre de Rayleigh et la fraction volumique des nanoparticules ont une relation directe avec la force du flux convectif, tandis que le nombre de Hartmann et les angles d'inclinaison ont une relation opposée. <p>Le nombre moyen de Nusselt et le nombre de Sherwood augmentent avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, le volume Fraction de nanoparticules, rapport de flottabilité et déclin avec nombre de Hartmann croissant, l'angle d'inclinaison de la boîte et champ magnétique.</p> <p>Un effet significatif est remarqué dans les schémas d'écoulement lorsque l'angle d'inclinaison de l'enceinte augmente, tandis qu'un effet moins significatif s'observe dans l'augmentation de l'angle d'inclinaison magnétique.</p> <p>L'enceinte considérée en forme de dôme semble avoir un impact substantiel sur l'écoulement des fluides qui permet un écoulement plus fluide et plus efficace .</p>
<p>Kawthar Dhif , F. Mebarek- Oudina1, *, S. Chouf , H. Vaidya , and Ali J. Chamkha</p> <p>[38]</p>	<p>2021</p>	 <p>Fig. 1. Absorber section.</p>	<p>$15 < h_c < 90$ $100 < h_f < 1000$ $0.015 < K < 0.6$</p>	<p>la méthode des volumes finis.</p>	<p>Les conclusions importantes sont les suivantes suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dans tous les cas, nous maintenons que la meilleure performance est obtenue pour un espacement de 0,04 à 0,06 mm entre les tubes. F' le facteur d'efficacité du collecteur de stockage est également réduit par l'augmentation de h c le coefficient de transfert de chaleur entre le NANO-PCM liquide et

					<p>l'absorbeur.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La diminution de F' est due au fait que h_c représente une perte d'énergie thermique qui est récupérée par le NANO-PCM, mais cette diminution est compensée par l'augmentation la chaleur stockée qui sera utilisée lors de la décharge mode. L'utilisation de NANO-PCM avec une chaleur spécifique élevée dans de tels applications de stockage thermique, a conduit à l'augmentation densité d'énergie mal qui implique non seulement une diminution de la taille du système de stockage d'énergie thermique mais aussi un réduction du nombre de soudures.
<p>HACHANI Hicham GHERSELAH IkbalAmmar [39]</p>	<p>2021</p>	 <p>Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..1. Configurations étudiées.</p>	<p>$Ra=10^3_10^6$</p> <p>$k^* = 0.1_10$</p> <p>$Da=10^{-5}_10^{-2}$</p> <p>$\varphi = 0.2_0.8$</p> <p>$\varepsilon =0.02_0.08$</p>	<p>la méthode des volumes finis.</p>	<p>Les principales conclusions sont résumées comme suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'écoulement conserve sa symétrie par rapport le linge central vertical pour tous les cas investigués. • Plus les valeurs de Ra, ε , et k^* sont élevées et plus les valeurs de Da sont basses, plusle l'écoulement convectif et le taux de transfert de chaleur sont élevés pour les deuxconfigurations étudiées. <p>Le taux de transfert de chaleur est plus important pour la première configuration pour toutes les valeurs de Ra, ε, φ et k^*.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour les deux configurations, il a été constaté que le taux de transfert de chaleur diminue lorsque des nanoparticules sont ajoutées au liquide de base et cela est

					<p>plus prononcé pour les valeurs k^* plus élevées.</p> <ul style="list-style-type: none">• L'intensité de circulation de nano fluide augmente par l'augmentation de la concentration volumique des nanoparticules de cuivre pour la première configuration, mais l'inverse a été observé pour la deuxième configuration.• Les effets de propriétés du milieu poreux sur le transfert convectif sont plus considérables pour la première configuration.
--	--	--	--	--	---

Chapitre II

Modélisation et formulation mathématique

II.1.Introduction

L'étude des transferts de chaleur par convection mixte dans les cavités ouverte suscite l'intérêt de nombreux scientifiques et industriels. Les recherches menées dans ce domaine s'étendent sur plusieurs années. Cette importance est due essentiellement à la présence de ce phénomène dans différentes applications industrielles et plus particulièrement dans les processus de refroidissement des composants électroniques.

II.2.Description du problème

Dans ce travail nous avons mené une étude numérique portant sur un problème de convection mixte en cavité ventilée en forme carrée. La cavité considéré est présentée à la figure (II.1) est une cavité ouverte contient un cylindre froid (T_f) central de diamètre ($D=0.2H$) et chauffé uniformément a une température constante (T_c), à partir de la paroi inférieure, tandis que les autres parois de la cavité sont toutes isolées thermiquement. Notre système physique est soumis à un écoulement externe de nanofluide ou nanofluide hybride introduit dans la cavité avec une vitesse U_e et une température T_e ($T_e = \frac{T_c + T_f}{2}$), à travers une ouverture placée au niveau haut de la paroi gauche de taille ($h=0.1H$), et l'ouverture de sortie de la même taille placée en bas de la paroi opposée.

Le nanofluide ou nanofluide hybride entre dans la cavité ventilée est supposé Newtonien, incompressible en régime laminaire et stationnaire et la base du fluide et les nanoparticules sont dans un état d'équilibre thermique.

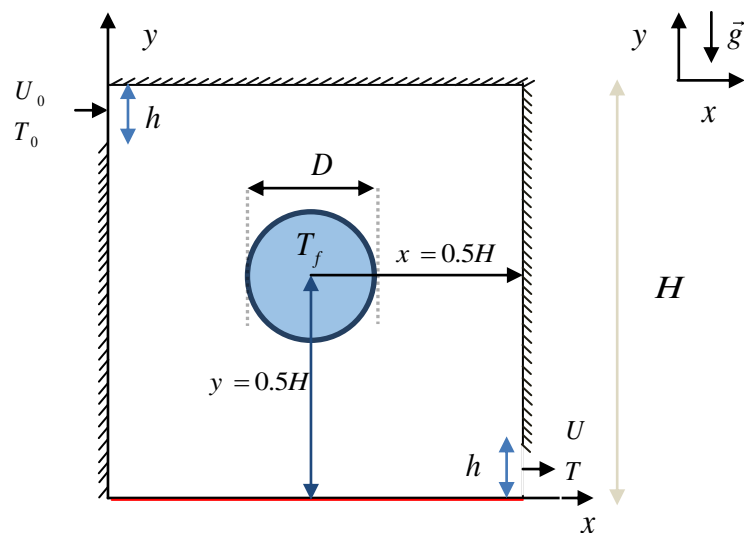


Figure. II.1 : Géométrie de la cavité carrée ouverte.

II.3. Elément mathématique de base

La formulation mathématique des phénomènes de convection repose sur les équations liant les différents paramètres à savoir : la vitesse, la pression et la température. Ces équations sont obtenues à partir des lois de conservation de masse, de conservation de la quantité de mouvement (équations de Navier - Stokes), et de conservation d'énergie.

II.3.1 Equation de continuité

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

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho \cdot V) = 0 \quad \text{II.1}$$

Où

ρ : La masse volumique.

V : le vecteur de vitesse.

t : temps.

II.3.2 Equation de quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. Il s'écrit sous la forme suivante [5] :

$$\frac{d}{dt}(\rho \cdot V) = \rho F - \text{grad}(P) + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}(V)) \quad \text{II.2}$$

Où :

F : force par unité de volume.

μ : viscosité dynamique.

II.3.3. Equation de conservation d'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\frac{d}{dt}(\rho C_p T) = \Delta(K.T) + q + \beta T \frac{dP}{dT} + \mu\phi \quad \text{II.3}$$

Avec :

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

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

q : Puissance volumique dissipée.

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

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

II.4. Les hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices retenues dans notre étude des phénomènes de convection

Mixte sont les suivantes :

- Ecoulement stationnaire bidimensionnel (suivant les coordonnées x, y).
- L'écoulement engendré est laminaire.
- Transfert de chaleur par rayonnement négligeable ainsi que le transfert de masse.
- Fluide de base incompressible et Newtonien.
- Propriétés thermophysiques du fluide (K, C_p, μ, ρ) sont constantes.
- Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable.
- Le nano fluide est Newtonien et incompressible.
- La puissance volumique dissipée est négligeable. $\mu\phi = 0$
- L'approximation de Boussinesq est valide : elle consiste à considérer que les variations de la masse volumique sont négligeables aux niveaux de tous les termes des équations de quantité de mouvement ($\rho_0 = \rho$), sauf au niveau du terme de gravité.
- La variation de ρ en fonction de la température est donnée comme suit :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad \text{II.4}$$

Avec :

T_0 : Température de référence,

β : le coefficient d'expansion thermique à pression constante,

ρ_0 : La masse volumique du fluide à T_0 .

II.5. Formulation des équations de problème (pour un nanofluide)

II.5.1. Equation de continuité

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad \text{II.5}$$

II.5.2. Equations quantité de mouvement (ou équation de Navier – Stokes)

Suivant x :

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \right) \quad \text{II.6}$$

Suivant y :

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left(-\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \right) \quad \text{II.7}$$

II.5.3. Equation de l'énergie

Elle est déduite de la loi de conservation de l'énergie dans la direction x, y comme suite :

$$U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{II.8}$$

α_{nf} : La diffusivité thermique de nanofluide.

II.6. Les conditions aux limites

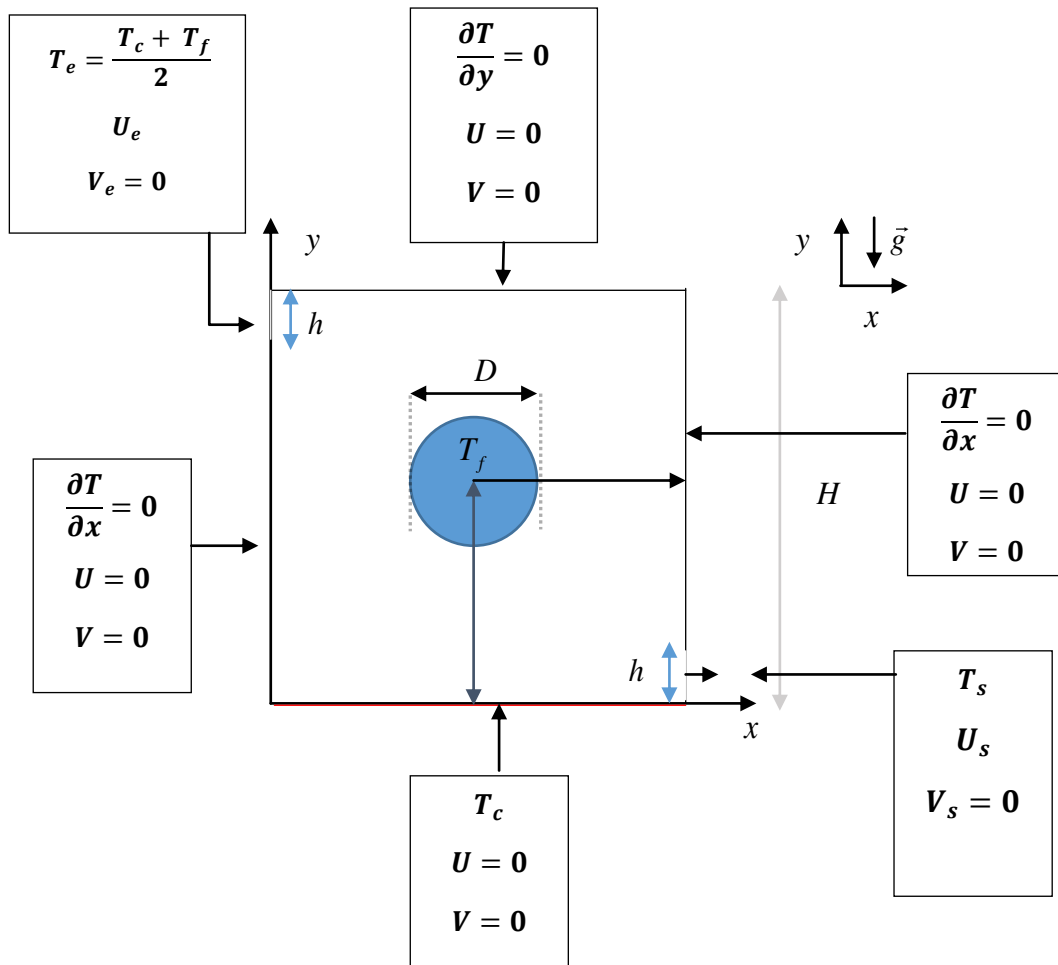


Figure. II.2 : Conditions aux limites.

II.7 : La forme adimensionnelle des équations du modèle mathématique

Dans la pratique, les coefficients d'échange de chaleur par convection sont généralement calculés à partir de l'équation empirique obtenue en établissant une corrélation entre les données expérimentales au moyen de l'analyse dimensionnelle. Pour appliquer l'analyse dimensionnelle, il est indispensable de connaître au préalable les variables qui influencent le phénomène.

II. 7. 1. Grandeurs caractéristiques

Les grandeurs caractéristiques sont définies comme suit :

- H : longueur caractéristique.

- ρV_0^2 : pression caractéristique.
- $T_c - T_0$: température caractéristique.
- V_0 : vitesse caractéristique.

II.7.2. Nombres adimensionnels

- **Le Nombre de Reynolds**

Représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant les équations de Navier-Stokes. On le définit de la manière suivante :

$$\text{Re} = \frac{V_0 H}{\nu}$$

V_0 : vitesse caractéristique du fluide [m/s]

H : dimension caractéristique [m]

ν : Viscosité cinématique du fluide [m²/s]

- **Le nombre de Grashof**

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

$$\text{Gr} = \frac{g \beta (H)^3 (T_c - T_f)}{\nu^2}$$

Il remplace le nombre de Reynolds en convection naturelle.

Où :

g : L'accélération de la pesanteur [m/s²],

β : Le coefficient d'expansion volumique thermique. [K⁻¹],

T_c : La température de la paroi chaude.

T_f : La température de la paroi froide.

- **Nombre de Prandtl**

Le nombre de Prandtl est proportionnel au rapport de la diffusivité de l'impulsion à la diffusivité thermique. Il a décrit l'importance relative des effets thermiques et visqueux. Il peut être exprimé comme suit :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K}$$

- **Le nombre de Nusselt**

En convection, le phénomène de transfert de chaleur à la surface est évalué et caractérisé par le nombre adimensionnel est le nombre de Nusselt, qu'il désigne le rapport entre les quantités de chaleur échangées par convection et par la conduction pure. Le nombre de Nusselt (Nu) est un rapport de la convection à la conduction pure. $Nu = \frac{hL}{\lambda}$.

L : La longueur de la couche de fluide en écoulement entre deux parois solides.

