

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

ICHALLAL Hocine

HAMANI Kahina

Thème

Convection naturel d'un fluide newtonien dans un espace carré rempli de nanoparticules

Soutenu le 05/10/2021 devant le jury composé de :

Mr.	MENDIL.F	Président
Mr.	ADNANI.M	Rapporteur
Mr.	HAMDIM	Examineur

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à la participation de plusieurs personnes à qui nous voudrions adresser toute notre reconnaissance.

*D'abord nous tenons à exprimer toute notre gratitude à notre encadreur **Mr.ADNANI Massinissa** pour sa patience, sa gentillesse, ses conseils et son encouragement. Sans oublier les doctorants qui nous ont beaucoup aidés à la réalisation de ce modeste travail.*

Nos remerciements vont également

*A **MENDIL.F** pour l'honneur qu'il nous fait de présider notre jury et à **HAMDIL.M** d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

Nous tenons à formuler notre gratitude et nos profondes reconnaissances à l'égard de nos parents pour leurs indéfectibles soutiens durant tout notre cursus.

Nos vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui nous ont aidés à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Aux deux personnes qui me sont les plus chères au monde, mon cher père et ma chère mère, auxquels je tiens à exprimer ma profonde gratitude de leurs soutiens incessants, de leur patience incommensurable, de leurs sacrifices inestimables, et surtout leur tendresse. Aucune dédicace ne saurait exprimer Nos respects et Nos considérations.

Que dieu prolonge vos jours dans la joie, la santé et la paix.

Je vous aime très fort

A mes très chers frères et sœurs et toute ma famille

A mon binôme et toute sa famille.

A tous mes amis et tous ceux qui en participer de près ou de loin à la réussite de ce travail

Kahina

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect,
reconnaissance et de remerciement :*

A mes très chers parents.

A mon frère et mes sœurs.

A mes ami-e-s.

A ma binôme et sa famille

A tous ceux celles qui me sont très chers-es

*A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce
modeste travail.*

Houhou

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace.....	ii
Dédicace.....	iii
Sommaire	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
NOMENCLATURE	x
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités et recherche bibliographique.....	3
I.1. Introduction	3
I.2. Transfert de chaleur.....	3
I.2.1. Définition	3
I.2.2. Transfert de chaleur par conduction.....	3
I.2.3. Transfert de chaleur par convection	4
I.3. Définition des nano-fluides	5
I.3.1. Technique de fabrication des nanoparticules	6
I.3.2. Les applications des nano-fluides	6
a) Dans les véhicules	6
b) Refroidissement des pièces électroniques	6
c) Dans la biomédecine	7
Synthèse bibliographique	8
I.4. Conclusion.....	19
Chapitre II : Formulation mathématique.....	21
II.1. Introduction	21
II.2. Domaine physique	21
II.3. Les hypothèses simplificatrices du problème.....	21

II.4. Les paramètres thermo-physiques	22
II.4.1. La masse volumique	22
II.4.2. La chaleur spécifique.....	22
a) Modèle de Xuan et Reotzel	22
b) Pak et Cho	22
II.4.3.Coefficient d'expansion thermique	23
II.4.4. la viscosité dynamique.....	23
a) Modèle d'Einstein	23
b) Modèle de Brinkman	23
II.4.5. La conductivité thermique	23
a) Modèle de maxwell	24
II.5. Les équations gouvernantes.....	24
II.5.1 Equation de continuité	24
II.5.2. Equation de conservation de quantité de mouvement	24
II.5.3. Equation d'énergie.....	25
II.5.4. Les paramètres adimensionnels	25
II.5.5. Les conditions aux limites pour le modèle bidimensionnel	25
II.5.6. Paramètres du nano-fluide (Al_2O_3 -eau).....	26
II.6 Méthode Numérique	27
II.7. Conclusion	28
Chapitre III : Résultats et discussions.....	29
III. 1. Introduction	29
III.2. Validation	30
a) Les lignes de courants	31
b) Les lignes isothermes	32
III.3. Validation du maillage	29
III.4. Résultats	33
III.4.1. Effets de la concentration et du nombre Rayleigh	33
a) Les ligne de courant	33

b) Les lignes isothermes	35
III.4.2 le profil de vitesse et de température.....	37
III.4.3. Le nombre Nusselt moyen.....	39
III.5. Conclusion.....	39
Conclusion Générale	41
Références Bibliographiques.....

Liste des figures

Figure I. 1 : schéma représentatif des types de transfert.	3
Figure I. 2 : schéma représentatif de la conduction.....	4
Figure I. 3 : schéma du transfert par convection.	5
Figure I. 4 : schéma représentatif d'un fluide de base et des nanoparticules.....	5
Figure I. 5 : schéma de la configuration étudiée.	8
Figure I. 6 : mise en page de la configuration expérimentale.	9
Figure I. 7 : Schéma de l'installation expérimentale.	9
Figure I. 8 : Configurations géométriques étudiées : (a) un tube chauffé uniformément et (b) un canal radial entre des disques chauffés.	10
Figure I. 9 : schéma du modèle et les conditions au limite.	10
Figure I. 10 : schéma de la cavité sous forme de T.....	11
Figure I. 11 : modèle physique de l'étude.....	12
Figure I. 12 : schéma de la géométrie.	12
Figure I. 13 : schéma du model étudié.	13
Figure I. 14 : schéma de l'enceinte.	13
Figure I. 15 : a- schéma de la géométrie étudier. b-maillage.....	14
Figure I. 16 : le schéma du problème physique.....	14
Figure I. 17 : schéma explicatif de l'expérience.	15
Figure I. 18 : la configuration géométrique du problème.	16
Figure I. 19 : schéma de la géométrie étudier et des conditions au limites.....	16
Figure I. 20 : géométrie du problème physique.	17
Figure I. 21 : présentation de la géométrie étudiée.	17
Figure I. 22 : modèle physique.....	18
Figure I. 23 : la configuration étudiée.....	19
Figure II. 1 : la géométrie a étudié.	21
Figure III. 1 : profile de vitesse selon le nombre de $Ra=10^5$, et un fraction de $\phi=0.1$, et pour $H=1$, $y_p=0.5$ et $h'=0.5$	30
Figure III. 2 : Comparaison des lignes de courants entre nos résultats et ceux de H.oztop et E.Abu Nada pour différents $Ra (10^3,10^4,10^5)$	31

Figure III. 3 : Comparaison des lignes isotherme entre nos résultats et ceux de H.oztop et E.Abu Nada pour différents Ra ($10^3, 10^4, 10^5$). 32

Figure III. 4 : Nombre de Nusselt en fonction du maillage..... 30

Figure III. 5 : les lignes de courants pour différents fraction et différents nombres Rayleigh. 34

Figure III. 6 : les lignes isothermes pour différents fraction et différents nombres Rayleigh. 37

Figure III. 7 : les différents profils de vitesses pour différents fraction a $Ra=10^5$, $x=0.5$ et $y=0.25$ 38

Figure III. 8 : les différents profils de températures pour un $Ra=10^5$, $x=0.5$ et $y=0.25$ 38

Figure III. 9 : le nombre de nusselt moyen en fonction des différents nombre de Rayleigh pour chaque fraction de nanoparticule $\phi=[0 ;0.1]$ 39

Liste des tableaux

Tableau II. 1 : les condition au limite de la cavité.	25
Tableau II. 2 : paramètres thermo-physique du fluide de base et de la nanoparticule.	26
Tableau II. 3 : paramètres thermo-physique du nano-fluide pour différents concentration volumique.	27
Tableau III. 1 : le nombre de nusselt moyen en fonction des différent maillage	29
Tableau III. 2 : les nombre de nusselt moyen en fonction du nombre de $Ra=10^3, 10^5, 10^7$	39

NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité (SI)
C_p :	Chaleur spécifique	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
H :	Hauteur de la cavité	m
g :	Accélération de la pesanteur	m s^{-2}
p :	Pression	Pa
m :	Masse	kg
Q :	Flux de chaleur	W
T :	Température dimensionnel	K
T_h :	Température chaude	K
T_c :	Température froide	K
v :	Volume des nanoparticules	m^3
Nu :	Nombre de Nusselt	
u, v :	Composant de vitesse dimensionnel	m s^{-1}
U, V :	Composantes de vitesse adimensionnel	-
x, y :	cordonnées dimensionnel	m
X, Y :	cordonnées adimensionnel	-
Symboles grecs		
α :	Diffusivité thermique	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
β :	Coefficient d'expansion thermique	K^{-1}
θ :	Température adimensionnelle	-
ν :	Viscosité cinématique	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
μ :	Viscosité dynamique	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
φ :	Fraction volumique des nanoparticules	
ρ :	Masse volumique	kg m^{-3}
-		
Indices		
f, s :	fluide et solide.	
nf :	Nanofluide	

Groupements adimensionnels

Pr	Nombre de Prandtl	-
Gr	Nombre de Grashof	-
Ri	Nombre de Richardson	-
Ra	Nombre de Rayleigh	-
Nu _{moy}	Nombre de Nusselt moyen	-

Introduction Générale

Introduction Générale

De nos jours, l'un des objectifs de la recherche scientifique dans les industries se rapporte à la résolution des questions relatives aux économies des opérations de transformation d'énergie pour atteindre l'optimum. Dans ce contexte, les études menées se fixent comme objectifs des connaissances détaillées et fiables du comportement des systèmes complexes induits par des matériaux ou fluides nouveaux. Les recherches théoriques et expérimentales dans le domaine du transfert thermique font l'objet d'une variation pendant ces dernières décennies en raison de phénomènes particuliers, cela a permis d'introduire de nouvelles innovations aux domaines du transfert thermique tel que les nano-fluides.

Les nanoparticules représentent aujourd'hui un enjeu technologique et économique majeur. Leurs présences permettent une amélioration remarquable sur de nombreux domaines tel que (le pharmaceutique, l'énergétique, l'esthétique, matériaux ...).

Vu l'importance de ce dernier, leur implication dans le transfert thermique nous a permis de mener une étude numérique sur le transfert thermique d'un fluide newtonien dans un espace remplis de nanoparticule, cela s'est fait pour une cavité carrée chauffée par la paroi inférieure et refroidie par un bloc solide au centre de la cavité et le reste des parois sont supposées isoler, ceci dit en utilisant un nano-fluide à base d'eau et de Al_2O_3 pour différentes concentrations des nanoparticules dans le fluide de base, et pour un nombre de Rayleigh de 10^3 , 10^5 et 10^7 , pour en déduire l'importance de la fraction volumique et le nombre de Rayleigh sur le transfert de chaleur.

Dans notre présent mémoire, nous avons parlé sur les généralités et les différentes formes de transfert de chaleur dans le premier chapitre, nous avons aussi évoqué les types des nanoparticules et aussi les nombreux fluides de base existant, on a vu les deux méthodes de les mélangés pour donner un nano-fluide prêt à être utilisé dans différents domaines, et la synthèse bibliographique qui nous définit les différents paramètres réagissent sur la convection.

A partir du chapitre II, nous avons introduit notre problème qui est le transfert thermique par convection naturel dans une cavité carrée remplis de nanoparticule soumise à des conditions aux limites. Ainsi que les hypothèses simplificatrices pour résoudre les équations gouvernantes, de même que on a vu les différents paramètres thermo-physique des nano-fluides.

En fin dans le dernier chapitre, nous l'avons consacré à la simulation numérique et la présentation de nos résultats, et nos différentes remarques soustraites, en terminera par une conclusion générale qui synthétise nos différents résultats.

Chapitre I
Généralités et recherche
bibliographique

Généralités et recherche bibliographique

I.1. Introduction

Le transfert thermique est amélioré par des chercheurs en lui introduisant des nanoparticules dans un fluide de base, dans chapitre, on s'intéressera aux différentes caractéristiques des nano-fluides et leur intérêt dans le transfert de chaleur.

I.2. Transfert de chaleur

I.2.1. Définition

On appelle « transfert de chaleur » le déplacement de la chaleur d'une région à une autre suite à une différence de température, ce déplacement peut se produire entre deux corps en contact (solide-solide, solide-fluide, fluide-fluide) ou entre deux parties d'un même corps.

L'énergie interne du système change au cours du déplacement de la chaleur en produisant :

- Le flux thermique transmis.
- La répartition de la température à l'intérieur du milieu considéré.

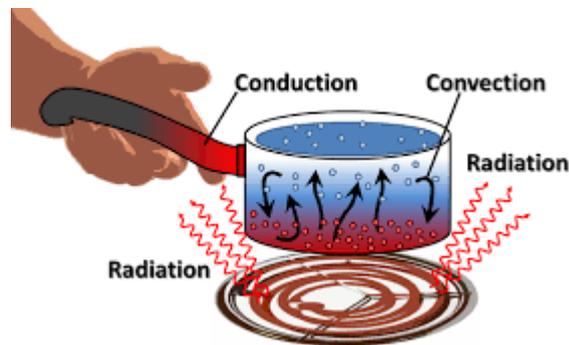


Figure I. 1 : schéma représentatif des types de transfert.

I.2.2. Transfert de chaleur par conduction

La conduction est le transfert de chaleur des parties chaudes vers les parties plus froides, d'un même corps ou de deux corps en contact sans mouvement apparent de matière.

Ce mode peut s'effectuer dans les solides et les fluides. Cependant, c'est le seul mécanisme par lequel la chaleur peut se déplacer dans les solides opaques.

La conduction est régie par la loi de Fourier :

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} [W] \quad (I.1)$$

Cette formule donne la valeur du flux de chaleur dans la direction x , avec :

Le signe (-) intervient puisque la chaleur s'écoule vers le décroissement de la température.

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

A : La surface d'échange de chaleur [m²].

dT/dx : Le gradient de température dans la direction de x [K/ m]

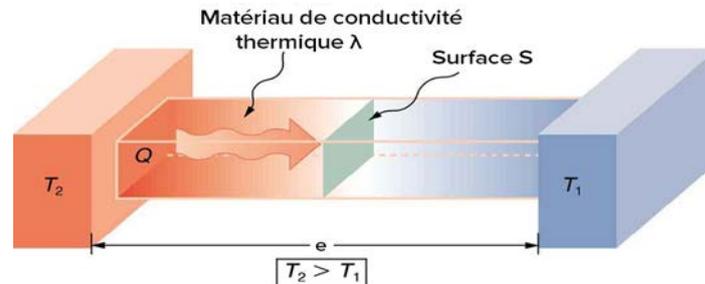


Figure I. 2 : schéma représentatif de la conduction.

I.2.3. Transfert de chaleur par convection

De façon générale, la convection est le transport d'une grandeur physique d'un fluide d'un point à un autre par le mouvement de ses molécules. Les différences de températures dans les fluides entraînent des différences de densités et donc un mouvement des particules du fluide, ce mouvement a pour effet de véhiculer la chaleur du fluide et d'égaliser les températures par substitution réciproque des molécules froides à des molécules chaudes.

Le phénomène de convection intervient à chaque fois qu'un fluide se déplace par rapport à des éléments fixes (murs, plaques, tubes, ...etc.) à des températures différentes de celle du fluide ou lorsque deux fluides à des températures différentes sont mises en contact.

On dit que la convection est naturelle si le mouvement des masses fluides responsables du transfert de chaleur, celle-ci est provoquée par des différences de densités provenant elles-mêmes des différences de températures à l'intérieur du fluide. On dit que la convection est forcée si le mouvement est créé par une action extérieure (ventilateurs, pompes, ...etc.).

La loi de Newton donne le flux échangé entre une surface de valeur S et de température T et un fluide de température T_f , elle s'écrit :

$$Q = hS (T - T_f) \quad (\text{I.2})$$

Avec :

h : Coefficient d'échange convectif [W/m².K].

S : Surface d'échange de chaleur [m²].[1]

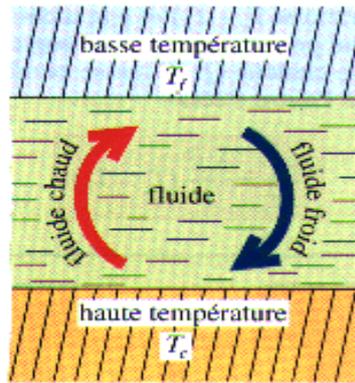


Figure I. 3 : schéma du transfert par convection. [1]

I.3. Définition des nano-fluides

Les nano-fluides sont des solutions colloïdales constituées de particules de tailles nanométriques suspendues dans un fluide porteur, le terme nano-fluides est introduit par **Choi et al** [2] en 1995, et ils possèdent une puissance d'échange thermique supérieure à celle des fluides conventionnels.

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un corps dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1 à 100nm). Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire.

Elles ont généralement des formes sphériques et cylindriques, ou sous forme de tube, comme les nanotubes de carbone (NTC). Les nanoparticules les plus utilisées sont classées en trois grandes familles, à savoir :

- ❖ Les nanoparticules métalliques : Cu, Ag, Au, Or...
- Les oxydes : Al₂O₃, CuO, SiO₂, TiO₂...
- ❖ Nanoparticules non métalliques :
- ❖ Nanotubes de carbone (NTC).
- Diamant (C).

Les liquides de base les plus utilisés sont :

- L'eau.
- L'éthylène glycol (EG).
- Les huiles.
- Le toluène.

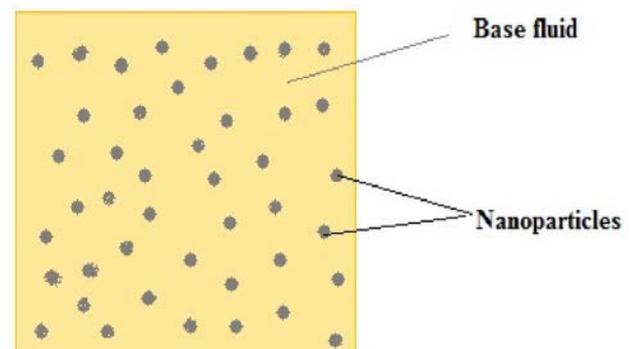


Figure I. 4 : schéma représentatif d'un fluide de base et des nanoparticules[2]

I.3.1. Technique de fabrication des nanoparticules

Le point délicat est la fabrication de ces petits morceaux de matière plus ou moins bien calibrés. 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 afin d'obtenir des particules de taille voulue.

Il y a deux méthodes principales pour obtenir un nano-fluide :

- En une étape : vaporisation d'un matériau solide sous vide puis condensation directe de sa vapeur dans le liquide.
- En deux étapes : d'abord la fabrication d'une nano poudre sèche, puis mélange et dispersion de celle-ci dans le liquide.

I.3.2. Les applications des nano-fluides

Les nano-fluides offrent des propriétés de transfert de chaleur attrayantes par rapport aux fluides de transfert de chaleur traditionnels, il peut être établi que les nanoparticules sont utilisées pour améliorer la conductivité thermique des fluides de base. Les nano-fluides peuvent être utilisés pour améliorer le transfert de chaleur et l'efficacité énergétique dans une variété de systèmes thermiques, récemment, de nombreuses entreprises voient le potentiel de la technologie des nano-fluides et travaillent activement au développement d'applications industrielles spécifique à augmenter l'efficacité du transfert de chaleur qui peut être bénéfique pour la qualité, la quantité et/ou le coût d'un produit ou d'un processus, dans cette section, on retrouve quelques exemples d'applications réelles :

a) Dans les véhicules

L'ajout de nanoparticules au liquide de refroidissement standard du moteur est dans le but d'améliorer les taux de refroidissement des moteurs d'automobiles et tous moteurs à combustions. Une telle amélioration peut être utilisée pour éliminer la chaleur du moteur avec un système de refroidissement de taille réduite. Des systèmes de refroidissement plus petits permettent d'obtenir des radiateurs plus petits et plus légers, ce qui améliore presque tous les aspects de performances des voitures et des camions et permet d'économiser du carburant.

b) Refroidissement des pièces électroniques

La densité de puissance des circuits intégrés et des microprocesseurs a augmenté de façon spectaculaire ces dernières années. Les techniques existantes de refroidissement par air pour évacuer la chaleur atteignent déjà leurs limites, et les technologies de refroidissement par liquide sont, et ont été développées pour les remplacer. Les fluides monophasés, les fluides

biphasés et les nano-fluides sont des candidats au remplacement de l'air. Tous ont des capacités de transfert de chaleur supérieures à celles des systèmes à air, et tous font l'objet d'études.

c) Dans la biomédecine

Les nano-fluides et les nanoparticules ont de nombreuses applications dans l'industrie biomédicale. Par exemple, Les nano-fluides pourraient être utilisés pour une chirurgie plus sûre en produisant un refroidissement efficace autour de la région chirurgicale, augmentant ainsi les chances de survie du patient et réduisant le risque de dommages aux organes. Dans une application contrastant avec le refroidissement, les nano-fluides pourraient être utilisés pour produire une température plus élevée autour des tumeurs afin de tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines voisines.[3]

Synthèse bibliographique

El hafad Bara et al [4] ont étudié le problème du transfert de chaleur par convection naturelle d'un nano-fluide confiné dans une enceinte carrée, ils ont utilisé la loi de puissance pour discrétiser les équations gouvernantes. Ces systèmes nécessitent des investissements élevés qui sont rentabilisés par la chaleur modèle de **Brinkman et Maxwell Garnetts**. Les simulations numériques sont réalisées avec de l'eau pure et un mélange d'eau et de nanoparticules (Al_2O_3 , Cu et TiO_2) pour un nombre de Rayleigh 10^3 à 10^6 et une fraction de nanoparticules entre 0 et 0.1. Les résultats nous montrent que le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Rayleigh, et son effet est plus important à faible nombre de Rayleigh et les nanoparticules de cuivre sont améliorées par rapport aux résultats obtenus avec ceux d' Al_2O_3 ou de TiO_2 .