- **Nombre de Rayleigh (Ra)**

Le nombre de Rayleigh est un nombre adimensionnel utilisé en mécanique des fluides et caractérise le transfert de chaleur au sein d'un fluide ; il est donc le paramètre majeur du contrôle de la convection naturelle. L'écoulement de la convection naturelle peut être de régime laminaire, transitoire ou turbulent. Le passage d'un régime à un autre est caractérisé par le nombre de Rayleigh qui est défini comme suit :

$$Ra = Gr.Pr = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}$$

β : Coefficient d'expansion thermique. [K⁻¹]

ν : est la viscosité cinématique du fluide [m².s⁻¹]

g : la gravité [m/s²]

α : Diffusivité thermique [m²/s]

H : est la dimension géométrique [m]

- **Nombre de Richardson (Ri)**

Le nombre de Richardson (Ri) est un nombre sans dimension utilisé notamment en thermodynamique qui a été développé par Lewis Fry Richardson, physicien et mathématicien anglais. Il s'agit du rapport entre l'énergie potentielle gravitationnelle d'une parcelle de fluide et son énergie cinétique :

$$Ri = \frac{\text{energie potentielle}}{\text{energie cinétique}}$$

Le nombre de Richardson s'explique de plusieurs manières :

$$Ri = \frac{g\beta\Delta T L_c}{v^2}$$

II.7.3. Les variables adimensionnelles

Sont données par :

$$x^+ = \frac{x}{H}, \quad y^+ = \frac{y}{H}, \quad U^+ = \frac{U}{V_0}, \quad V^+ = \frac{V}{V_0}$$

$$P^+ = \frac{P}{\rho V_0^2}, \quad \theta = \frac{T - T_f}{T_c - T_f}$$

En introduisant toutes ces variables adimensionnelles, le système d'équations définit antérieurement prend la forme suivante :

- **Forme adimensionnelle des Equation de continuité**

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial x^+} \frac{\partial x^+}{\partial x} = \frac{\partial(U^+ \times V_0)}{\partial x^+} \frac{\partial x^+}{\partial(x^+ \times H)} = \frac{\partial U^+}{\partial x^+} \left(\frac{V_0}{H}\right) \quad \text{II.9}$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial y^+} \frac{\partial y^+}{\partial y} = \frac{\partial(V^+ \times V_0)}{\partial x^+} \frac{\partial y^+}{\partial(y^+ \times H)} = \frac{\partial V^+}{\partial y^+} \left(\frac{V_0}{H}\right) \quad \text{II.10}$$

Substituant (II.9) et (II.10) dans (II.5) :

$$\frac{\partial U^+}{\partial x^+} \left(\frac{V_0}{H}\right) + \frac{\partial V^+}{\partial y^+} \left(\frac{V_0}{H}\right) = 0$$

Alors :

$$\frac{\partial U^+}{\partial x^+} + \frac{\partial V^+}{\partial y^+} = 0 \quad \text{II.11}$$

- **Forme adimensionnelle des équations de quantité de mouvement**

- **L'équation de quantité de mouvement suivant x**

$$U \frac{\partial U}{\partial x} = U^+ \times V_0 \left(\frac{\partial U}{\partial x^+} \frac{\partial x^+}{\partial x}\right) = U^+ \times V_0 \frac{\partial U^+}{\partial x^+} \left(\frac{V_0}{H}\right) = \frac{V_0^2}{H} U^+ \frac{\partial U^+}{\partial x^+} \quad \text{II.12}$$

$$V \frac{\partial U}{\partial y} = V^+ \times V_0 \left(\frac{\partial U}{\partial y^+} \frac{\partial y^+}{\partial y}\right) = V^+ \times V_0 \frac{\partial U^+}{\partial y^+} \left(\frac{V_0}{H}\right) = \frac{V_0^2}{H} V^+ \frac{\partial U^+}{\partial y^+} \quad \text{II.13}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial(P^+ \times \rho_{nf} \times V_0^2)}{\partial x^+} \frac{\partial x^+}{\partial x} = \rho_{nf} \times V_0^2 \frac{\partial P^+}{\partial x^+} \left(\frac{1}{H}\right) = \frac{\rho_{nf} \times V_0^2}{H} \frac{\partial P^+}{\partial x^+} \quad \text{II.14}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial x^+} \frac{\partial x^+}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V_0}{H} \frac{\partial U^+}{\partial x^+} \right) = \frac{V_0}{H} \frac{\partial}{\partial x^+} \left(\frac{\partial U^+}{\partial x^+} \right) \frac{\partial x^+}{\partial x} = \left(\frac{V_0}{H^2} \right) \frac{\partial^2 U^+}{\partial x^{+2}} \quad \text{II.15}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial U}{\partial y^+} \frac{\partial y^+}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V_0}{H} \frac{\partial U^+}{\partial y^+} \right) = \frac{V_0}{H} \frac{\partial}{\partial y^+} \left(\frac{\partial U^+}{\partial y^+} \right) \frac{\partial y^+}{\partial y} = \left(\frac{V_0}{H^2} \right) \frac{\partial^2 U^+}{\partial y^{+2}} \quad \text{II.16}$$

La substitution de (II.12), (II.13), (II.14), (II.15) et (II.16) dans (II.6) donne :

$$U^+ \frac{\partial U^+}{\partial x^+} + V^+ \frac{\partial U^+}{\partial y^+} = - \frac{\partial P^+}{\partial x^+} + \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 U^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 U^+}{\partial y^{+2}} \right] \quad \text{II.17}$$

• **L'équation de quantité de mouvement suivant y**

$$U \frac{\partial V}{\partial x} = U^+ \times V_0 \left(\frac{\partial V}{\partial x^+} \frac{\partial x^+}{\partial x} \right) = U^+ \times V_0 \left(\frac{\partial V^+}{\partial x^+} \right) \frac{V_0}{H} = \frac{V_0^2}{H} U^+ \frac{\partial V^+}{\partial x^+} \quad \text{II.18}$$

$$V \frac{\partial V}{\partial y} = V^+ \times V_0 \left(\frac{\partial V}{\partial y^+} \frac{\partial y^+}{\partial y} \right) = V^+ \times V_0 \left(\frac{\partial V^+}{\partial y^+} \right) \frac{V_0}{H} = \frac{V_0^2}{H} V^+ \frac{\partial V^+}{\partial y^+} \quad \text{II.19}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial V}{\partial x^+} \frac{\partial x^+}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V_0}{H} \frac{\partial V^+}{\partial x^+} \right) = \frac{V_0}{H} \times \frac{\partial}{\partial x^+} \left(\frac{\partial V^+}{\partial x^+} \right) \frac{\partial x^+}{\partial x} = \left(\frac{V_0}{H^2} \right) \frac{\partial^2 V^+}{\partial x^{+2}} \quad \text{II.20}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial V}{\partial y^+} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial V^+}{\partial y^+} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V_0}{H} \frac{\partial V^+}{\partial y^+} \right) = \frac{V_0}{H} \times \frac{\partial}{\partial y^+} \left(\frac{\partial V^+}{\partial y^+} \right) \frac{\partial y^+}{\partial y} = \left(\frac{V_0}{H^2} \right) \frac{\partial^2 V^+}{\partial y^{+2}} \quad \text{II.21}$$

$$\frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} (T - T_f) g = (\rho\beta)_{nf} \times g (T_f + \theta (T_c - T_f) - T_f) = \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} \times g (\theta \times \Delta T) = \left(\frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} \right) \times g \times \Delta T \theta \quad \text{II.22}$$

La substitution de (II.18), (II.19), (II.20), (II.21) et (II.22) dans (II.7) :

$$U^+ \frac{\partial V^+}{\partial x^+} + V^+ \frac{\partial V^+}{\partial y^+} = - \frac{\partial P^+}{\partial y^+} + \frac{1}{Re} \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left[\frac{\partial^2 V^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 V^+}{\partial y^{+2}} \right] + Ri \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} \theta \quad \text{II.23}$$

➤ **Forme adimensionnelle de l'équation d'énergie :**

$$U \frac{\partial T}{\partial x} = U^+ V_0 \left(\frac{\partial T}{\partial x^+} \frac{\partial x^+}{\partial x} \right) = U^+ V_0 \Delta T \left(\frac{\partial \theta}{\partial x^+} \right) = \left(\frac{V_0 \Delta T}{H} \right) U^+ \frac{\partial \theta}{\partial x^+} \quad \text{II.24}$$

$$V \frac{\partial T}{\partial y} = V^+ V_0 \left(\frac{\partial T}{\partial y^+} \frac{\partial y^+}{\partial y} \right) = V^+ V_0 \Delta T \left(\frac{\partial \theta}{\partial y^+} \right) = \left(\frac{V_0 \Delta T}{H} \right) V^+ \frac{\partial \theta}{\partial y^+} \quad \text{II.25}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x^+} \frac{\partial x^+}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Delta T}{H} \frac{\partial \theta}{\partial x^+} \right) = \frac{\Delta T}{H} \frac{\partial}{\partial x^+} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x^+} \right) \frac{\partial x^+}{\partial x} = \frac{\Delta T}{H^2} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{+2}} \quad \text{II.26}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y^+} \frac{\partial y^+}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\Delta T}{H} \frac{\partial \theta}{\partial y^+} \right) = \frac{\Delta T}{H} \frac{\partial}{\partial y^+} \left(\frac{\partial \theta}{\partial y^+} \right) \frac{\partial y^+}{\partial y} = \frac{\Delta T}{H^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^{+2}} \quad \text{II.27}$$

La substitution de (II.24), (II.25), (II.26), et (II.27) dans (II.7) :

$$\left(\frac{V_0 \Delta T}{H} \right) U^+ \frac{\partial \theta}{\partial x^+} + \left(\frac{V_0 \Delta T}{H} \right) V^+ \frac{\partial \theta}{\partial y^+} = \frac{\Delta T}{H} \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^{+2}} \right) U^+ \frac{\partial \theta}{\partial x^+} + V^+ \frac{\partial \theta}{\partial y^+} = \frac{1}{V_0 H} \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^{+2}} \right)$$

Alors

$$U^+ \frac{\partial \theta}{\partial x^+} + V^+ \frac{\partial \theta}{\partial y^+} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \cdot \frac{1}{Re.Pr} \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^{+2}} \right) \quad \text{II.28}$$

Donc le système des équations adimensionnelles décrivant le phénomène de la convection mixte sujet de notre étude s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial U^+}{\partial x^+} + \frac{\partial V^+}{\partial y^+} = 0$$

$$U^+ \frac{\partial U^+}{\partial x^+} + V^+ \frac{\partial U^+}{\partial y^+} = - \frac{\partial P^+}{\partial x^+} + \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 U^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 U^+}{\partial y^{+2}} \right]$$

$$U^+ \frac{\partial V^+}{\partial x^+} + V^+ \frac{\partial V^+}{\partial y^+} = - \frac{\partial P^+}{\partial y^+} + \frac{1}{Re} \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left[\frac{\partial^2 V^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 V^+}{\partial y^{+2}} \right] + Ri \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} \theta$$

$$U^+ \frac{\partial \theta}{\partial x^+} + V^+ \frac{\partial \theta}{\partial y^+} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \cdot \frac{1}{Re.Pr} \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^{+2}} \right)$$

II.8. les conditions aux limites adimensionnelles

Tableau. II.1 : Conditions aux limites hydrodynamiques et thermiques.

Limite	Conditions hydrodynamiques	Conditions thermiques
$0 \leq x^+ \leq 1, y^+ = 0$ (Paroi inférieure)	$U^+ = 0, V^+ = 0$	$\theta = 1$
$0 \leq x^+ \leq 1, y^+ = 1$ (Paroi supérieure)	$U^+ = 0, V^+ = 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial y^+} = 0$
$x^+ = 1, 0 \leq y^+ \leq 1$ (Paroi droite)	$U^+ = 0, V^+ = 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial x^+} = 0$
$x^+ = 0, 0 \leq y^+ \leq 1$ (paroi gauche)	$U^+ = 0, V^+ = 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial x^+} = 0$
$x^+ = 0, 0.9 \leq y^+ \leq 1$ (Entrée)	$U^+ = 1, V^+ = 0$	$\theta = \frac{1}{2}$
$x^+ = 1, 0 \leq y^+ \leq 0.1$ (sortie)	$\frac{\partial U^+}{\partial x^+} = 0, V^+ = 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial x^+} = 0$
$0.4 \leq x^+ \leq 0.6, 0.4 \leq y^+ \leq 0.6$ (Cylindre)	$U^+ = 0, V^+ = 0$	$\theta = 0$

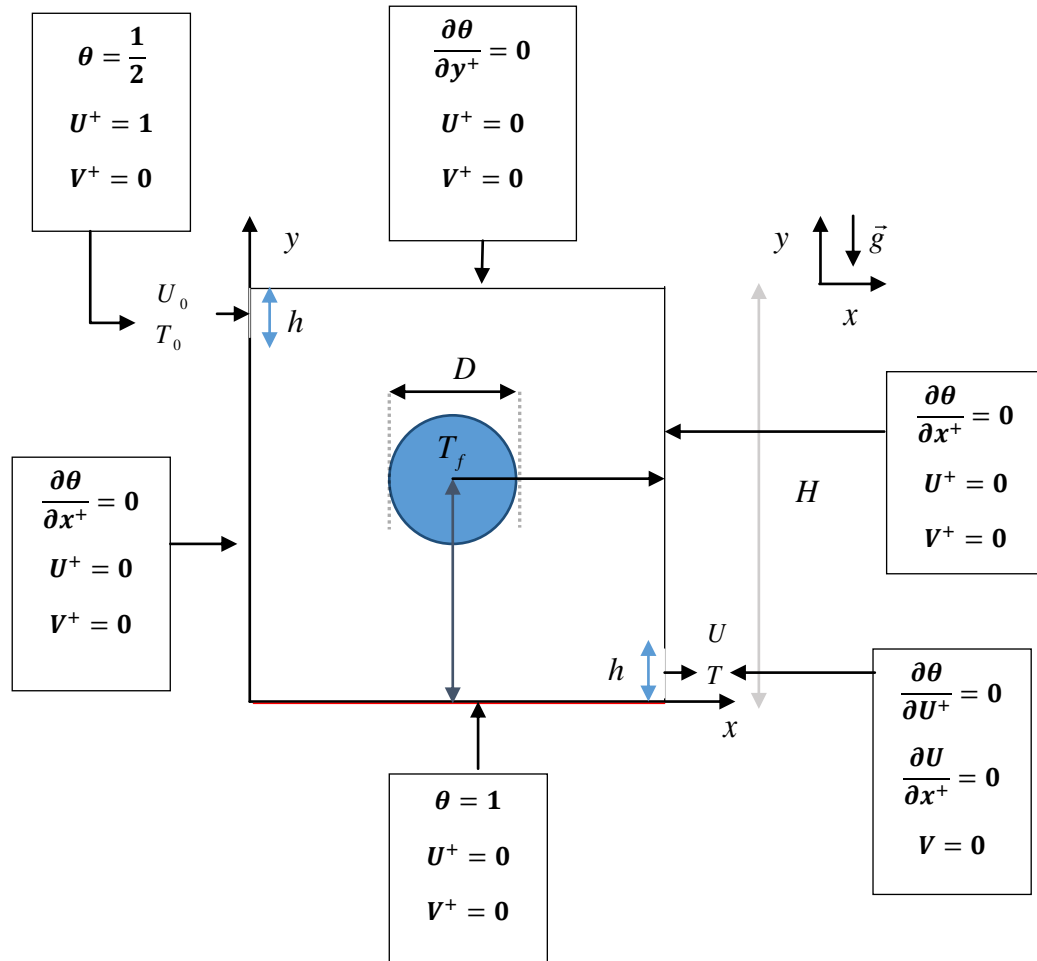


Figure. II.3 : Condition aux limites.