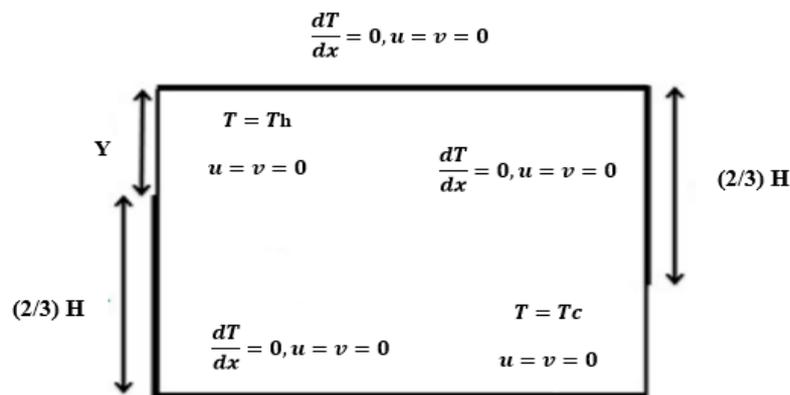


Figure I. 5 : schéma de la configuration étudiée. [4]

D'après l'étude menée par **T.S.Krishnakumar et al** [5] sur le transfert de chaleur d'un mélange éthylène glycol/eau nano-fluide contenant des TiO_2 nanoparticules. Leurs expériences sont basées sur l'influence et la variation de la fraction volumique et du nombre de Reynolds sur le taux de transfert de chaleur, la conductivité thermique et la viscosité.

Cette dernière leur a permis de déduire que :

- la conductivité thermique du nano-fluide augmente proportionnellement avec la concentration volumique et la température.
- la viscosité du nano-fluide augmente avec la fraction volumique et diminue avec l'intensification de la température.
- le coefficient de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

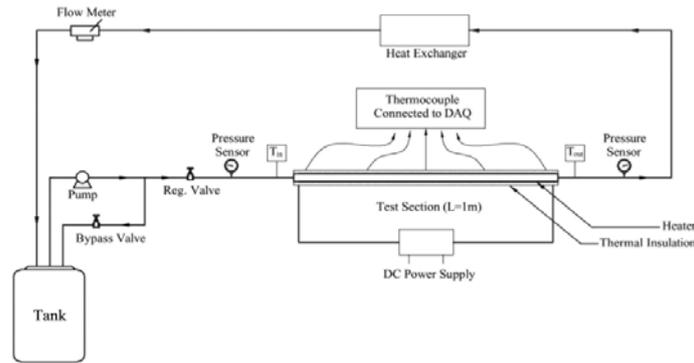


Figure I. 6 : mise en page de la configuration expérimentale. [5]

Pour en découvrir d'avantage de paramètres influents sur le taux de transfert de chaleur une étude expérimentale a été menée par **Ayad S. Abedalh et al** [6] sur l'écoulement convectif chauffé sous un écoulement laminaire des nano-fluides hybrides sur la marche arrière dans une conduite rectangulaire, ils ont utilisé des nanoparticules de Al_2O_3 et TiO_2 en suspension dans l'eau pure, le processus de préparation du nano-fluide hybride pour une fraction de masse de 1%, 2% et 3% a été mené à des résultats montrant que le nombre de Nusselt et le facteur de friction augmentent parallèlement avec la fraction massique, mais la friction diminue lors de l'augmentation du nombre de Reynolds.

En 2011, **A.R. Sajadi et M.H. Kazemi** [7] ont étudié l'influence d'un régime turbulent et la chute de pression du nano-fluide TiO_2 sur le taux du transfert de chaleur convectif, cette expérience s'est basée sur la variation de la fraction volumique allant de 0 à 0.25, et du nombre de Reynolds allant de 5000 à 30000, cette dernière les a mené vers des résultats indiquant que l'ajout de nanoparticules au fluide de base augmente remarquablement le transfert de chaleur, et la chute de pression du nano-fluide est légèrement supérieure à celle du fluide de base et elle augmente avec la concentration volumique, et diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds sous une même concentration volumique.

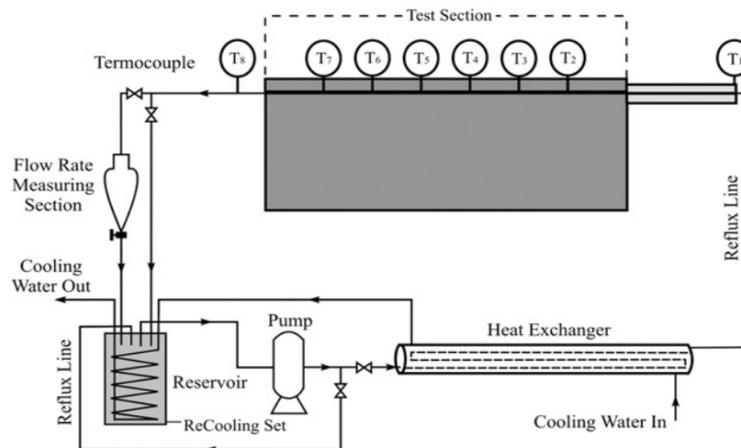


Figure I. 7 : Schéma de l'installation expérimentale. [7]

En juin 2005, **Sidi El Bécaye Maïga et al** [8] ont étudié le problème de l'écoulement laminaire à convection forcée de nano-fluides en détail pour deux configurations géométriques particulières, à savoir un tube uniforme chauffé et un système de disques parallèles coaxiaux chauffés, dans cette étude deux nano-fluides ont été considérés, à savoir Ethylène Glycol- Al_2O_3 et eau- Al_2O_3 , les résultats ont révélé que la concentration volumique des nanoparticules a produit une augmentation du taux de transfert de chaleur par rapport au liquide de base, et aussi l'amélioration du transfert de chaleur est dû à l'augmentation du nombre de Reynolds, cette augmentation de transfert de chaleur s'accompagne d'un effet négatif radical sur la contrainte de cisaillement de la paroi, enfin, on déduit que le Ethylène Glycol Al_2O_3 offre un meilleur effet que l'eau- Al_2O_3 mais il est soumis à des contraintes de cisaillement considérable.

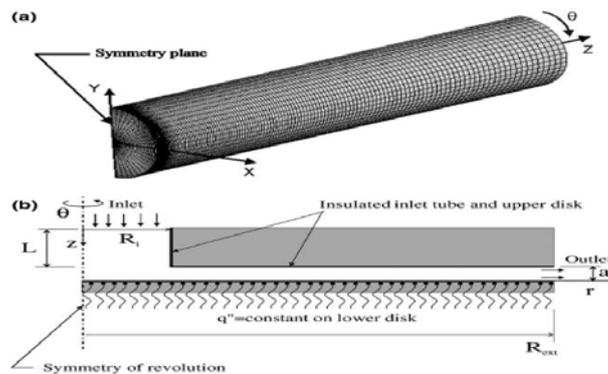


Figure I. 8 : Configurations géométriques étudiées : (a) un tube chauffé uniformément et (b) un canal radial entre des disques chauffés. [8]

Resam Dehnavi , Abdollah Rezvani [9] ont fait une étude sur la convection naturelle et l'écoulement dans une enceinte en forme de Γ remplie du nano-fluide Al_2O_3 -Eau avec une différence de température, le modèle a été développé afin d'analyser les effets des différentes tailles et diamètres des nanoparticules, fraction de volume et nombre de Grachoff. Ils ont obtenu que le Nusselt est proportionnel à $R (dP_{\min}/dP_{\max})$ et la fraction de volume, et la distance entre les deux parois est inversement proportionnel au diamètre des nanoparticules.

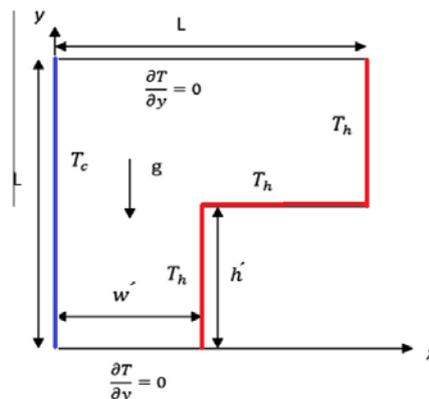
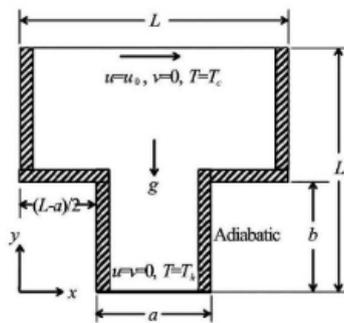
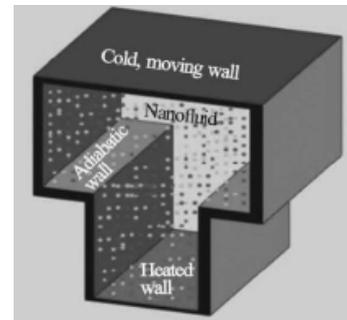


Figure I. 9 : schéma du modèle et les conditions au limite. [9]

MOJUMDER et al [10] ont fait une étude sur la convection mixte dans une cavité en forme de T rempli d'un nano-fluide Al_2O_3 -eau, la résolution numérique avec la méthode de Galerkin weighted résiduel, la solution est obtenue pour différentes fractions volumiques, nombre de Grachof et nombre de Reynolds en régime d'écoulement laminaire, la convection naturelle est introduite par une paroi inférieure chauffée de manière isotherme, tandis que le mouvement du couvercle au niveau de la paroi supérieure froide induit un régime de convection forcée. Une fraction volumique élevée donne un meilleur transfert par convection ; En augmentant le Reynolds l'écoulement change complètement et aussi il augmente le flux transféré. Un nombre de Grachof élevé entraîne une hausse en nombre Nusselt et un meilleur transfert de chaleur.