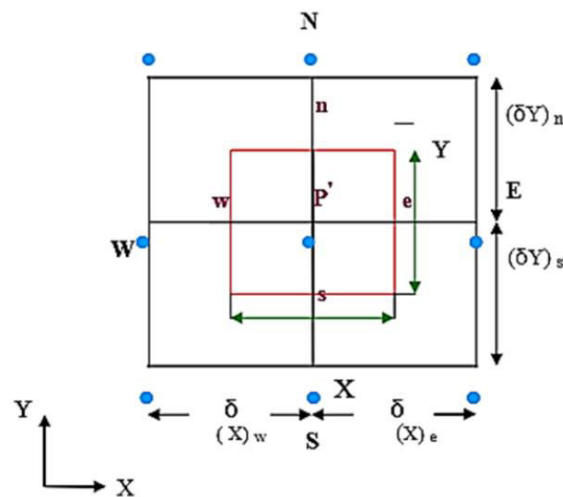
II.9 Modèle Numérique

II.9.1 Procédure Numérique

Pour obtenir une solution numérique du problème étudié, on doit transformer les équations différentielles du modèle mathématique au moyen d'un processus de discrétisation en un format facile pour le processus numérique. Ce format n'est autre que le système d'équations algébriques obtenu après la discrétisation. Parmi les méthodes numériques les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulement et de transfert de chaleur, on peut citer la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis.

La méthode des volumes finis est à l'origine de la majorité des codes de calculs (Fluent, CFD,...). La méthode des volumes finis qui se distingue par sa fiabilité quant aux résultats, son adaptation au problème physique, sa garantie pour la conservation de la masse et de quantité de mouvement et de tout scalaire transportable sur chaque volume de contrôle et dans tout le domaine de calcul, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes numériques. Il existe un certain nombre de codes industriels, aux meilleurs performants, permettant la prédiction d'écoulement de fluides (FLUENT, PHOENICS, STARCD, FEMLAB, CFD-ACE, FLOTRAN, CFDS-FLOW3D ...).

Dans notre travail, nous avons effectué une simulation numérique moyennant le code de calcul « FLUENT 6.3.26 », qui acquiesce la résolution des équations de transport par la méthode des volumes finis. Des paramètres adaptés d'écoulement et des conditions aux



limites adéquates sont utilisés. Nous avons réalisé le maillage par le pré-logiciel « GAMBIT 2.4.6 »

Figure. II.4 : Représentation d'un volume de contrôle bidimensionnel.

II.9.2 Maillage

Le maillage est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection représente un nœud. La discrétisation du domaine est obtenue par un maillage constitué d'un réseau de points (nœuds). Ainsi un élément de volume (volume de contrôle) est défini autour de chaque nœud. Les grandeurs scalaires sont stockées dans le nœud(P) du maillage, tandis que les grandeurs vectorielles sont stockées aux milieux des segments reliant les nœuds. L'équation générale de transport est intégrée sur le volume de contrôle associé aux variables scalaires et les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur le volume de contrôle associé aux composantes de la vitesse.

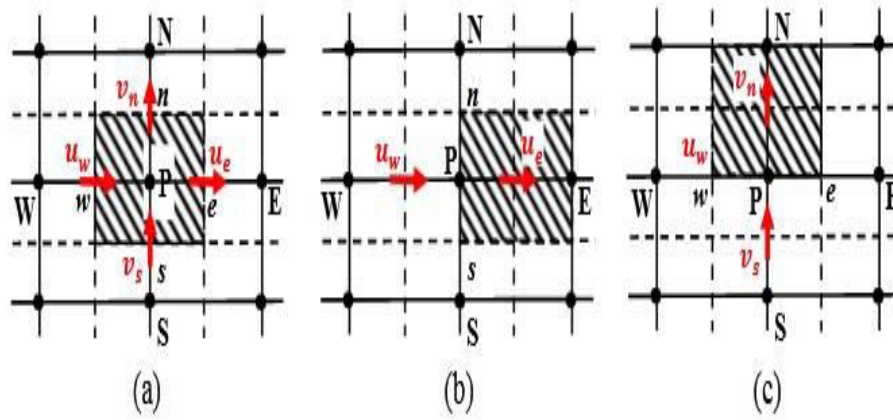


Figure II.5 : Schéma du maillage

La figure .II.6, montre la grille utilisée sur le manilleur GAMBIT. Les équations de continuité, de quantité du mouvement bidimensionnelle et d'énergie sont résolues numériquement en utilisant le solveur Fluent.

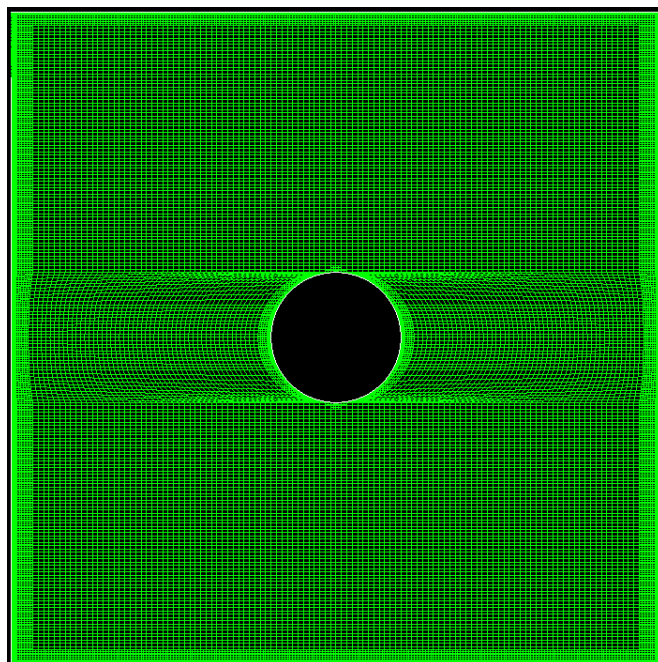


Figure II.6 : Le maillage utilisé.

La convergence atteinte pour un nombre d'itération environ 796 itérations Avec une erreur d'ordre 10^{-5} , Figure. II.7.

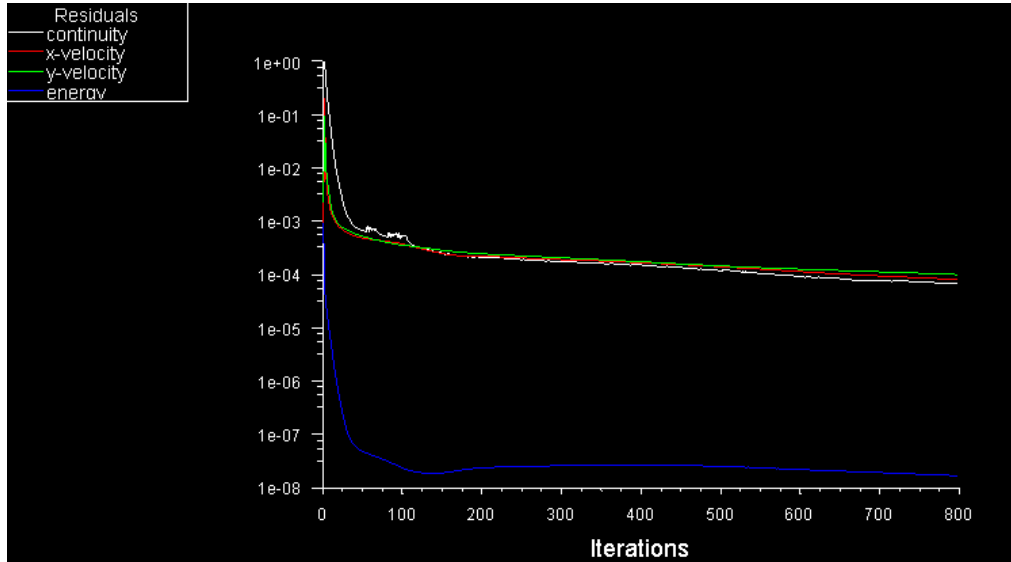


Figure II.7 : Evolution de résidu.

II.9.3 Présentation de GAMBIT et de FLUNET

La résolution par le logiciel de simulation numérique de l'écoulement FLUNET nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

- **GAMBIT**

Il permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. La définition des conditions aux limites appropriées, au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, se fait également à ce niveau. Le maillage est l'une des étapes importantes de la modélisation numérique. En effet, du type de maillage et de son affinement dépendront la précision des résultats et le temps de calcul. Sous Gambit, on peut utiliser plusieurs types de maillages

- ✓ Maillage structuré.
- ✓ Maillage non structuré.



- ✓ Maillage hybride.

Figure II.8 : l'interface de Gambit

- **FLUENT**

FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité. Les types de mailles supportées sont :

- Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales
- Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales
- Des mailles (hybrides) mixtes.

FLUENT est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par ce langage (par exemple allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur le même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace. FLUENT s'utilise à travers une interface graphique, l'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures. Ainsi, à titre non exhaustif, FLUENT permet les capacités de modélisation suivantes :

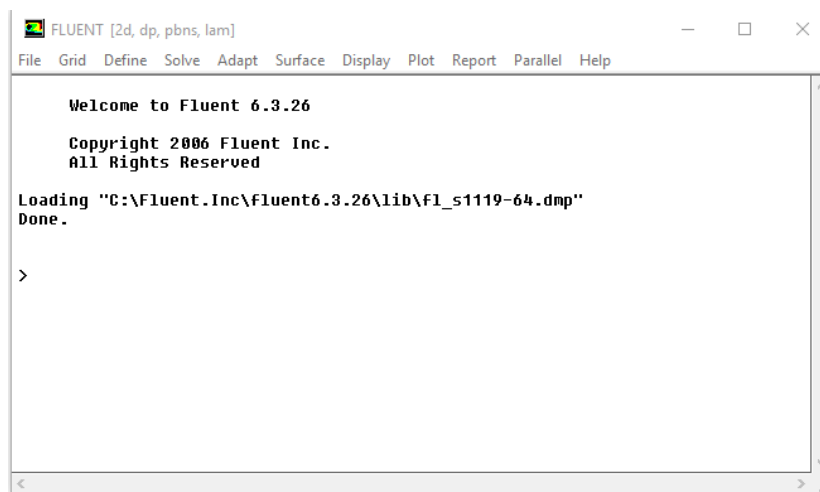
- Ecoulements 2D ou 3D.
- Ecoulement stationnaire ou instationnaire.
- Ecoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques).
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents.
- Fluide Newtonien ou non.
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (conjugue) ou radiatif.
- Ecoulements avec changements de phases.
- Ecoulements en milieu poreux.

Fluent emploie la méthode des volumes finis comme procédé de discrétisation des équations qui gouvernent l'écoulement, telle que l'équation de continuité et quantité de mouvement et de l'énergie. En utilisant cette technique basée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle, "Fluent" passe par les étapes suivantes :

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (maillage) de calcul.
- Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, les connues telles que : vitesses, pressions et températures.

Le choix entre ces modèles se base principalement sur les résultats que donne chacun des modèles suivant les conditions aux limites prédéfinies. Il est vrai qu'un modèle peut donner de meilleurs résultats par rapport à un autre, mais ceci est dû principalement à la nature des cas étudiés et à la correspondance du modèle de turbulence avec les conditions aux limites.

Figure II.8 : l'interface de Fluent.



Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. Introduction

Dans ce travail, une étude numérique de transfert de chaleur par la convection mixte laminaire stationnaire dans une cavité ventilée contenant un cylindre froid T_f au centre de ce dernier a été présenté. La cavité est remplie par différents nano-fluides (nano-fluide et nano-fluide hybride) et contenant deux portes (Orifices) d'entrée et de sortie de l'écoulement.

La cavité est de forme carrée et chauffée iso-thermiquement par une température chaude T_C au niveau de la paroi inférieure, tandis que les autres parois sont maintenues adiabatiques. L'écoulement externe entrant dans la partie supérieure de la paroi verticale gauche avec une vitesse u_1 et à une température $T_1 = (T_c - T_f) / 2$ et sortant dans la partie inférieure de la paroi verticale droite. L'accélération de la pesanteur \vec{g} agit parallèlement aux parois latérales. Les équations régissent l'écoulement de convection mixte à l'intérieur de la cavité sont résolus par les méthodes des volumes finis. Le nombre de Grashof varie, et le nombre de Reynolds (Re) fixé de telle sorte que le nombre de Richardson prend les valeurs : $Ri = 0.1, 1, 10$ et 100 ($Ri = Gr/Re^2$). Les résultats obtenus ont été validés avec d'autres travaux numériques. L'influence des paramètres de l'écoulement sur le comportement de la structure globale de ce dernier et de champ thermique est présentée.

Les simulations numériques sont effectuées dans le cas d'un fluide pur l'eau, et des mélanges de ce fluide de base et des nanoparticules (nano-fluide et nano-fluide hybride) (**Ag, Cu, Al₂O₃ et TiO₂**). L'effet de variation du nombre de Richardson et les fractions volumique des nanoparticules qui comprise entre (0% et 8%) a été également examiné profondément pour avoir un bon refroidissement des montages électriques d'un côté et les effets des paramètres pertinents sur l'écoulement hydrodynamique et le transfert de chaleur dans notre configuration d'un autre côté. Nous allons subdiviser cette étude en trois parties principales :

- Effet de nombre de Richardson ;
- Effet de types des nanoparticules ;
- Effet de concentration des nanoparticules.