A-modèle 2D



B-modèle 3D

Figure I. 10 : schéma de la cavité sous forme de T. [10]

YANWEI et al [11] ont fait une étude expérimentale et numérique sur l'effet de la fraction volumique et du nombre de Rayleigh sur la convection naturelle d'un nano-fluide Al_2O_3 -eau dans une enceinte carrée, le modèle de Lattice Boltzmann à deux phases a été utilisé pour la résolution numérique, les résultats ont montré que comparé à l'eau pure on a un plus grand transfert pour de petite fraction massique et une réduction pour des fractions massiques élevées, la différence de température à un grand effet sur la distribution de la fraction volumique des nanoparticules est grande près du sommet et petite près du fond, la différence de température, la force brownienne, la force potentielle d'interaction et la force de gravité ont un effet positif sur l'amélioration de la convection naturelle tandis que la force de traînée est négative.

En 2014, **Mohammad Nasim Hasan et al** [12] ont étudié la convection mixte dans une cavité carrée remplie de nano-fluides Cu-eau numériquement en prenant compte les différents paramètres tel que le Richardson et la fraction volumique, l'étude leur a permis de déduire que le nombre de Richardson a un rapport direct sur le type de convection et son augmentation augmente le taux de transfert de chaleur.

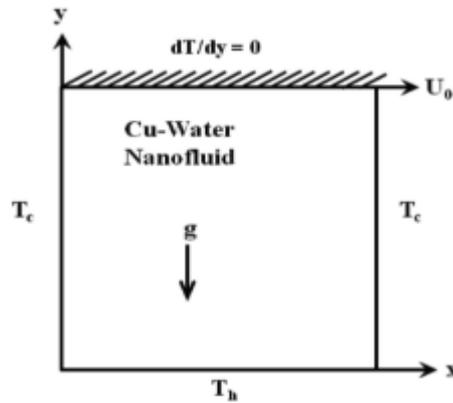


Figure I. 11 : modèle physique de l'étude. [12]

Hakan and Eiyad Abu-Nada [13] ont mené des études numériques pour analyser l'effet d'employer différents nano-fluides sur la distribution du champ des températures dans une enceinte de hauteur (H) et de longueur (W) remplie d'un mélange d'eau et de nanoparticule. Différents types du nano-fluides (Cu, Al_2O_3 , TiO_2) et différentes fractions volumiques ($\phi=0.1$ $\phi=0.2$). Le mur gauche est maintenu à une température constante (T_H) plus que la Température du mur droit (T_L). Ils ont montré que la valeur du nombre de Rayleigh, la taille du réchauffeur et la fraction volumique des nano-fluides affectent la force de transfert thermique.

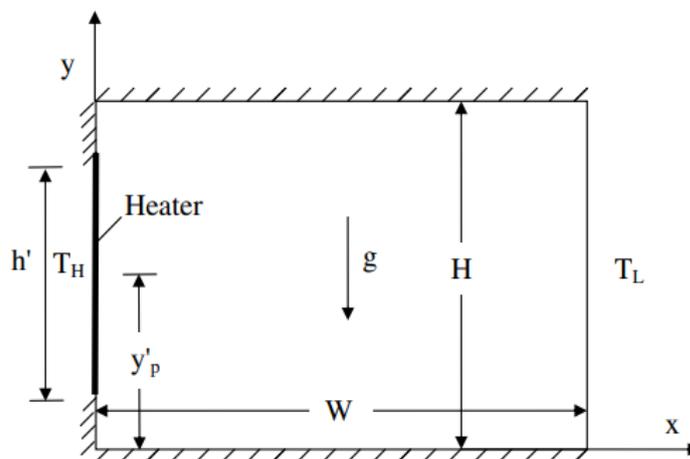


Figure I. 12 : schéma de la géométrie. [13]

Billah et al [14] ont étudié numériquement le comportement des nano-fluides dans une enceinte triangulaire entraînée par le couvercle et qui est chauffée partiellement à travers le côté inférieur afin de mieux comprendre les processus de recirculation convective et d'écoulement provoqué par un nano-fluide. Les résultats numériques sont obtenus pour de différents paramètres tels que le nombre de Richardson. Ils ont obtenu les conclusions : les champs thermiques et d'écoulement, ainsi que le taux de transfert de chaleur à l'intérieur de l'enceinte sont fortement dépendants du nombre de Richardson. Le taux de transfert de chaleur est minimal à chaque fois que la longueur de la paroi est plus grande. Les nano-fluides sont

capables de modifier la structure de l'écoulement. La longueur de chauffage affecte le transfert de chaleur dans les fluides purs et les nano-fluides.

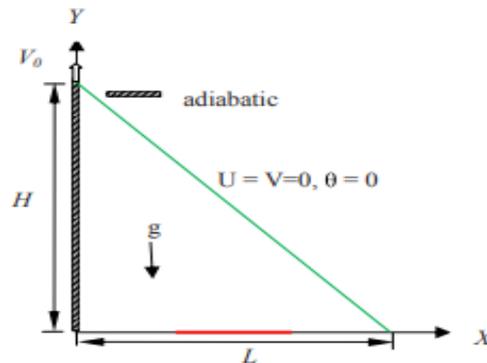


Figure I. 13 : schéma du modèle étudié. [14]

Eiyad Abu-Nada et Ali J. Chamkha [15] ont fait une étude caractéristique sur le transfert par convection naturelle dans une enceinte carrée chauffée différemment remplie du nano-fluide CuO-EG-eau, le problème est résolu par la méthode de volume finis, le nombre de Rayleigh est entre $[10^3 ; 10^5]$ est la fraction ϕ $[0 ; 6\%]$ ils ont montré que L'effet des modèles de viscosité sont plus important sur le comportement du nombre de Nusselt moyen que l'influence des modèles de conductivité thermique.

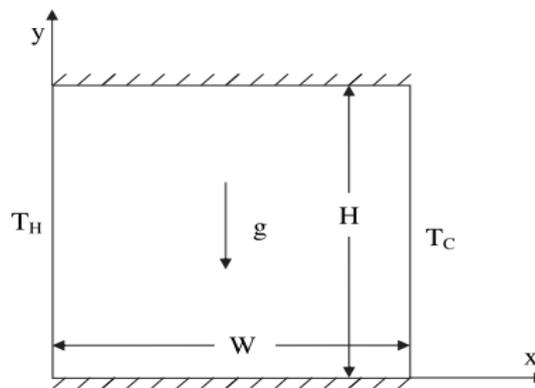


Figure I. 14 : schéma de l'enceinte. [15]

Haddad et al [16] ont observé l'effet du mouvement brownien et thermophorèse sur le transfert de chaleur d'un nano-fluide CuO-eau en prenant compte le problème Rayleigh-Bernard, la résolution des équations par la méthode des volumes finis a permis de constater une amélioration de transfert de chaleur lors de la présence des effets brownien et thermophorèse et il est optimal pour de faible concentration des nanoparticules.

Dans l'étude de **Mohamad Sadegh Sadeghi et al** [17] menée en 2021 sur la convection naturelle d'un nano-fluide CuO-eau dans une cavité rectangulaire avec des ailettes fixées à la paroi isolée et un milieu poreux, ces derniers ont utilisé la méthode des éléments finis pour discrétiser les équations de Navier et Stocks sous les hypothèses d'un écoulement laminaire,

stable et incompressible et tout cela pour de différents nombres de Rayleigh [10^3 , 10^5], Darcy [10^{-2} , 10^{-4}] et Hartmann (0,10,20) et aussi pour différentes tailles d'ailettes. Ils ont résolu que l'accroissement du nombre de Hartmann et les longueurs des ailettes influencent négativement sur le taux de transfert de chaleur contrairement au nombre de Darcy qui influence positivement sur le taux de transfert de chaleur.

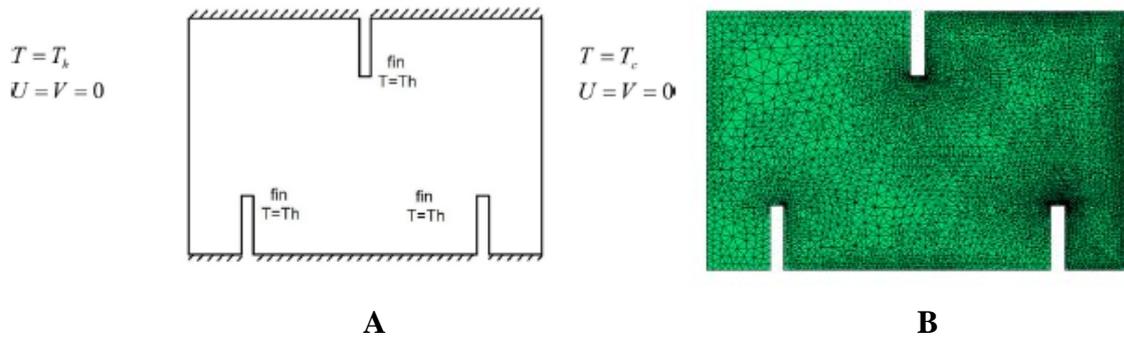


Figure I. 15 : a- schéma de la géométrie étudiée. b-maillage. [17]

D'après l'étude numérique menée par **Asma Ouahouah et al** [18] sur la convection naturelle dans une cavité avec une paroi de fond chauffée d'une manière non uniforme, partiellement remplie d'une couche de nano-fluides non newtonien (Cu-eau) et d'une couche d'air, la résolution du problème physique a été faite par la méthode des volumes finis sur une large gamme de nombres Rayleigh ($10^3 \leq Ra \leq 10^6$), la fraction volumique des nanoparticules ($0\% \leq \phi \leq 5\%$), le taux de remplissage de la phase inférieure ($0,25H \leq H_{nf} \leq H$) et le rapport d'aspect de la cavité ($0,5 \leq A \leq 4$). Les résultats montrent que le taux de transfert s'intensifie avec l'accroissement de Rayleigh, fraction volumique des nanoparticules, le taux de remplissage de la phase inférieure et le rapport d'aspect de la cavité, la relation prédictive reliant le nombre de Nusselt moyen aux paramètres cités ont été proposés.