Nous présentons dans ces études les isothermes et les lignes de courant, ainsi nous avons affiché les profils des températures et les vitesses au plan médium. Nous terminons par une étude relative au transfert thermique en considérant le nombre de Nusselt local et moyen avec différentes fractions volumiques.

III.2. Choix du maillage

Afin de déterminer une grille (maillage) appropriée pour la simulation numérique, une cavité ventilée carrée remplie de nanofluide Cu-eau ($\phi=5\%$) ayant un cylindre de refroidissement circulaire de diamètre ($D=0,2$) est analysée pour un nombre de Richardson ($Ri=0,1$). Différents maillages uniformes sont considérés dans cette étude: 100x160, 110x180, 120x200 et 130x200 nœuds, Pour examiner l'influence de la taille et du nombre des nœuds sur la solution exprimée par le transfert thermique à la partie active « chauffée ».

Donc nous mettons en évidence par cette étude de maillage, l'indépendance des résultats obtenus des maillages considérés pour un choix bien optimisé entre le de temps de calcul et la précision. Le nombre de Nusselt moyen obtenu à l'aide de différentes grilles pour des cas particuliers est présenté dans la figure III.1. Comme on peut le constater à partir de la figure, une grille 120×200 est suffisamment fine pour le calcul numérique.

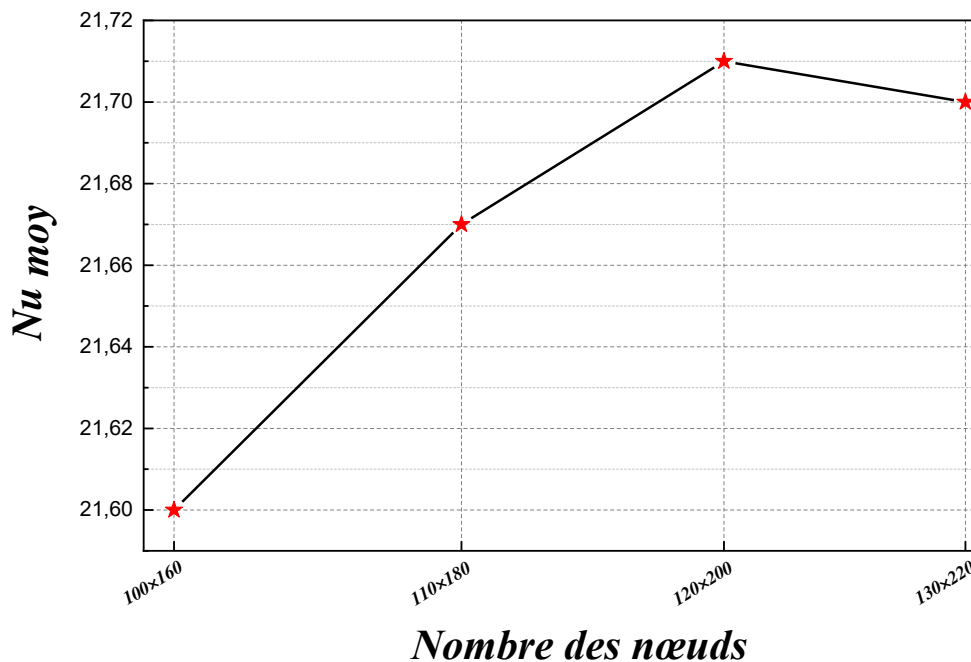


Figure III.1: Convergence du nombre de Nusselt moyen le long de la partie chauffée pour $Ri=0.1$ (nanofluide Cu-eau ($\phi = 5\%$)).

III.3. Validation des résultats

De manière à vérifier l'exactitude des résultats numérique obtenus dans le présent travail avec le code FLUENT, une validation de notre simulation numérique a été faite en comparant avec les études numériques Boulahia et al (2018)[40]. Qui ont étudié une cavité rectangulaire avec des parois adiabatiques chauffées en bas (température imposé fixe). Nos résultats sont effectués dans les mêmes conditions.

La comparaison concerne les profils de nombre du Nusselt moyen, à $Ri = 0.1$ et $Gr = 10^4$, entre présent travail et les calculs de Boulahia et al (2018)[40]. comme montré sur la figure.III.2. ci-dessous.D'après cette figure, il est clair que nos résultats numériques sont en bon accord avec les résultats obtenus par Boulahia et al (2018)[40].

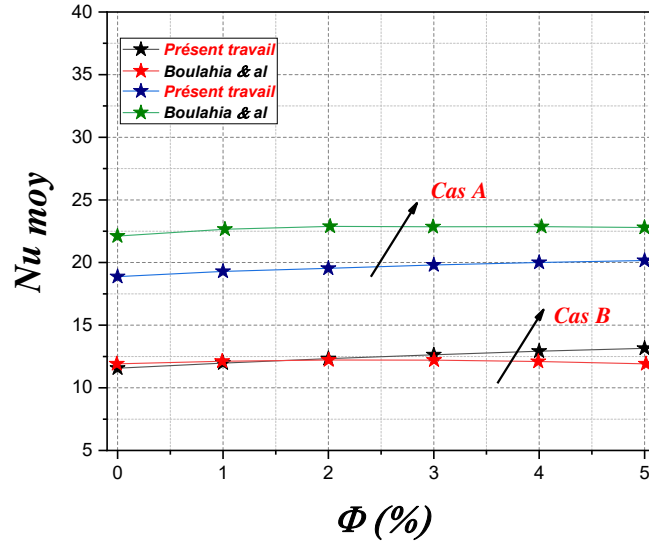


Figure III.2: Comparaison de la variation du Nusselt moyen au niveau de la paroi chaude.

III.3. Discussion des résultats

III.3.1. Effet du nombre de Richardson (Ri)

Cette étude a permis de prédire le comportement de la structure de l'écoulement entre une structure multicellulaire dominé par une convection naturelle lorsque le nombre de Richardson est élevé, et une structure multicellulaire dominé par une convection forcée lorsque le nombre de Richardson est faible. Les résultats présentent un cas d'étude l'influence du nombre de Richardson sur la structure globale de l'écoulement, en fixant le nombre de Reynolds à $Re = 100$, et en variant le nombre de Grashof dans une gamme de tel sorte que le nombre de Richardson prend les valeurs suivantes : $Ri = 0.1, 1, 10$ et 100 , pour montrer l'effet des forces de flottabilité sur les iso-ligne de température et celle de l'apparition des tourbillons. Ceci explique le critère de l'instabilité et pour étudier l'effet de l'accélération de l'écoulement sur le comportement et la structure. On présente les isothermes et les fonctions de ligne des courantes pour donner plus de détail à ce phénomène.

Pour clarifier davantage, nous ne montrerons certains résultats qu'à titre d'exemple uniquement, et cela est dû au grand nombre de résultats obtenus

➤ *Champs thermiques :*

Ce champ est représenté par les contours des températures dans les figures (figure III.3 et figure III.4) pour divers Ri et $Re=100$, à ($\varphi=0\%$, $\varphi=4\%$ et $\varphi=8\%$), pour les nanoparticules Hybride *Ag,Cu/Eau* et les nanoparticule *Cu/Eau*. Avec l'augmentation du nombre de Richardson, les températures soit la plus faible adjacent au centre de cavité et augmente au fur et à mesure que vous vous rapprochez aux parois de la cavité. On remarque que les températures élevées sont localisées dans des espaces étroits au voisinage de la paroi chaude, qui correspondent à l'épaisseur de la couche limite thermique. (Partie rouge sur les figures mentionnées).

Pour un nombre de Richardson compris entre 0.1 et 01 (convection forcée prédominée) nous constatons un échauffement du fluide à partir de l'entrée, tout au long de la paroi chauffée et la paroi verticale gauche jusqu'à la sortie, où la température varie graduellement de la partie chauffée vers la partie supérieure froide, on remarque aussi l'absence de la stratification thermique dans la cavité.

Pour du nombre de Richardson supérieur à 1. Il montre une légère variation que celle dans le champ thermique précédent à des nombres de Richardson inférieurs. A partir de $Ri = 10$, les couches limites thermiques deviennent plus minces et les isothermes deviennent stratifiées où la conduction domine le régime d'écoulement, les isothermes sont distribuées à proximité de la paroi chaude. En outre, dans ces figures, les isothermes sont affectées par la présence de nanoparticules. En fait, l'existence de nanoparticules provoque une accumulation des isothermes près de la paroi chaude ce qui signifie une amélioration du taux de transfert de chaleur ce qui est indiqué par l'augmentation du nombre de Nusselt.

Si on compare les isothermes dans les figures pour différentes valeurs de Ri , on peut noter que lorsque le Ri augmente, les isothermes se rapprochent les unes des autres dans la zone située près du mur inférieur chauffé c.-à-d. que les gradients de la température deviennent plus élevés à proximité de la paroi inférieure chauffée. Ceci implique une augmentation du transfert thermique à travers la paroi inférieure de l'enceinte pour un plus haut nombre de Ri . Donc on peut dire que les températures les plus élevées sont celles du fluide qui circule parallèlement à la paroi chauffée, tandis que les températures les plus basses sont celles du fluide qui circule parallèlement aux parois froides. Ainsi le fluide s'échauffe en contact de la région chauffée, se refroidit en contact des parois froides. Pour plus de justification les figures (III.5 et III.6) est illustrées respectivement l'évolution de la température le long de la direction Y à ($x = 0.25 H$), ($x = 0.5 H$) et ($x = 0.75 H$) de différents nombres de Richardson

pour les nanofluides $Ag/Eau(\phi=8\%)$ et $Ag/Eau(\phi=8\%)$ à l'intérieur de l'enceinte, où nous constatons des valeurs comprises entre une valeur maximale correspondante à l'extrémité de l'enceinte et une faible valeur correspondante à la température au milieu de l'enceinte (cylindre froid). On remarque que la température diminue avec l'augmentation de l'altitude, juste après la position ($Y = 0,032\ m$) au milieu de l'enceinte (cylindre froid). La figure se compose de deux zones distinctes, de ($Y = 0\ m$) à ($Y = 0,032\ m$): la température diminue avec l'augmentation de l'altitude et reste presque constante puis juste après la position ($Y = 0,042\ m$) la température s'accroît sensiblement, jusqu'à la valeur de la paroi supérieure. En outre, on montre aussi que l'amélioration produite par la génération d'entropie et du transfert thermique augmente considérablement avec l'augmentation du nombre de Richardson.

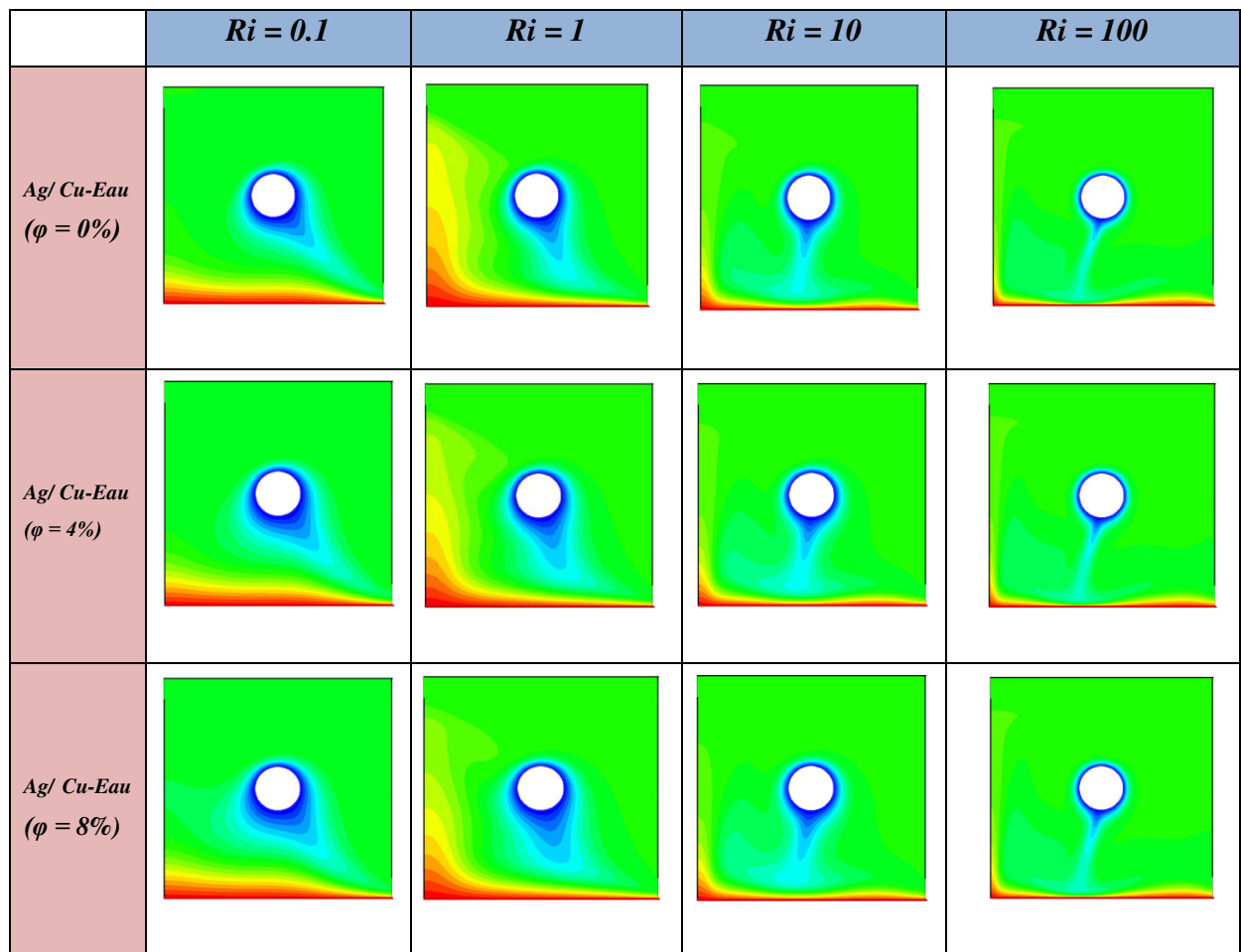


Figure III.3: Les contours des Isothermes du ($Ag/Cu-Eau$), pour différents nombres de Richardson (Ri) et différentes fractions volumiques.

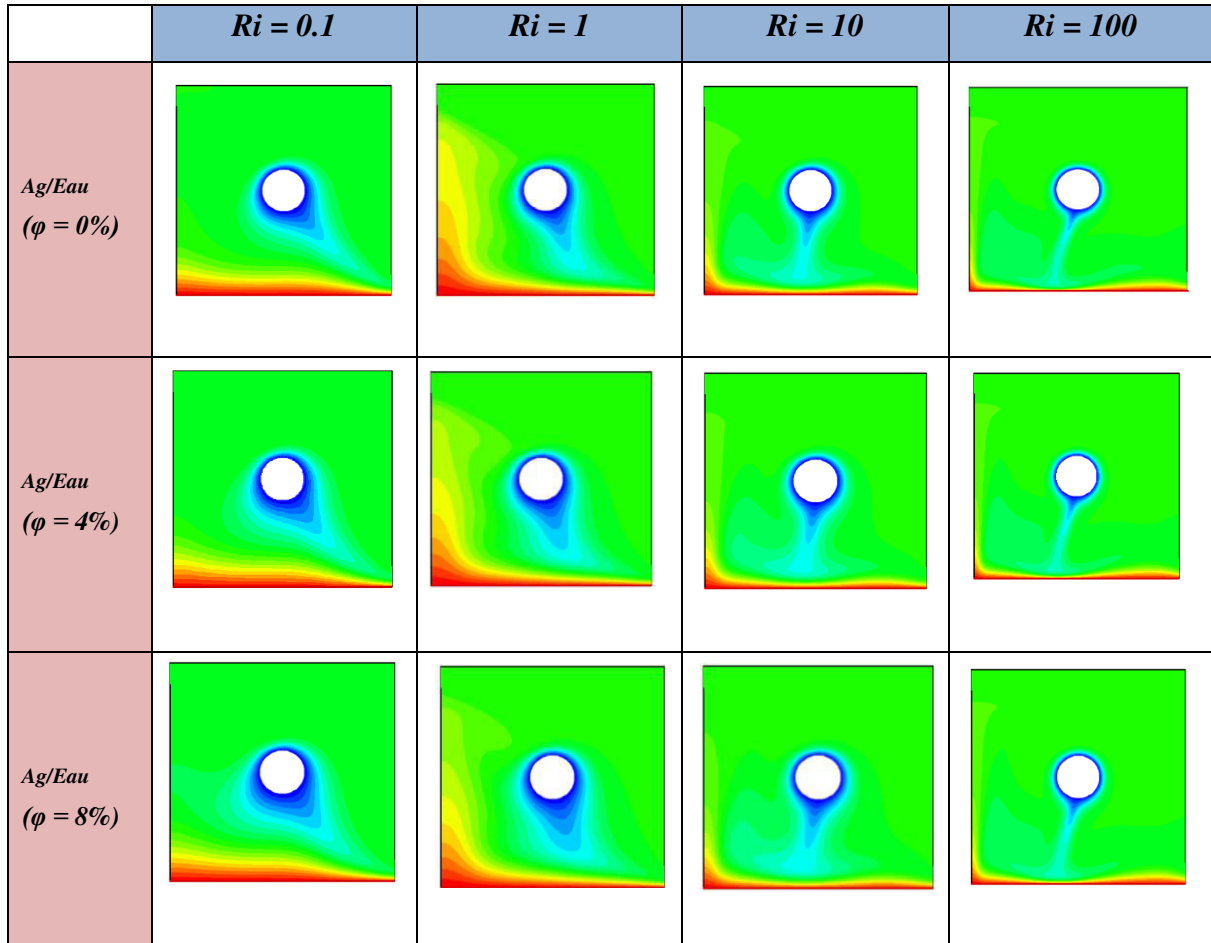


Figure III.4: Les contours des Isothermes du (Ag/Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri) et différents fraction volumiques.

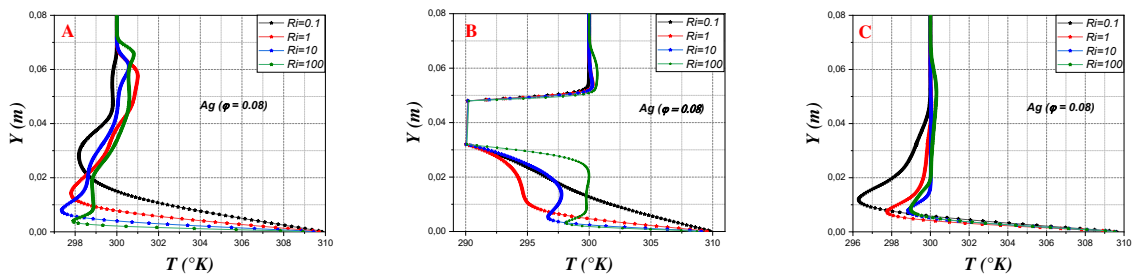


Figure III.5: Profil de la température le long de différents altitude de l'enceinte du (Ag/Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri).
 A ($x = 0.25H$), B ($x = 0.5H$) et C ($x = 0.75H$).

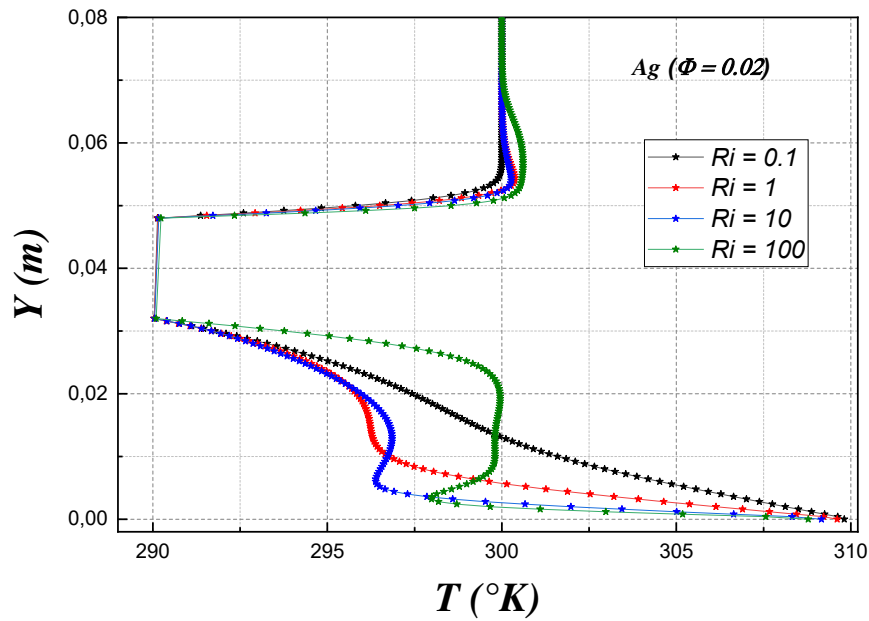


Figure III.6: Profil de la température le long de la section médiane de l'enceinte ($x = 0.5H$).du (Ag/Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri).

➤ **Champs dynamiques :**

Ce champ est représenté par les contours des lignes de courant dans les figures (III.7 et III.8). Respectivement, pour différents nombres de Richardson (Ri) et différents fractions volumiques des nanofluides (Ag/Cu-Eau) et (Ag/Eau). On remarque la formation de deux cellules contrarotatives dont l'une tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et la deuxième tourne dans le sens contraire. Cette solution présente un écoulement asymétrique pour toutes les valeurs du nombre de Richardson. On peut voir aussi sur les figures qu'il existe certaines différences dans les lignes de courant du fluide pur et du nanofluide / et nanofluide hybride, que nous pouvons expliquer par la viscosité plus élevée du nanofluide par rapport à celle du fluide pur qui augmente la diffusion de l'élan dans le nanofluide. Généralement, le fluide d'entrée se déplace sur le cylindre central avant de quitter la cavité, le flux arrivant frappe le côté gauche du cylindre froid, où le flux est dirigé de l'orifice d'entrée vers le haut (côté gauche) et le bas (côté droite) du refroidisseur (cylindre froid) et se déplace vers la sortie. Donc pour des faibles valeurs du nombre de Richardson $Ri < 1$ on remarque un écoulement principal tend à traverser la cavité suivant la diagonale et la formation des cellules contrarotatif (convection forcée est prédominée). En augmentant le nombre de Richardson ($1 \leq Ri \leq 10$), la petite cellule située au coin inférieur gauche est disparaître par l'effet de l'augmentation des forces de flottabilité. Ceci conduit à un changement important dans la forme et la taille de cellule située au coin supérieur gauche.

C'est le déclenchement de la convection naturelle qui sera prédomine, pour des nombres élevés de Richardson Ri.

A partir de $Ri = 10$, quand la convection naturelle devient importante, la taille du vortex devient de plus en plus importante (La majeure partie gauche de la cavité est occupée par une zone de recirculation). Ainsi un écoulement important le long de la paroi haute se prolonge le long de la paroi verticale droite jusqu'à la sortie.

On remarque aussi avec l'augmentation du nombre de Richardson, l'intensité de la recirculation à l'intérieur de l'enceinte augmente et les centres des lignes de courant se déplacent vers le bas. Il est observé que, même si la forme des cellules ne change pas avec le pourcentage d'augmentation des fractions volumiques, leur intensité augmente par l'addition des nanoparticules.

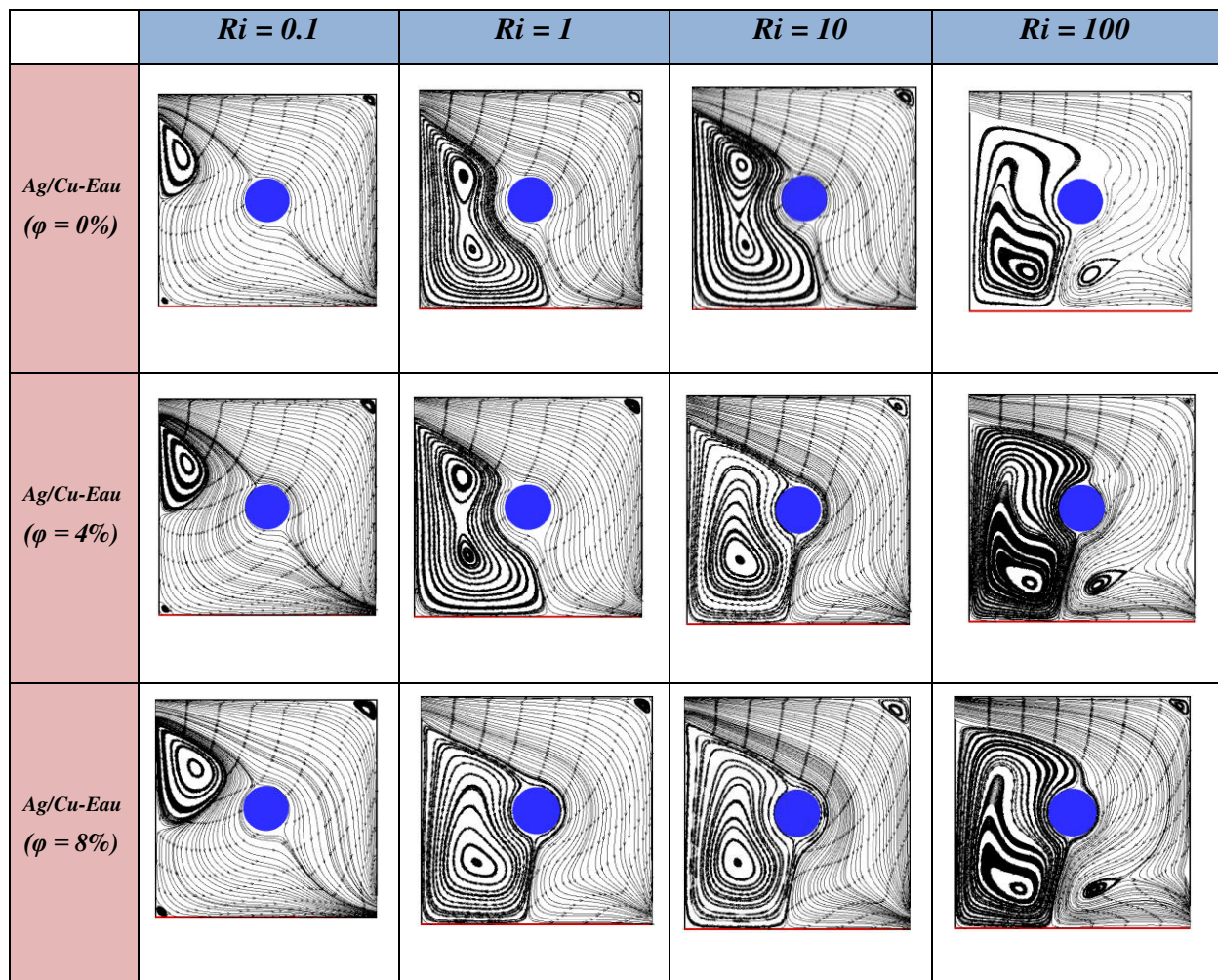


Figure III.7: Les contours des lignes de courant dans l'enceinte du (Ag/Cu-Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri) et différents fraction volumiques.

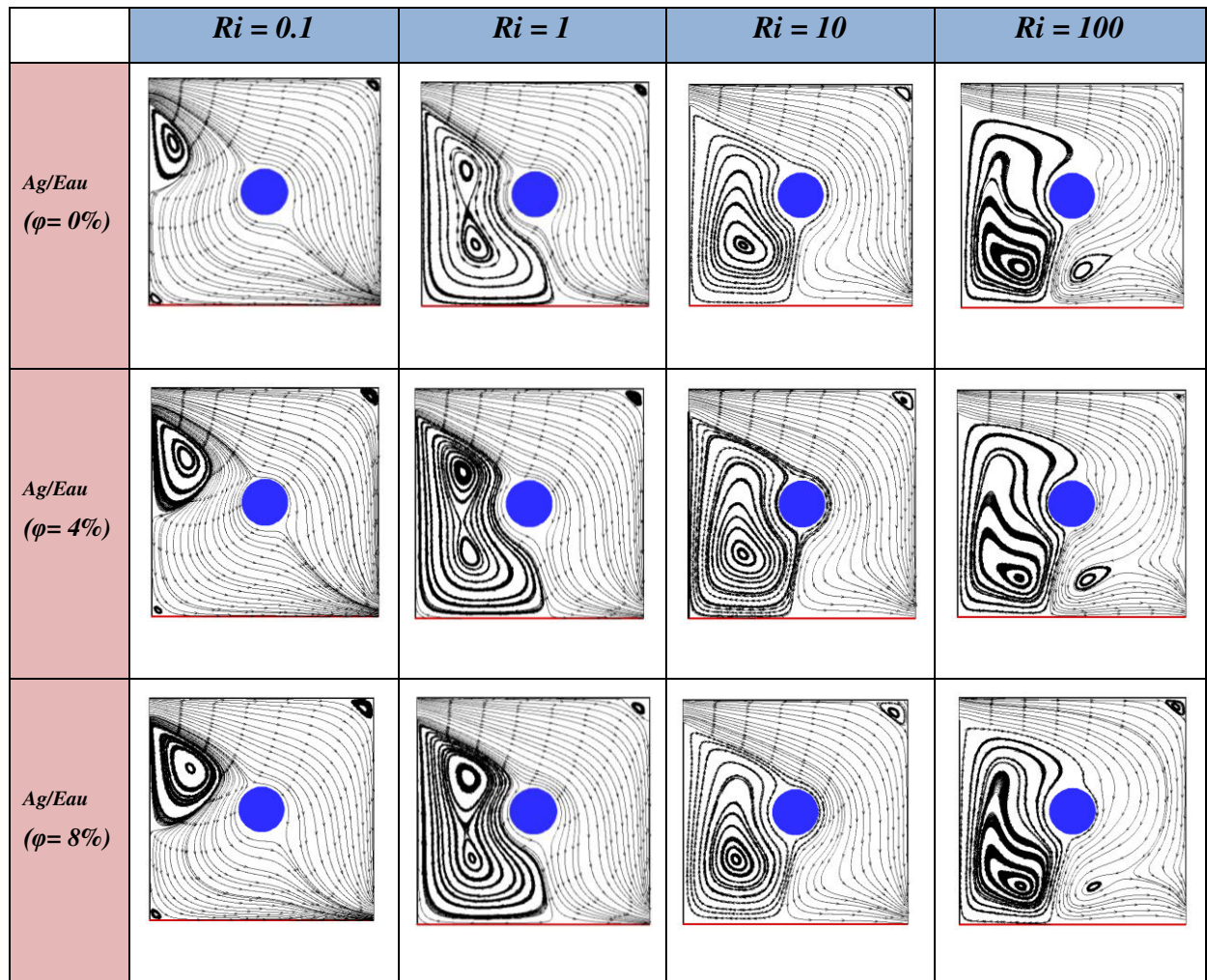


Figure III.8: Les contours des lignes de courant dans l'enceinte du (Ag/Eau), pour différents nombres de Richardson (Ri) et différents fraction volumiques.