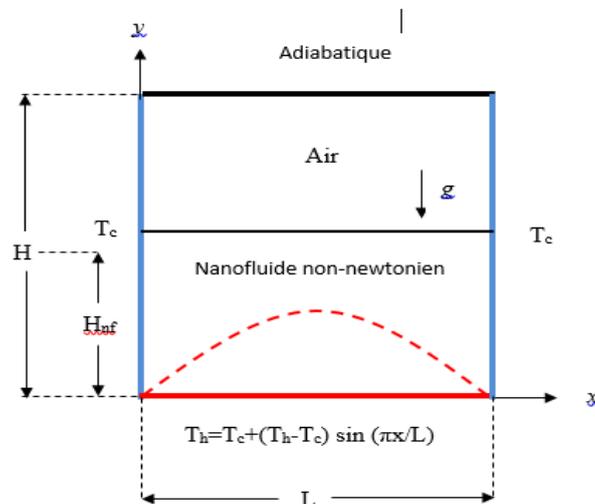


Figure I. 16 : le schéma du problème physique. [18]

En 2020, **Debashis Dey et Dibyansu Sekhar Sahu** [19] ont mené une étude expérimentale sur la mise en œuvre dans une cavité à convection naturelle de trois litres, et l'étude de l'effet sur le transfert thermique. Dans leur expérience, ils ont maintenu la paroi droite et gauche à des températures froide et chaude, cette dernière est refroidie grâce à un bain-marie fabriqué à température constante. Les nanoparticules dans cette expérience sont utilisées pour but de visualiser l'écoulement avec de la fumée et de l'eau colorée, ils ont observé que le mouvement de la boucle de l'air est plus rapide, cela est dû au gradient de température très élevé et à une faible densité (1.2 kg/m^3), contrairement à l'eau qui a un très faible gradient de température et une densité très élevée (1000 kg/m^3), aussi ils ont constaté que la préparation des nanoparticules avec le microparticule par broyage manuel est impossible dû à la taille des nanoparticules qui est inférieure à 100 nm ce qui n'est pas leur cas dans cette expérience.

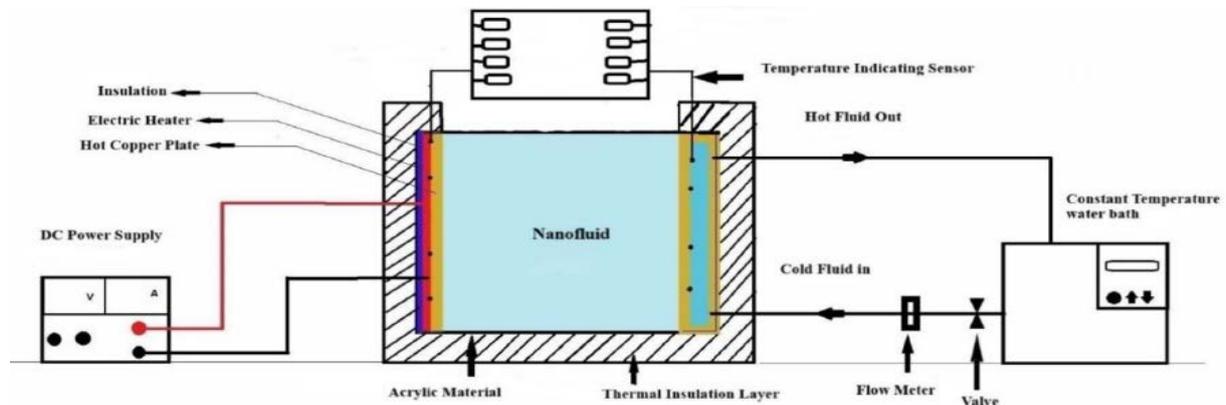


Figure I. 17 : schéma explicatif de l'expérience. [19]

En 2019, une étude numérique de la convection naturelle diphasique du nano-fluide Cu-eau dans une cavité carrée est menée par **Danjie Xu et al** [20], pour la résolution des équations gouvernantes, ils ont utilisé une nouvelle méthode de Boltzmann de Treilles pour différents paramètres, le Rayleigh ($10^3 \leq Ra \leq 10^6$) et la fraction volumique initiale des nanoparticules ($0.01 \leq \Phi \leq 0.05$) et leurs effets sur les lignes d'écoulements, les isothermes et le nombre de Nusselt, les résultats montrent qu'à fraction volumique initiale et à nombre de Rayleigh élevé les mécanismes de glissement jouent un rôle important, et que le modèle à deux phases doit être adopté au lieu du modèle mono phase homogène conditionnel.

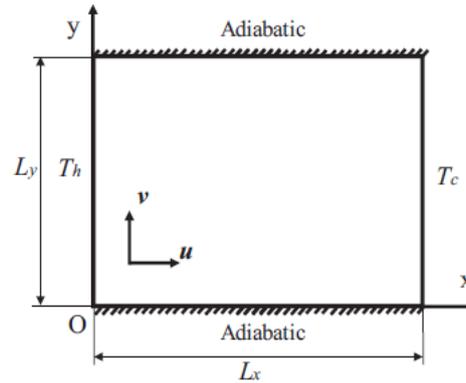


Figure I. 18 : la configuration géométrique du problème. [20]

Pour en étudier davantage sur les nano-fluides **Charazed Abdellahoum et al** [21] se sont focalisés sur un paramètre critique qui est la viscosité et ces différents modèles, et de la convection forcée d'un écoulement turbulent du nano-fluide Al_2O_3 sur une cavité chauffée dans une conduite horizontale, les équations sont discrétisées par la méthode des volumes finis basée sur un fermeture ponctuelle d'un modèle de turbulence de premier ordre, l'étude s'est faite pour cinq modèles de viscosité (Pack et Cho, Maiga, Einstein, Brikman et Batchlor) elles sont testées pour différents paramètres et leurs effets sur le transfert thermique, ces paramètres sont le Reynolds ($10^4 \leq \text{Re} \leq 10^5$) et la concentration en nanoparticules ($0 \leq \Phi \leq 4\%$), les résultats montrent que le nombre moyen de Nusselt augmente avec la fraction volumique de nanoparticules pour toute la gamme du nombre de Reynolds. Ils ont déduit que le modèle d'Einstein, Brinkman et Batchlor montre des résultats similaires et moins de friction et de transfert de chaleur contrairement au modèle de Pack et Cho qui donne un maximum de friction et de transfert de chaleur.

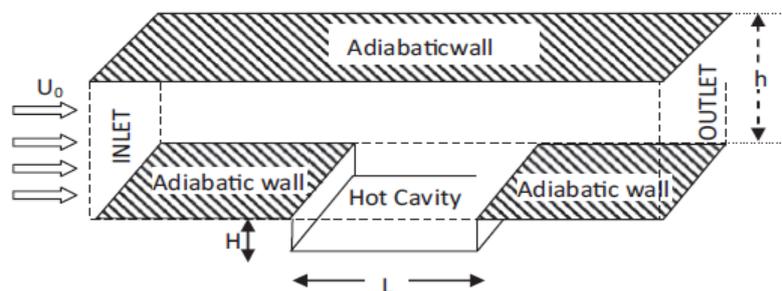


Figure I. 19 : schéma de la géométrie étudiée et des conditions aux limites. [21]

Pishkar et Ghasemi [22] ont présenté une étude numérique sur la performance thermique de deux ailettes montées sur le fond d'une paroi d'un canal horizontal et refroidies soit avec de l'eau pure soit avec un nano-fluide (Cu-eau). La paroi inférieure du canal est chauffée à une température constante et refroidie par convection mixte laminaire à une température

relativement basse. La paroi supérieure est adiabatique. Les résultats de la simulation indiquent que le taux de transfert de chaleur est considérablement affecté par la conductivité thermique des ailettes. L'influence de la fraction volumique solide du nano-fluide sur l'augmentation du taux de transfert de chaleur est plus sensible. A des valeurs plus élevées du nombre de Reynolds, les ailettes se comportent différemment de leurs performances thermiques à des valeurs plus élevées du nombre de Reynolds.

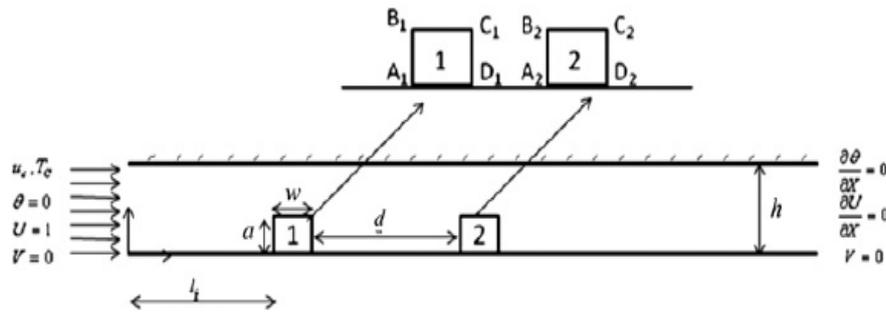


Figure I. 20 : géométrie du problème physique. [22]

Shariat et al [23] ont analysé les caractéristiques de l'écoulement et du transfert thermique en convection mixte laminaire d'un nano-fluide (Al_2O_3 -eau) dans des conduits avec un flux de chaleur constant. Des mouvements browniens de nanoparticules ont été considérés pour déterminer la conductivité thermique et la viscosité dynamique du nano-fluide. Les résultats révèlent que pour un nombre de Reynolds (Re) et un nombre de Richardson (Ri) donnés, l'augmentation de la fraction volumique solide des nanoparticules augmente le nombre de Nusselt (Nu), la ratio $AR=b/a$ réduit l'effet de friction et il n'a pas d'effet sur le nombre de Nusselt.

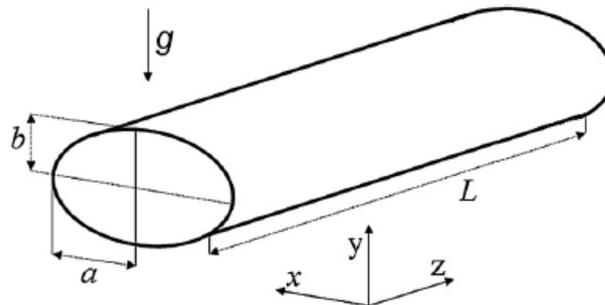


Figure I. 21 : présentation de la géométrie étudiée. [23]

Wei Xue et al [24] ont fait une recherche dont le but est de sélectionner les nano-fluides à base d'ammoniac-eau optimale, ils ont étudié l'effet de chauffage sur la viscosité et la conductivité thermique, ils ont utilisé 6 types d'ammoniac-eau nano-fluides qui ont été préparé en double, un groupe a été chauffé à une température de 120 c pour 4 heures puis laissé

refroidir à température ambiante, l'autre groupe a été testé sans chauffer pour comparer, ils ont conclu que la conductivité thermique et la viscosité augmente en chauffant sauf que la viscosité de γTiO_2 ammoniac-eau et l'ammoniaque n'a pas d'effet sur eux, le tensioactif améliore la stabilité du nano-fluide et réduit sa viscosité mais la température élevée annule son effet.