Le profil de la vitesse transversales en fonction de (Y) à mi-longueur ($x = 0.5 H$) et ($x = 0.25 H$ et $x = 0.75 H$) de la cavité pour les différents nombres de Richardson est représenté sur la figure.III.8, et La figure III.9. Présente les profils de vitesse longitudinales le long de la partie centrale de l'enceinte ($y = 0.5 H$) et aussi dessus et dessous de la cylindre froid. Les vecteurs de vitesses montrent clairement une zone de recirculation qui se produit à l'intérieur de la cavité, à différents nombres de Ri . Les vecteurs vitesses est le suivi des particules montrent également que l'augmentation du nombre de Ri fait une évolution remarquable sur l'architecture de l'écoulement, et le vortex qui se forme au centre de la cavité dans le sens d'une aiguille d'une montre devient plus intense et plus fort. On observe qu'à faible nombre de Ri ($Ri=0.1$), la vitesse de l'écoulement est la plus petite valeur à différentes stations (y) entre la paroi inférieure (chaude) et la paroi supérieure, ensuite tout en augmentant le nombre de Ri , on remarque que le champ d'écoulement commence par un profil de vitesse uniforme à une allure parabolique près de la paroi inférieure chaude, ceci indique que les vitesses

maximales se localisent essentiellement au voisinage des parois chauffées. Cependant, au fur et à mesure que le nombre de Ri augmente, l'écoulement présente des vitesses négatives pour la zone de recirculation dans le sens des aiguilles d'une montre au-dessus près de la paroi supérieur. Donc, on peut conclure que lorsque le nombre de Ri augmente, la vitesse d'écoulement devient négative, ceci est une indication d'inversion du courant.

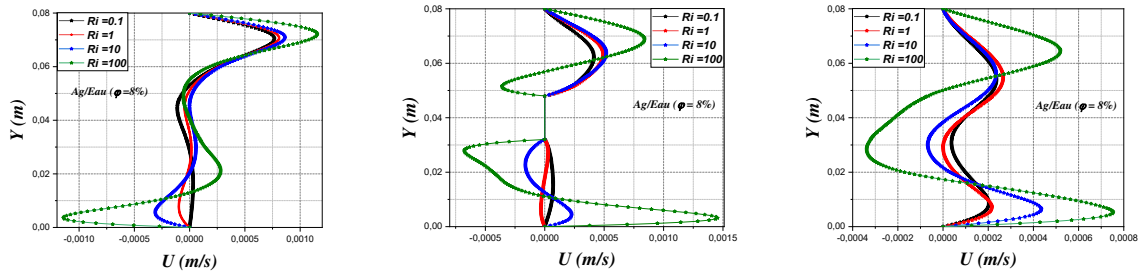


Figure.III.9 : Profil des vitesses transversales le long de l'axe (Y) de l'enceinte pour différents nombres de Richardson et différents position ($x = 0.5 H$, $x = 0.25 H$ et $x = 0.75 H$).

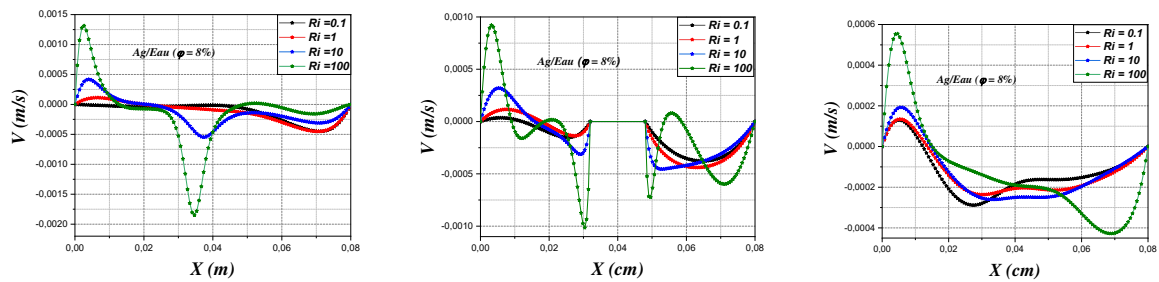


Figure.III.10 : Profil des vitesses longitudinales le long de l'axe (x) de l'enceinte pour différents nombres de Richardson et différents position ($y = 0.5 H$, $y = 0.25 H$ et $y = 0.75 H$).

III.3.2. Effet de types des nanoparticules

L'effet de la nature de nanofluides et/ou nanofluides hybrides sur les échanges thermiques par convection mixte au sein de l'enceinte sera étudié dans cette partie de notre travail. Nous considérons une cavité carrée remplie par différents nanofluides (Cu/Eau , Ag/Eau , Al_2O_3/Eau et TiO_2/Eau) et nanofluides hybrides ($Ag-Cu/Eau$, $Ag-TiO_2/Eau$ et $Al_2O_3-TiO_2/Eau$) avec différentes concentrations. Le transfert de chaleur a permis de tracer les nombres de Nusselt locaux et moyens au niveau de paroi inférieure chaude. La variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Richardson pour différents types de nanofluides (Nanoparticules) est représentée sur les trois figures (III.10, III.11 et III.12). L'effet du nombre de Richardson sur le nombre de Nusselt se traduit selon une loi de puissance de type $Nu = a Ri^b$ comme nous le considérons, l'augmentation du nombre de Richardson, le nombre de Nusselt augmente aussi graduellement sur toute la paroi chaude. La valeur

maximum du nombre de Nusselt est obtenue pour la valeur la plus élevée de Ri . Nous constatons aussi que l'intensité du transfert de chaleur augmente avec l'accroissement du nombre de Reynolds, près de la partie chauffée. Cela est dû à la domination des forces de flottabilité. Cette observation porte sur les trois figures (courbes) sans exception.

Des courbes croissantes ont été obtenues, montrant l'effet notable du nombre de Richardson sur le taux de transfert de chaleur à l'intérieur de la cavité. Le même résultat a été obtenu lors d'une validation des résultats avec les résultats publiés par Boulahia et al (2018)[40].

En outre, on a observé que le type de nanofluide additionné, et que l' Ag et le Cu sont les nanoparticules les plus efficaces dans l'augmentation du taux d'échange thermique, car selon l'équation de Maxwell (1873), le type de nanofluide motive la conductivité thermique, et donne une importante amélioration au transfert de chaleur. D'après les figures, on a remarqué que (Al_2O_3) a la plus faible valeur de conductivité thermique par rapport aux autres nanoparticules, par conséquent, il présente les valeurs faibles du nombre de Nusselt. Donc, on peut dire que le nombre de Nusselt atteint son maximum lorsqu'on utilise l'argent Ag et le cuivre Cu comme des nanoparticules, par contre atteint son minimum après utilisation de Al_2O_3 .

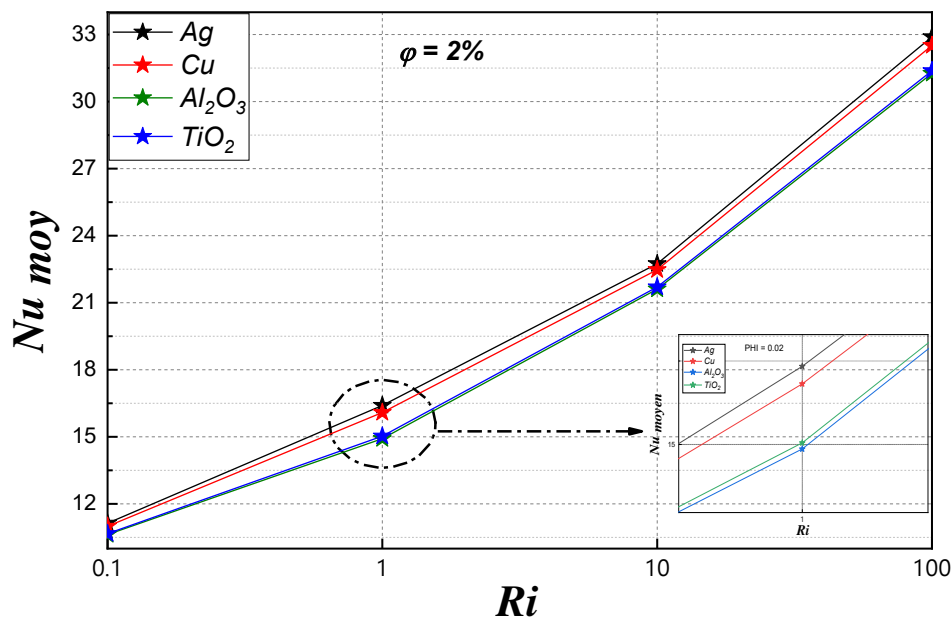


Figure III.11 : Variation du nombre de Nusselt moyen pour les différents nombres de Richardson Ri . ($\phi=2\%$).

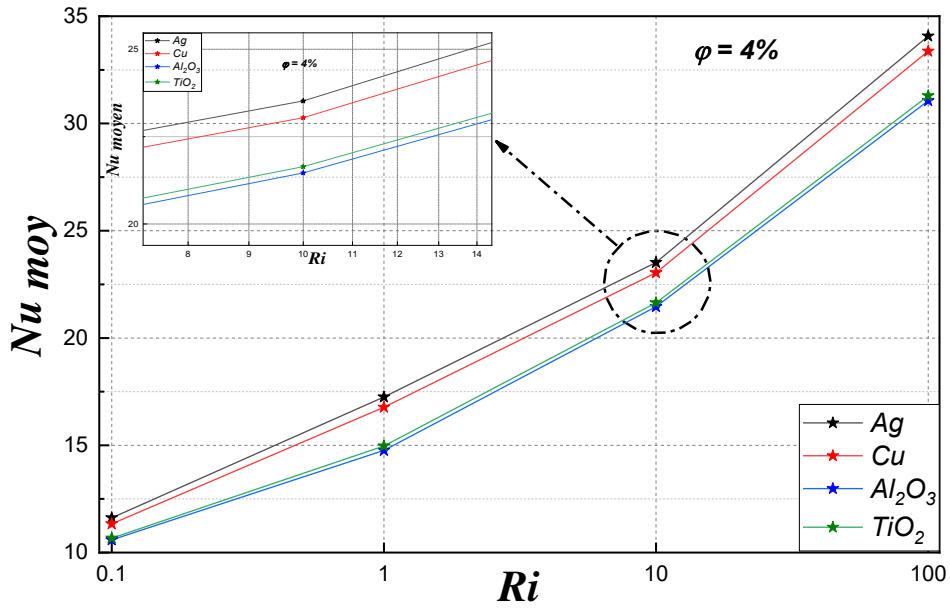


Figure III.12 : Variation du nombre de Nusselt moyen pour les différents nombre de Richardson Ri . ($\phi = 4\%$).

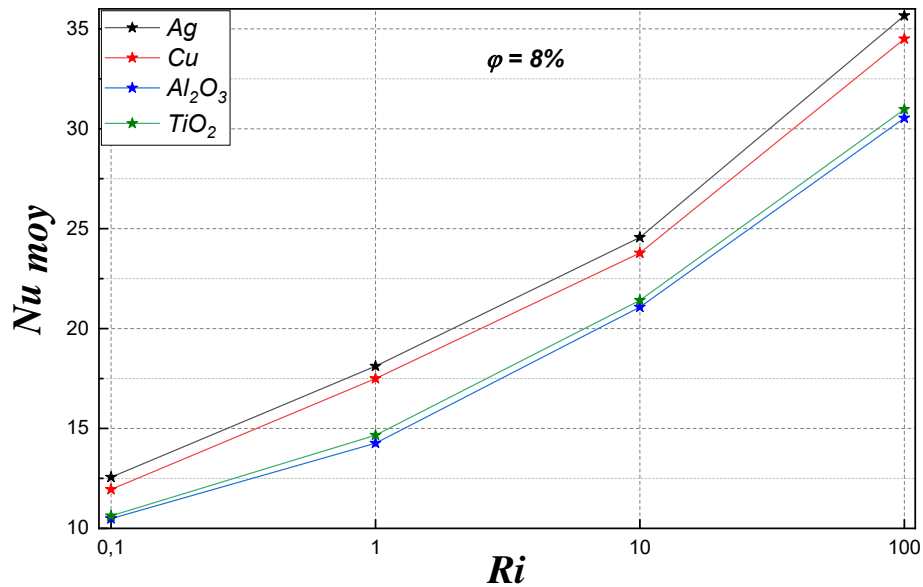


Figure III.13 : Variation du nombre de Nusselt moyen pour les différents nombre de Richardson Ri . ($\phi = 8\%$).

La variation du nombre de Nusselt local le long de la paroi chauffée est représentée dans la figure.III.13. Il est évident que la valeur minimale du nombre de Nusselt local est située au début de la paroi chaude, tandis qu'il prend sa valeur maximale aux extrémités de celle-ci. On remarque que les courbes du nombre de Nusselt local à $Ri=0.1$ sont

presque identiques (superposé) dans l'intervalle ($0 < x < 0.05$), puis augmente linéairement. Cette augmentation est plus considérable pour le nanofluide (*Ag/Eau*) suivie par le (*Cu/Eau*) puis par le nanofluide hybride (*Ag-Cu/Eau*) et les nanofluide hybride (*Ag-TiO₂/Eau*) et en fin les deux nanofluides (*TiO₂/Eau* et *Al₂O₃/Eau*). Le taux de transfert de chaleur minimum est obtenu pour le nanofluide hybride (*Al₂O₃-TiO₂/Eau*). Ce gain thermique se traduit respectivement par l'intensification des forces de flottabilité (prédominance de la convection) et des échanges de diffusion thermique entre les nanoparticules.

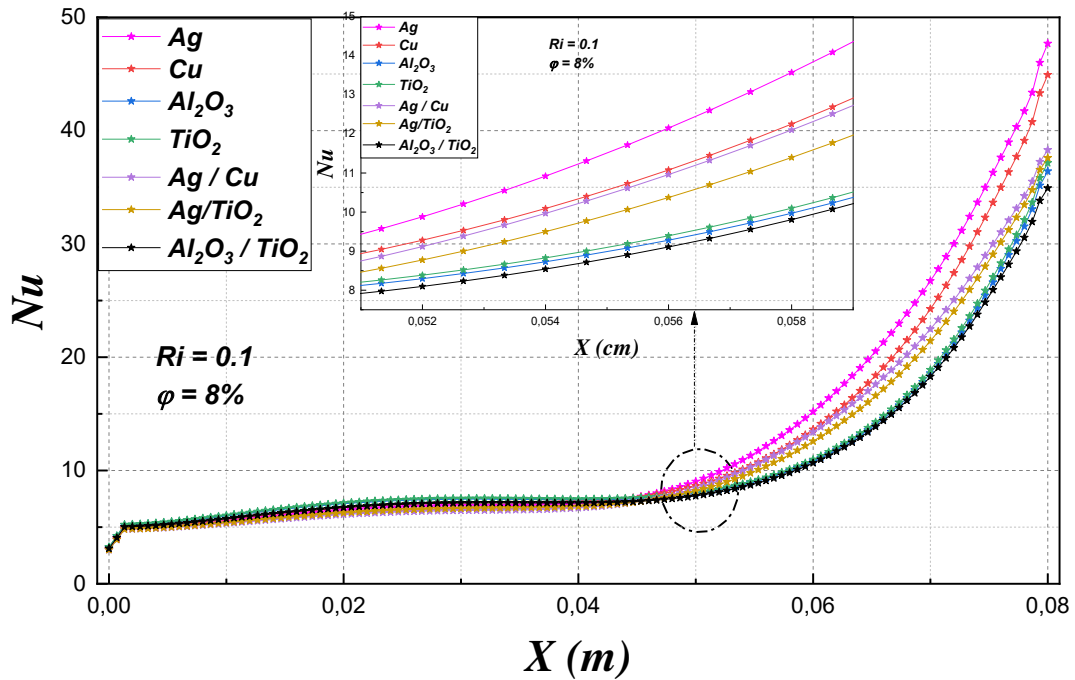


Figure III.14 : Variation du nombre de Nusselt local pour les différents types des Nanoparticules. Nombre de Richardson $Ri=0.1$, ($\phi=8\%$).

Enfin, on peut résumer que les nanofluides qui contiennent les nanoparticules de types métalliques et de haute conductivité thermique comme *Ag* et *Cu*, sont caractérisés par un grand nombre de Nusselt moyen, c'est-à-dire un très bon transfert thermique comparant avec celle des nanoparticules non métalliques comme Al_2O_3 et TiO_2 . Donc, nous pouvons classer les nanoparticules étudiées concernant le transfert thermique, l'argent *Ag*, le cuivre *Cu* et l'oxyde de titane TiO_2 et à l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 . Même chose pour les nanofluide hybride.

III.3.3. Effet de concentration des nanoparticules

La figure.III.14. Expose la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Richardson pour différents fraction volumique solide des nanoparticules pour le nanofluide (*Cu/Eau*). Nous constatons que dans tous les cas, le nombre de Nusselt moyen est une courbe linéaire croissante qui augmente avec l'augmentation de la fraction volumique solide des nanoparticules dans le fluide caloporteur. De plus, on a détecté que les valeurs les plus importantes du nombre de Nusselt moyen ont été trouvés pour un nombre de Richardson $Ri=100$ et que la valeur la plus basse du nombre de Nusselt moyen a été obtenue pour un $Ri = 0.1$.

La figure aussi montre que le nombre de Nusselt moyenne augmente avec l'augmentation de la fraction volumique, le maximum du nombre de Nusselt moyenne trouvé avec la fraction volumique 8%.

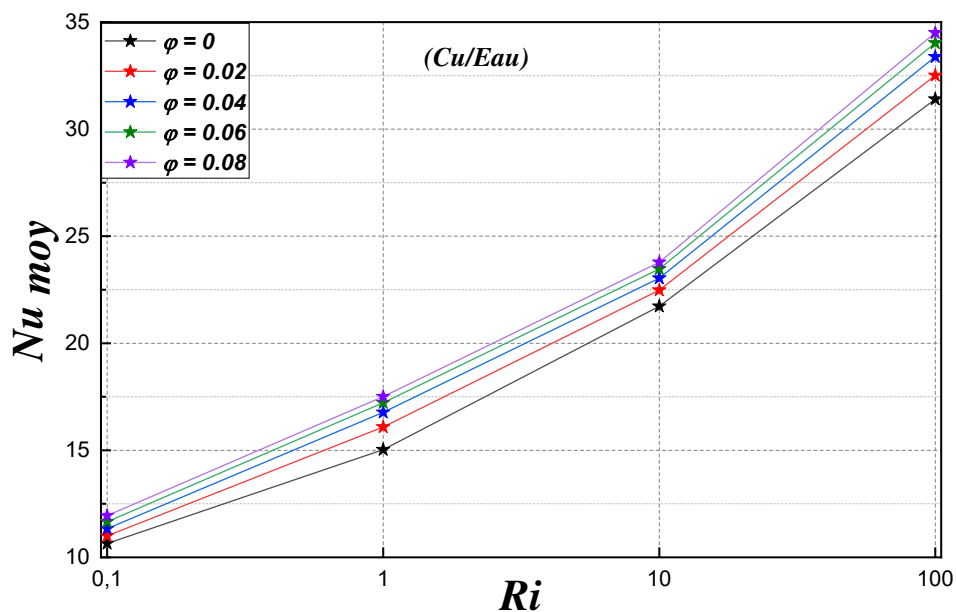


Figure III.15 : Variation du nombre de Nusselt moyen pour les différents nombre de Richardson et les fractions volumiques. (*Cu/Eau*).

Le profil de la vitesse transversales en fonction de (Y) à mi-longueur ($x = 0.5 H$) dans la cavité pour les différentes fractions volumique solide des nanoparticules pour le nanofluide hybride (*Ag-Cu/Eau*) a nombres de Richardson $Ri=0.1$ est représenté sur la figure.III.15. On remarque que le champ d'écoulement il se compose de deux zones. La première zone commence à partir de la paroi inférieure chaude et se termine au dessous du cylindre froid, la

deuxième zone commence au dessus du cylindre froid et se termine à la paroi supérieure, par un profil de vitesse uniforme à une allure parabolique, ceci indique que les vitesses maximales se localisent essentiellement aux milieux des deux zones.

On remarque que pour un fluide de base ($\varphi = 0\%$) par exemple, la vitesse verticale est de 0.00016 m/s, tandis qu'elle diminue à 0.000075 m/s lorsqu'on augmente la fraction volumique des nanoparticules de 0% à 8%, avec un taux de réduction de 47% c'est pour la première zone. Et de même pour la deuxième zone, soit avec un taux de réduction de 76%. Cela indique que la masse volumique affecte la réduction de vitesse d'un grand pourcentage. Cela signifie que plus la proportion de fractions volumiques dans le nanofluide est grande plus la masse volumique est grande dans le cas où la convection forcée prédomine.

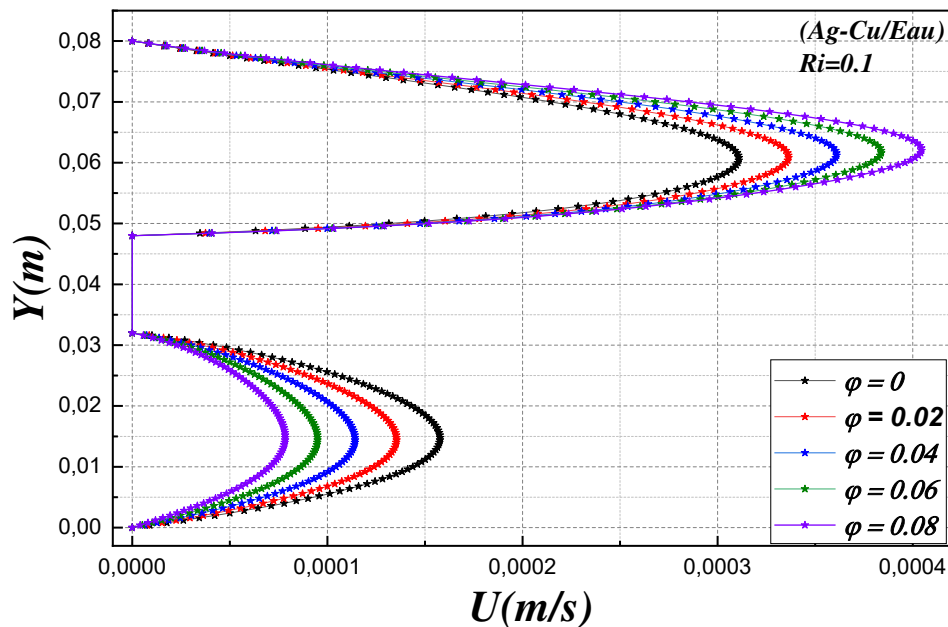


Figure.III.16 : Profil des vitesses transversales le long de l'axe (Y) de l'enceinte pour différents fraction volumique à $x = 0.5 H$. $Ri = 0.1$.

L'effet de la fraction volumique des nanoparticules sur le profil de la vitesse transversales en fonction de (Y) à mi-longueur ($x = 0.5 H$) dans la cavité avec différents fractions volumique solide des nanoparticules pour le nanofluide (Cu/Eau) a un nombre de Richardson $Ri = 10$ représenté sur la figure.III.16, et montre que la vitesse augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules en raison de l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides, qui provoque l'augmentation de l'effet de la force de flottabilité

(convection naturelle prédominée). On constate également, la présence des valeurs négatives de vitesse U dans la première zone, qui traduit la présence d'une zone de recirculation dans la cavité.

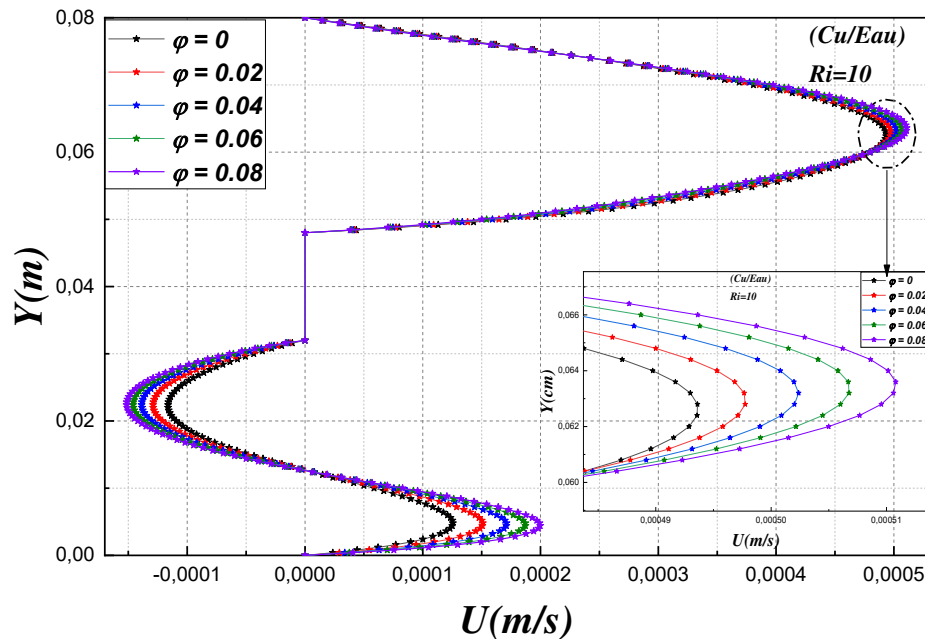


Figure.III.17 : Profil des vitesses transversales le long de l'axe (Y) de l'enceinte pour différents fraction volumique à $x = 0.5 H$. $Ri = 10$.

III.4. conclusion

Dans ce chapitre, on a effectué une étude numérique bidimensionnelle du transfert de chaleur par convection mixte à l'intérieur d'une cavité carrée ventilée contenant un cylindre froid T_f au centre de ce dernier. La cavité est remplie par différents nano-fluides (nano-fluide et nano-fluide hybride) et contenant deux portes (Orifices) d'entrée et de sortie de l'écoulement. Une analyse approfondie a été réalisée dans laquelle les équations de la conservation de masse, de mouvement et d'énergie et de la génération d'entropie sont résolues en utilisant le code de calcul ANSYS FLUENT 6.3. Une comparaison a été faite avec des résultats des travaux publiés par Boulahia et al (2018)[40], pour valider notre travail. Un bon accord a été obtenu. Les effets du nombre de Richardson, fraction volumique des nanoparticules et le type du nanofluide sur l'écoulement du fluide, la performance thermique à été étudié en détail.

Conclusion général

Dans ce travail, on a présenté une étude numérique de la convection mixte laminaire stationnaire dans une cavité carrée ventilée contenant un cylindre froid au centre remplie dans le cas d'un mélange d'eau purs, et des mélanges de ce fluide de base et des nanoparticules (Ag, Cu, Al_2O_3 et TiO_2) et nanoparticule hybride ((Ag- Cu),(Ag- TiO_2), (Al_2O_3 - TiO_2)).

La configuration géométrique du modèle physique est un enceinte carrée ventilée, cette dernière est chauffée isothermiquement par le bas par une source de chaleur (La source est maintenir la paroi inférieure à température constante), les autres parois sont maintenues adiabatiques, .Les équations qui régissent ont été résolues numériquement via la méthode des volumes finis

En se basant sur la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations mathématiques, nous avons pu déterminer les lignes de courant, les isothermes ainsi que les variations du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Richardson. Les résultats de simulation sont obtenus avec le code FLUENT.