En 2017, **M. ADNANI et al** [25] ont fait une étude numérique de la convection naturelle en régime laminaire dans une cavité carrée soumise à des conditions aux limites thermiques sur les parois latérales, la méthode des volumes finis a été adoptée pour la résolution du système algébrique, la mise sous forme adimensionnelle a fait apparaître le nombre de Rayleigh et de Prandtl, les résultats nous montrent que le transfert de chaleur et le champ d'écoulement sont plus prononcés avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et les couches limites thermiques ont tendance à croître vers les parois latérales pour des nombres de Rayleigh élevés, et le champ de l'écoulement est légèrement prononcé avec l'augmentation du nombre de Prandtl et diminue avec l'augmentation du nombre Rayleigh, le transfert de chaleur n'est pas affecté par le nombre de Prandtl pour les faibles nombres de Rayleigh et est moins prononcé pour des nombres de Rayleigh très élevés.

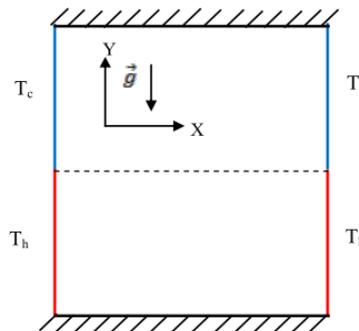


Figure I. 22 : modèle physique. [25]

Dans cet article une étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité tridimensionnelle remplie de nano-fluide a été menée par **M.SANNAD et al** [26], cette configuration est chauffée par un bloc maintenu à une température chaude constante est uniforme T_h , les deux parois droite et gauche sont maintenues à une température froide T_c , tandis que le reste est adiabatique. Dans la première partie de cet article, ils ont analysé que l'effet de différents paramètres sur le transfert thermique, à savoir la fraction volumique, le nombre de Rayleigh et la hauteur de la source de chaleur afin d'identifier les situations optimales favorisant le transfert de chaleur pour mettre en évidence l'effet généré par chaque paramètre. Dans la deuxième partie ils ont effectué une comparaison entre trois types de nanoparticules (cuivre (Cu), oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et oxyde de titane (TiO_2)). L'analyse des résultats montre

que le nano-fluide à base du cuivre et l'augmentation de la fraction volumique garantit le meilleur transfert thermique, et l'augmentation de la taille de la section et du nombre de Rayleigh conduit à une augmentation de la quantité de chaleur.

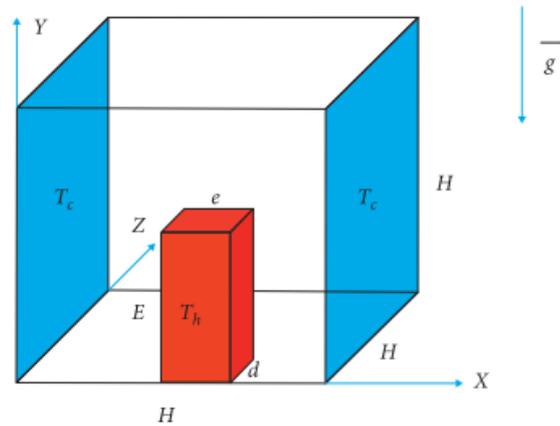


Figure I. 23 : la configuration étudiée. [26]

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons revu différentes caractéristiques des nano-fluide et leurs intérêts dans le domaine du transfert thermique. Une recherche bibliographique nous a clarifié l'impact de l'ajout des nanoparticules aux fluides de bases dans le but d'améliorer le transfert thermique. Se basant sur les dernières recherches menées sur les nano-fluides, le chapitre suivant sera consacré à une autre considération d'amélioration de transfert de chaleur d'une cavité menée d'un bloc soumis à une température froide.

Chapitre II

Formulation mathématique

Formulation mathématique

II.1. Introduction

Dans ce présent chapitre, nous allons présenter notre model d'étude qui est une cavité carrée remplie de nano-fluide Al_2O_3 -eau avec leurs différents paramètres thermo-physiques, ce fluide est soumis à des équations gouvernantes qui seront présentées sous leurs formes dimensionnelles et adimensionnelles.

II.2. Domaine physique

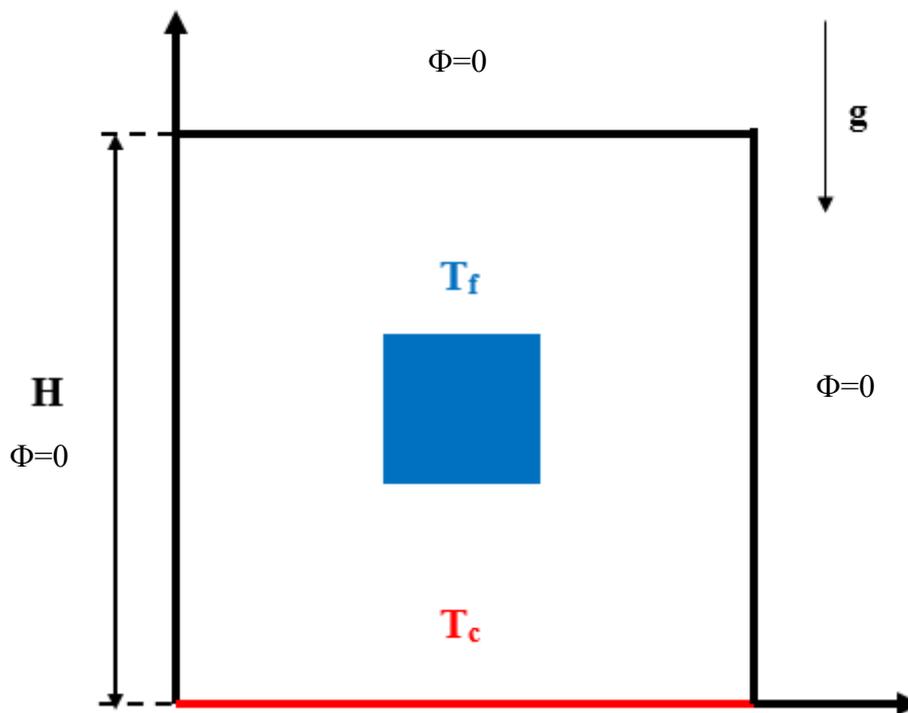


Figure II. 1 : la géométrie a étudié.

Le domaine physique est une enceinte carrée fermée bidimensionnelle de longueur H remplie d'un nano-fluide Al_2O_3 -eau avec un bloc carré au centre soumis à une température froide T_f , elle est chauffée par la paroi inférieure avec une température chaude T_c et toutes les autres parois sont isolées.

II.3. Les hypothèses simplificatrices du problème

- Le fluide est newtonien
- L'écoulement laminaire bidimensionnel

- L'écoulement et le transfert thermique sont indépendants du temps
- Le transfert de chaleur par radiation est négligé
- La dissipation visqueuse est négligée dans l'équation d'énergie
- L'approximation Boussinesq est adoptée, ce qui veut dire que l'influence de la variation de la masse volumique de fluide en fonction de la température n'est prise en compte que dans le terme représentant les forces de volumes, la variation de la masse volumique est donnée : $\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_{ref})]$ (II.1)

ρ_0 Est la masse volumique de référence du fluide à la température de référence.

β Est le coefficient d'expansion thermique qui est donné par :

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left[\frac{\partial \rho}{\partial T} \right] \quad (\text{II.2})$$

II.4. Les paramètres thermo-physiques

II.4.1. La masse volumique

La masse volumique d'un nano-fluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique φ et à une température T donnée et comme suit :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (\text{II.3})$$

la fraction volumique est :

$$\varphi = \frac{V_s}{V_T} \quad (\text{II.4})$$

II.4.2. La chaleur spécifique

Elle correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température pour une unité de substance de 1K lors d'une transformation, pour les nano-fluides on a les deux relations suivantes :

a) Modèle de Xuan et Reotzel

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s \quad (\text{II.5})$$

b) Pak et Cho

$$(C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(C_p)_f + \varphi(C_p)_s \quad (\text{II.6})$$

II.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 $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)$ (II.7)

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

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (\text{II.8})$$

On déduit l'expression :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad (\text{II.9})$$

II.4.4. la viscosité dynamique

La viscosité peut être définie comme étant une propriété d'un fluide pour qu'il résiste à la déformation lorsqu'il est mis en mouvement, elle est comme une mesure de frottement interne d'un fluide, la dispersion des nanoparticules permet d'augmenter et améliorer la conductivité thermique du nano-fluide mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions :

a) Modèle d'Einstein

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

$$\text{Pour } \varphi \leq 0.03 \quad \mu_{nf} = \mu_f (1 - 2.5\varphi) \quad (\text{II.10})$$

b) Modèle de Brinkman

Brinkman (1952) a complété la formule d'Einstein pour qu'elle puisse être utilisée jusqu'à des concentrations volumiques inférieures à 4%

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

II.4.5. La conductivité thermique

Comme mentionné précédemment les nano-fluides font preuve de caractéristiques supérieures de transfert de chaleur par rapports aux fluides conventionnels, l'une des raisons

que les nanoparticules suspendues augmentent la conductivité thermique des nano-fluides. Il existe plusieurs modèles théoriques permettant d'estimer, sous certaines conditions, la conductivité thermique des suspensions. Nous présenterons dans cette partie l'un des modèles les plus utilisés dans le cas des nano-fluides.

a) Modèle de maxwell

Maxwell est l'un des chercheurs qui se sont intéressés au calcul de la conductivité thermique d'un fluide contenant des particules sphériques en suspension. Il a supposé que le fluide renferme plusieurs particules sphériques de même diamètre. Les particules sont supposées suffisamment éloignées l'une de l'autre pour négliger l'interaction mutuelle.