Les simulations numériques sont effectuées pour un nombre de Richardson variant avec les valeurs: $\text{Ri} = 0.1, 1, 10$ et 100 , et une fraction volumique des nanoparticules comprise entre (0% et 8%). Pour examiner profondément les effets des paramètres pertinents sur l'écoulement hydrodynamique et le transfert de chaleur dans notre configuration, nous allons subdiviser cette étude en trois parties principales :

- Effet de nombre de Richardson ;
- Effet de types des nanoparticules ;
- Effet de concentration des nanoparticules.

Les principaux résultats se résument comme suite :

- a) La différence de transfert de chaleur, en utilisant différents nanofluides, augmente avec l'augmentation de la valeur de la fraction volumique des nanoparticules.
- b) l'existence de nanoparticules ce qui signifie une amélioration du taux de transfert de chaleur ce qui est indiqué par l'augmentation du nombre de Nusselt.
- c) L'effet du nanofluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Richardson élevé.

- d) On constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Richardson et la fraction volumique pour différentes concentrations volumiques de nanoparticules et de nanoparticules hybride.
- e) les nanofluides qui contiennent les nanoparticules de types métalliques et de haute conductivité thermique comparant avec celle des nanoparticules non métalliques et la même chose pour les nanofluide hybride.

Perspectives

Ce travail mérite d'être élargi par des études complémentaires pour mieux comprendre ce phénomène de convection mixte dans les enceintes, pour cela nous suggérons ce qui suit

- Une étude tridimensionnelle expérimentale et numérique de ce phénomène.
- L'influence de l'instationnarité et le régime d'écoulement.
- La génération de l'entropie dans les enceintes

Références

- [1] **M.BORDJANE**, cours modes transfert thermique, Université Mohamed Boudiaf, Oran Algérie (2017).
- [2] <https://docplayer.fr/docs-images/74/69902189/images/4-1.jpg>
- [3] <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/les-transferts-de-chaleur>
- [4] **KLALACHE Sofiane, MADJOUR Abderrahmane**, Simulation numérique de la convection forcée entre deux disques en présence d'un nanofluide, Thèse de master, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2015.
- [5] **Sarit K .Das, Stephen U.S. Choi, Wenhua Yu**. Nanofluids Science and Technology, book WILEY 2007, 978-0-470-07473-2 .
- [6] **Maouassi Ammar** , Intensification des échanges de chaleur par l'utilisation des nanofluides. Hydrocarbure et Chimie, thèse de magister, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2012
- [7] **Y. Xuan and W. Roetzel**. Conception for heat transfer correlation of nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(19), 3701-3707.
- [8] **B.C. Pak and Y.I. Cho**. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer, 1998, 11(2), 151–170.
- [9] **H.C. Brinkman**. The viscosity of concentrated suspensions and solution. Journal. Chem. Phys. 1952, 20, 571–581.
- [10] **G.K. Batchelor**. Brownian Diffusion of particles with Hydrodynamic Interaction. Journal of Fluid Mechanics, 1976, 74(1): 1-29.
- [11] **S. Maiga, S. Palm, S. Nguyen, C. Roy**, and G. Galanis. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. Int. J. Heat Fluid Flow, 2005, 26, 530-546.
- [12] **J.C. Maxwell**. A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K., 1891
- [13] **salhi hicham**, etude numerique de la convection naturelle dans les enceintes : nanofluide, thèse de doctorat, universite de batna, 2015.

- [14] **Billel BOUDJENIBA, Salah LAOUAR, El Hacene Mezaache**, Etude Numérique De La Convection Naturelle Dans Une Cavité Rectangulaire Contenant Un Nanofluide, article sur la 2^{ème} conférence internationale de mécanique Université 20 Août 1955 De Skikda, 2015
- [15] **C.Y Tsai, H.T Chien, P.P Ding. B Chan, T.Y Luch, P.H Chen**, Effect of Structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, Material letters 2004, Vol. 58, pp.1461-1465.
- [16]. **Khanafer, K., K. Vafai, and M. Lightstone**, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a twodimensional enclosure utilizing nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(19): p. 3639-3653.
- [17] **Lin, K.C. and A. Violi**, Natural convection heat transfer of nanofluids in a vertical cavity: Effects of nonuniform particle diameter and temperature on thermal conductivity. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 31(2): p. 236-245.
- [18] **Tayebi, T. and. Saadaoui, K**, Enhancement of Heat Transfer in a Cavity Filled with Cu-water Nanofluid. International Symposium on Materials and Sustainable Development, 2013. p. 122-127
- [19] **Minh Tuan Nguyen , Abdelraheem M .Aly , Sang-wook lee**. Natural convection in a non-Darcyporous cavity filled with Cu–water nano-fluid using the characteristic-based split procedure infinite-element method. International Journal of Computation and Methodology, 2015. 67(2): p . 224-247.
- [20] **Grosan, T. Revnic, C. Pop, I. & Ingham, D. B.** Free convection heat transfer in a square cavity filled with a porous medium saturated by a nanofluid. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015, 87 : p.36-41.
- [21] **Samir houat, zine elabidine bouayed** : etude mesoscopique de la convection mixte laminaire dans une cavite carree ventilee. a,b laboratoire de modélisation numérique & expérimentale des Phénomènes Mécaniques, Article-03-252700 BP300, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, Algérie , 2015. .

- [22] **E. belahmadi, R. bessaih** : étudenumérique de la convection mixte dans un canal vertical rempli d'un nanofluide,Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution,2016
- [23] **Abdelkader boutra, karim ragui, Nabila labsi,youb khaled benkahla, Rachid bennacer**.Transfert de chaleur par convection naturelle d'un nano-fluide dans une enceinte enquêtécubique. Revue arabe des sciences, . Article : 2016,41(5) ,1969-1980.
- [24] **DADDA Mouham Ed Lamine** .Etude de la convection naturelle dans une cavité carrée différentiellement chauffée .mémoire de master , université d'Eloued 2016
- [25] **Sabah .Y.Motlagh,S.Taghizadeh et H .Soltanipou** Natural convection heat transferin an inclined square enclosure filled with a porous medium saturated by nanofluid using Buongiorno's mathematical model .Advanced Powder Technology. 2016,Article: 27(6), 2
- [26] **M. BENZEMA, Y.K. BENKAHLA, A.BOUDIAF, S.OUYAHIA**, Etude numérique de la convection mixte lors de l'écoulement d'un nanofluide hybride (Ag- MgO /Eau) dans une cavité trapézoïdale ventilée soumise à l'action d'un champ magnétique, 23ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2017, Lille, France. hal-03465684f
- [27] **S .A.Mehryan,F .Kashkooli,M.GhalambazetAli.J.Chamkha** . Freeconvection of hybrid Al₂O₃-Cu water nanofluid in a differentially heated porous cavity.Advanced Powder TechnologArticle: 2017,28(9), 2295-2305.
- [28] **Alsabery, A. I., Chamkha, A. J., Saleh, H., &Hashim, I.** . Natural convection flow of a nanofluid in an inclined square enclosure partially filled with a porous medium. Scientific reports,Article :2017,7(1), 1-18.
- [29] **TRODI Amira** .Etude des Phénomènes de Transfert de Chaleur dans les Nanofluides .Thèse de doctorat . Faculté des Sciences et de la Technologie .Université 8 Mai 1945 Guelma, 2018.
- [30] **Bouhabel Bourhane et guermat zouhir**, etude numérique de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire inclinée saturée par des fluides et des nanofluides, thèse de master,école nationale polytechnique de constantine , 2018.
- [31] **Ragueb haithem khaldi Abdelbasset** .Etude numérique de la performance d'un échangeur thermique à triple pipepar l'utilisation d'un nanofluide hybride ,these de master ,Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées ,bouira,2019

- [32] **Boudaoud Warda** . Simulation numérique de la convection naturelle dans des cavités remplies des nanofluides . Thèse de doctorat . Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf, 2019.
- [33] **Hakim T.Kadhim, Faris A.Jabbar , Aldo Rona** . Cu-Al₂O₃ hybrid nanofluid natural convection in an inclined enclosure with wavy walls partially layered by porous medium . International Journal of Mechanical Sciences, 2020,186, 105889.
- [34] **S.A.M. Mehryan, Ghalambaz, M., Chamkha, A. J , & Izadi, M.** Numerical study on natural convection of Ag–MgO hybrid/water nanofluid inside a porous enclosure: A local thermal non-equilibrium model. Powder Technology , Article, 2020 : 367,443-455.
- [35] **NS Khashi'ie , EH Hafidzuddin , NM Arifin , N Wahi.**(, Stagnation Point Flow of Hybrid Nanofluid over a Permeable Vertical Stretching/Shrinking Cylinder with Thermal Stratification Effect. International Journal CFD Letters, 2020,12 (2) :p . 80-84.
- [36] **Brahimi Meryem ,Debih Maroua.** Etude numérique de la convection naturelle au sein d'une cavité carrée. mémoire de master . université mohamed boudiaf - m'sila , 2020 .
- [37] **Rujda Parveen ,Priyajit Mondal, Tapas Ray Mahapatra** . Double Diffusive Magneto hydrodynamic (MHD) Natural Convection and Entropy Generation in a Discretely Heated Inclined Dome-Shaped Enclosure Filled with Cu-Water Nanofluid . Department of Mathematics, International Journal of nanofluids 2021,10 (4): p .564-579,.
- [38] **Kawthar Dhifl^{1, 2} , F. Mebarek-Oudina^{1,*}, S. Chouf² , H. Vaidya³ , and Ali J. Chamkha⁴** . Thermal Analysis of the Solar Collector Cum Storage System Using a Hybrid-Nanofluids .International Journal of nanofluids , 2021,10 (4): p .616-626.
- [39] **Hachani Hicham, gherseh ikbal ammar.** Convection naturelle d'un nanofluide dans un espace annulaire cylindrique horizontal à enveloppe poreuse. Mémoire de master .Faculté des sciences et Technologies, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi –Bordj Bou Arreridj (2021)
- [40] **Z. Boulahia, A.Wakif and R. Sehaqui** heat transfer and cu-water nanofluid flow in a ventilated cavity having central cooling cylinder and heated from the below considering three different outlet port locations. International journal of heat and mass transfer, 2018 : 2151-8629

Résumé

Dans ce travail on a mené une étude numérique de l'écoulement laminaire stationnaire par convection mixte dans une cavité bidimensionnelle ventilée contenant un cylindre froid au centre de ce dernier. La cavité est remplie par différents nano-fluides (nano-fluides et nano-fluides hybride), et des mélanges de ce fluide de base et des nanoparticules (Ag, Cu, Al_2O_3 et TiO_2) et nanoparticule hybride ((Ag- Cu),(Ag- TiO_2),(Al_2O_3 - TiO_2)). La cavité contenant deux portes (Orifices) d'entrée et de sortie de l'écoulement, pour un nombre de Reynolds (Re) fixé de telle sorte que le nombre de Richardson prend les valeurs : $Ri = 0.1, 1, 10$ et 100 , et une fraction volumique des nanoparticules comprise entre (0% et 8%). La cavité carrée est chauffée iso-thermiquement par la surface de la paroi inférieure par une source de chaleur (La source est maintenir la paroi inférieure à température constante), les autres parois sont maintenues adiabatiques Les équations qui régissent ont été résolues numériquement via la méthode des volumes finis. Les résultats obtenus montrent que le transfert thermique augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et du nombre du Richardson Ainsi le taux de transfert de chaleur (Nu) augmente avec l'augmentation de Ri .

Mot clé : Nanofluide, nanofluide hybride, Convection mixte, transfert de chaleur, nombre de Richardson, cavité ventilée.

Abstract

In this work we carried out a numerical study of the stationary laminar flow by mixed convection in a ventilated two-dimensional cavity containing a cold cylinder in the center of the latter. The cavity is filled with different nano-fluids (nano-fluids and hybrid nano-fluids), and mixtures of this base fluid and nanoparticles (Ag, Cu, Al_2O_3 and TiO_2) and hybrid nanoparticle ((Ag-Cu), (Ag- TiO_2),(Al_2O_3 - TiO_2)). The cavity containing two gates (Orifices) of entry and exit of the flow, for a Reynolds number (Re) fixed so that the Richardson number takes the values: $Ri = 0.1, 1, 10$ and 100 , and a volume fraction of the nanoparticles comprised between (0% and 8%). The square cavity is heated iso-thermally by the surface of the lower wall by a heat source (The source is to maintain the lower wall at constant temperature), the other walls are maintained adiabatic The governing equations have been solved numerically via the method finite volumes. The results obtained show that the heat transfer increases with the increase in the volume fraction and the Richardson number. Thus the rates of heat transfer (Nu) increases with the increase in Ri .

Keywords: Nanofluid, hybrid nanofluid, Mixed convection, heat transfer, Richardson number, ventilated cavity

ملخص:

في هذا العمل أجرينا دراسة عددية للتدفق الرقائقي الثابت عن طريق الحمل الحراري المختلط في تجويف ثنائي الأبعاد جيد التهوية يحتوي على أسطوانة باردة في وسطه. التجويف ممتلئ بسوائل نانوية مختلفة (سوائل نانوية وسوائل نانو هجينة) ، ومخاليط من هذا السائل الأساسي والجسيمات النانوية (Ag ، Cu ، Al_2O_3 و TiO_2) والجسيمات النانوية الهجينة ((Ag-Cu) ، (Ag- TiO_2)) ، ((Al_2O_3 - TiO_2)). التجويف يحتوي على بوابتين (فتحات) لدخول وخروج المائع ، وقد ثبت رقم رينولدز (Re) بحيث يأخذ رقم ريتشاردسون القيم 1 ، 10 و $Ri = 0.1$ 100 ، بنسب تركيز حجمي للجسيمات النانوية بين (0% و 8%). يتم تسخين التجويف المربع حراريًا بواسطة سطح الجدار السفلي بواسطة مصدر حرارة (المصدر هو الحفاظ على الجدار السفلي عند درجة حرارة ثابتة) ، ويتم الحفاظ على الجدران الأخرى ثابتة . تم حل المعادلات الحاكمة عدديًا عبر طريقة الأحجام المحدودة . أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن انتقال الحرارة يزداد مع زيادة نسب التركيز الحجمي للجسيمات وعدد ريتشاردسون. وبالتالي فإن معدل انتقال الحرارة يزداد مع زيادة Ri .

الكلمات المفتاحية: مائع نانوي ، مائع نانوي هجين ، الحمل الحراري المختلط ، نقل الحرارة ، رقم ريتشاردسون ، تجويف مفتوح