Le modèle de maxwell est valable uniquement pour les nanoparticules de forme sphérique, il est donné par la relation suivante :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - [2(k_f - k_{np})\varphi]}{k_p + 2k_f + [\varphi(k_f - k_{np})]} \quad (\text{II.12})$$

II.5. Les équations gouvernantes

II.5.1 Equation de continuité

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.14})$$

II.5.2. Equation de conservation de quantité de mouvement

$$\rho_{nf} \left(V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 V_j}{\partial x_i^2} \right) + (\rho\beta)_{nf} (T - T_0) g_i \quad (\text{II.15})$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.16})$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - (\rho\beta)_{nf} (T - T_0) g$$

II.5.3. Equation d'énergie

$$(\rho C_p)_{nf} \left(V_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = k_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \right) \quad (\text{II.17})$$

Où :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.18})$$

II.5.4. Les paramètres adimensionnels

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{H}; Y = \frac{y}{H}; U = \frac{uH}{\alpha_f}; V = \frac{vH}{\alpha_f} \\ P &= \frac{p + \rho_0 g y H^2}{\rho_{nf} \alpha_f^2} \\ \theta &= \frac{(T - \Delta T / 2)}{\Delta T}; \Delta T = (T_C - T_F) \end{aligned} \quad (\text{II.19})$$

Dans l'ordre de limité les variables dans nos équations, on leurs a introduit des paramètres adimensionnels (1) pour les simplifier. On obtient :

$$\begin{aligned} U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} &= -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\alpha_f \rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \\ U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} &= -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\alpha_f \rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Ra * Pr * \frac{\rho_f \beta_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} * \theta \\ U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} &= \frac{\mu_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{II.20})$$

II.5.5. Les conditions aux limites pour le modèle bidimensionnel

Tableau II. 1 : les condition au limite de la cavité.

Parois	Conditions hydrodynamiques	conditions thermique
X=0 et $0 \leq Y \leq 1$	U=V=0	$\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$
X=1 et $0 \leq Y \leq 1$	U=V=0	$\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$
Y=0 et $0 \leq X \leq 1$	U=V=0	$\theta=1$
Y=1 et $0 \leq X \leq 1$	U=V=0	$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$
$0.4 \leq Y \leq 0.6$ $0.4 \leq X \leq 0.6$	U=V=0	$\theta=0$

II.5.6. Paramètres du nano-fluide (Al₂O₃-eau)

Les propriétés thermo-physiques du fluide de base (eau) et des nanoparticules (Al₂O₃) sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II. 2 : paramètres thermo-physique du fluide de base et de la nanoparticule.[13]

	eau	Al ₂ O ₃
ρ (kg/m ³)	997.1	3970
C_p (J/kg.K)	4179	765
K (W/m.K)	40	0.0257
β (K ⁻¹)	21 10 ⁻⁵	0.85 10 ⁻⁵

Les propriétés thermo-physiques du nano-fluides peuvent être calculées par les relations théoriques suivantes :

$$\begin{aligned}
 \rho_{nf} &= (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_p \\
 (\rho C_p)_{nf} &= (1 - \varphi)(\rho C_p)_{bf} + \varphi(\rho C_p)_p \\
 (\rho\beta)_{nf} &= (1 - \varphi)(\rho\beta)_{bf} + \varphi(\rho\beta)_p \\
 \alpha_{nf} &= \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}}
 \end{aligned} \tag{II.21}$$

La conductivité thermique et la viscosité dynamique sont définies par les modèles de Maxwell et Brinkman respectivement :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - [2(k_f - k_{np})\varphi]}{k_p + 2k_f + [\varphi(k_f - k_{np})]} \tag{II.22}$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \tag{II.23}$$

$$Ra = \frac{\rho_f \beta_f g \Delta T}{\alpha_f \mu_f} \tag{II.24}$$

Tableau II. 3 : paramètres thermo-physique du nano-fluide pour différents concentration volumique.

Φ	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0,1
ρ (kg/m ³)	997,1	1056,558	1116,016	1175,474	1234,932	1294,39
C_p (j/k*kg)	4179	3922,438978	3693,215567	3487,18138	3300,98696	3131,898276
K (W/m*k)	0,613	0,648823843	0,686071115	0,724828376	0,765189346	0,807255666
μ (N*s/m ²)	0,001003	0,001054959	0,001110767	0,001170796	0,001235468	0,001305253
B (k ⁻¹)	0,00021	0,00020597	0,00020194	0,00019791	0,00019388	0,00018985
α (m ² /s)	1,47112E-07	1,56559E-07	1,56559E-07	1,76827E-07	1,87708E-07	1,99131E-07
g (m/s ²)	2,34894E-08	2,34894E-08	2,34894E-08	2,34894E-08	2,34894E-08	2,34894E-08

II.6 Méthode Numérique

Les solutions analytiques, basées sur la forme locale du problème (équations aux dérivées partielles : « E.D.P. » associées aux conditions initiales et aux limites), ne sauraient être déterminées dans le cas général, exceptés certains cas classiques connus depuis bien longtemps.

Ces cas sont pédagogiquement intéressants, quoique demeurent excessivement limités pour l'industriel en particulier au niveau des géométries considérées.

Pour obtenir une solution numérique au problème étudié, on doit transformer les équations différentielles du modèle mathématique par le biais 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.

Il existe plusieurs méthodes numériques de discrétisation des équations différentielles aux dérivées partielles, à savoir :

- La méthode des éléments finis ;
- La méthode des différences finies ;

- La méthode des volumes finis.

Dans la présente étude, nous utiliserons la méthode des volumes finis. Le schéma de discrétisation employé est de type polynomial ainsi que le couplage vitesse-pression est calculé selon l'algorithme, un algorithme développé par **Patankar** [27] (1980) dit **Algorithme SIMPLER**.

La résolution d'un problème précédemment cité, par la méthode des volumes finis, passe par les étapes suivantes :

- Maillage du domaine physique du calcul (distribution des volumes de contrôle) ;
- Discrétisation des différentes équations régissant le phénomène considéré ;
- Choix d'un algorithme de résolution des systèmes d'équations obtenues après discrétisation.

❖ Critère de convergence

Un processus est appelé itératif quand il aura atteint la convergence, c'est-à-dire tout proche de la solution stable des systèmes d'équations en un nombre optimal d'itérations, lorsque les itérations ultérieures ne produisent aucun changement significatif dans les valeurs des variables dépendantes (vitesses et température). Pratiquement, on exprime cette convergence par un test d'arrêt du processus itératif appelé aussi (critère de convergence) qui dépend de la nature du problème et des objectifs du calcul. Dans notre cas, le critère est de 10^{-5}

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi le modèle mathématique qui est composé d'un système d'équation différentiel complexe issues de la thermodynamique et de la mécanique des fluides, complété par des conditions aux limites.

Donc, l'utilisation des méthodes numériques s'avère indispensable pour la résolution des équations du modèle mathématique avec la méthode des volumes finis.

Chapitre III

Résultats et discussions

Résultats et discussions

III. 1. Introduction

Dans cette partie nous allons mener une étude numérique de la convection naturelle dans une cavité carrée. A cet effet, une étude de la sensibilité du maillage sur les résultats numériques ainsi qu'une validation du code de calcul par rapport aux travaux de références a été effectué.

Par la suite, nous allons examiner l'influence de la variation des paramètres (concentration des nanoparticules et le nombre de Rayleigh) sur les caractéristiques du transfert de chaleur.

III.2. Validation du maillage

Pour examiner notre maillage et sa fiabilité, nous avons calculer le nombre Nusselt moyen en utilisant plusieurs maillages (20x20 ; 40x40 ; 60x60 ; 80x80 ; 100x100 ; 120x120 ; 140x140 ; 160x160 ; 180x180 ; 200x200 ; 220x220 ; 240x240) pour un nano-fluide Al₂O₃-eau à une fraction volumique $\phi=0.1$ et un nombre de Rayleigh $Ra=10^5$. Les résultats du maillage en fonction du nombre de Nusselt moyen sont présentés dans la Figure III. 1 ainsi que le Tableau III. 1, on voit que les valeurs du nombre de Nusselt sont presque constantes à partir du maillage 140x140 et l'erreur ne dépasse pas 2%.

$$\varepsilon\% = \frac{Nu(140) - Nu(160)}{Nu(140)} = 0.07\% \quad (\text{III.1})$$

Tableau III. 2 : le nombre de Nusselt moyen en fonction des différent maillage

grille	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Nu _{moy}	5,7657	5,5622	5,4964	5,4687	5,4541	5,4451	5,4394	5,4351	5,4310	5,4276	5,4256	5,4231

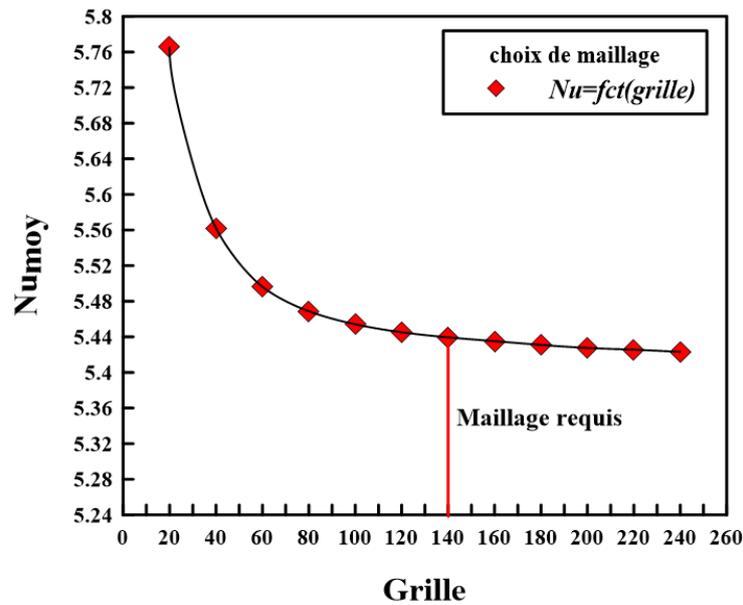


Figure III. 1 : Nombre de Nusselt en fonction du maillage.

III.3. Validation

Pour vérifier la concordance des résultats numériques, on a validé avec les résultats numériques de **H. Oztop, E. Abu Nada** qui ont étudié la convection naturelle dans une cavité carrée de hauteur (H) et de longueur (W) remplie de nano-fluides (Cu-eau, Al_2O_3 -eau, TiO_2 -eau), les parois supérieures et inférieures étaient isolées tandis que la paroi gauche est maintenue à une température chaude et celle du côté droit est à une température froide. La comparaison concerne les isothermes, lignes de courant pour différents nombres de Rayleigh ($10^3, 10^4, 10^5$) et le profil de vitesse au centre de la cavité à un Rayleigh 10^5 .

D'après les figures, nos résultats concordent à souhait avec les résultats correspondants, ce qui permet de valider notre code de calcul et donner plus de crédibilité à nos résultats numériques.

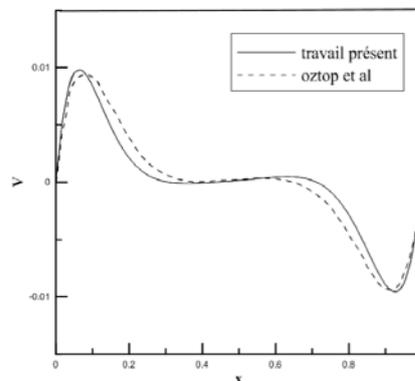


Figure III.2 : profile de vitesse selon le nombre de $Ra=10^5$, et un fraction de $\phi=0.1$, et pour $H=1, y_p=0.5$ et $h'=0.5$. [13]

a) Les lignes de courants

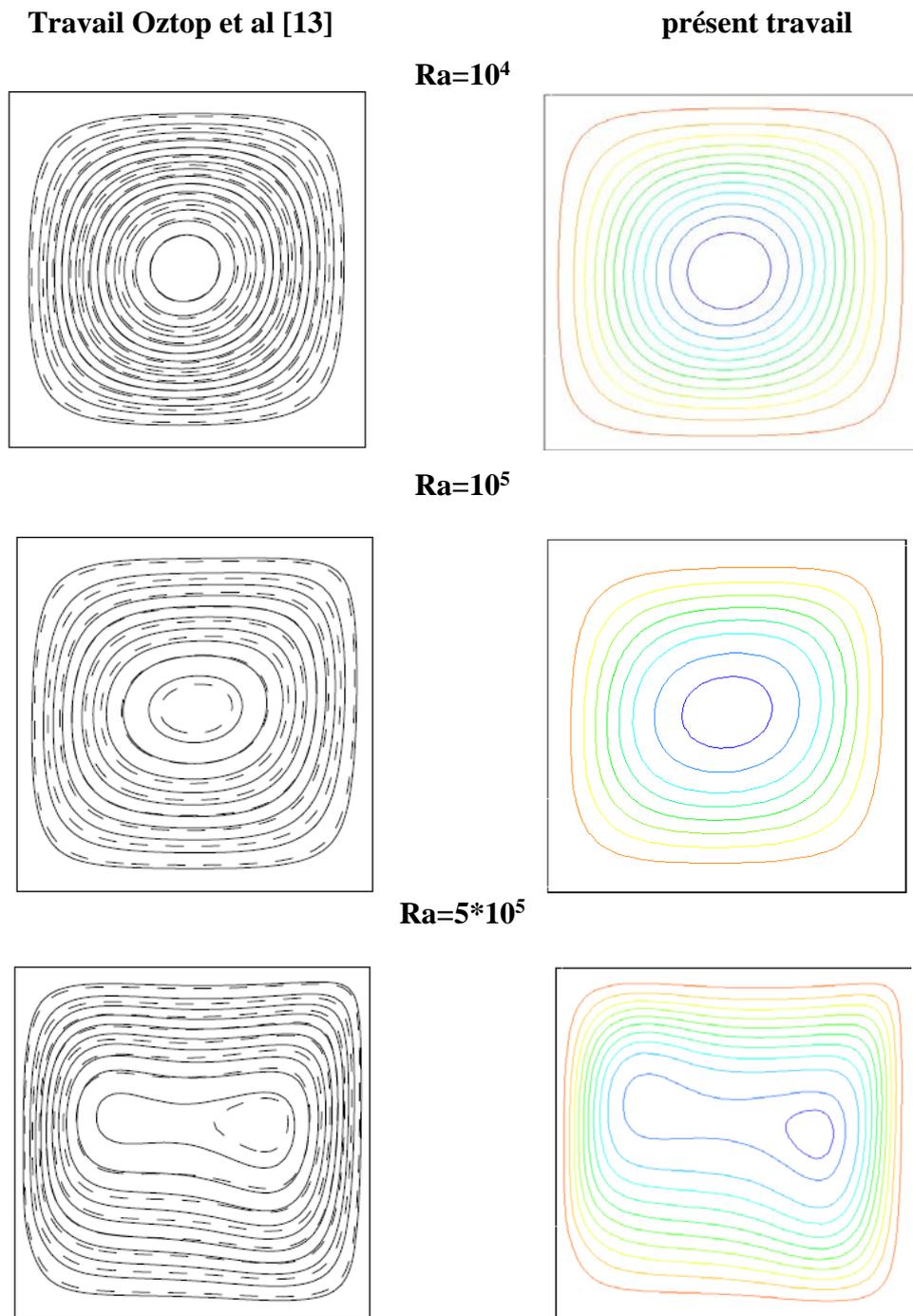


Figure III. 3 : Comparaison des lignes de courants entre nos résultats et ceux de **H.oztop** et **E.Abu Nada** pour différents Ra ($10^3, 10^4, 10^5$).

b) Les lignes isothermes

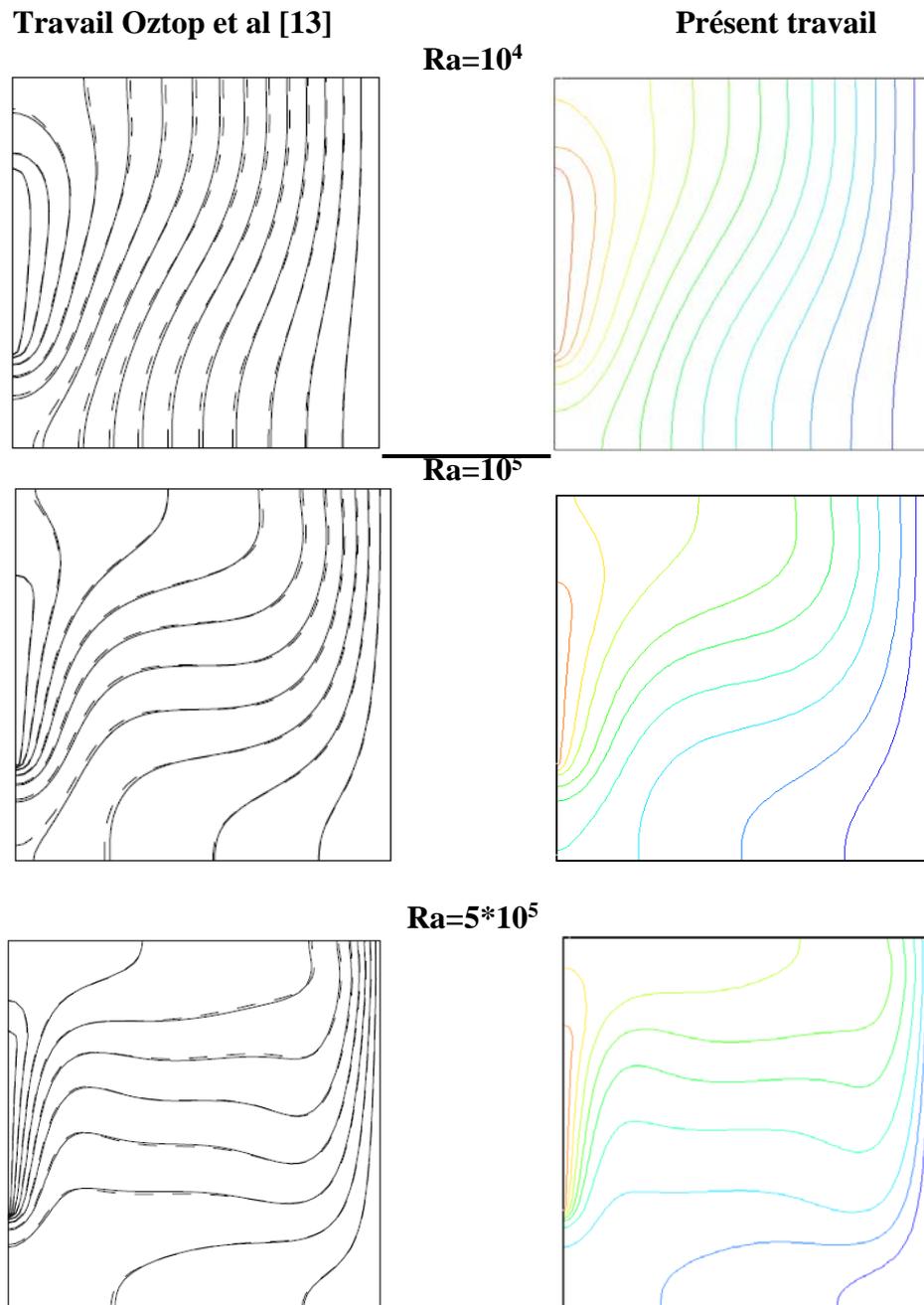


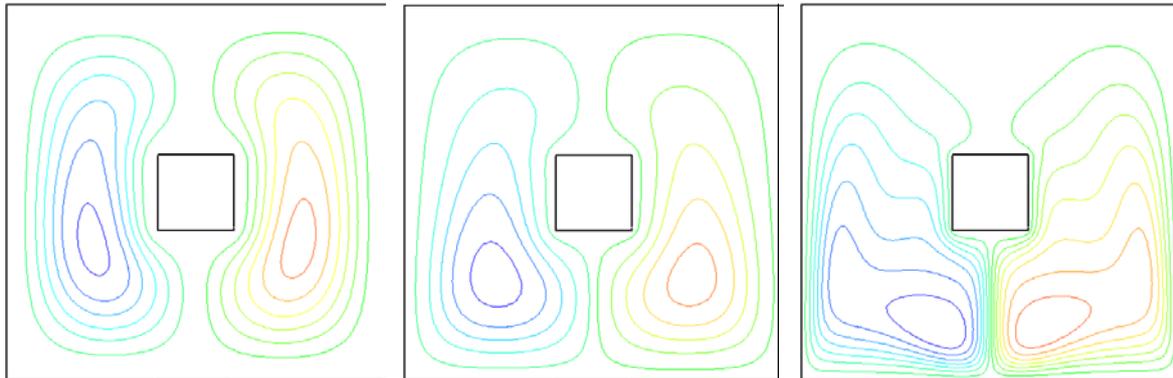
Figure III. 4 : Comparaison des lignes isothermes entre nos résultats et ceux de **H.oztop** et **E.Abu Nada** pour différents Ra ($10^3, 10^4, 10^5$).

III.4. Résultats

III.4.1. Effets de la concentration et du nombre Rayleigh

a) Les ligne de courant

Pour $\varphi=0$

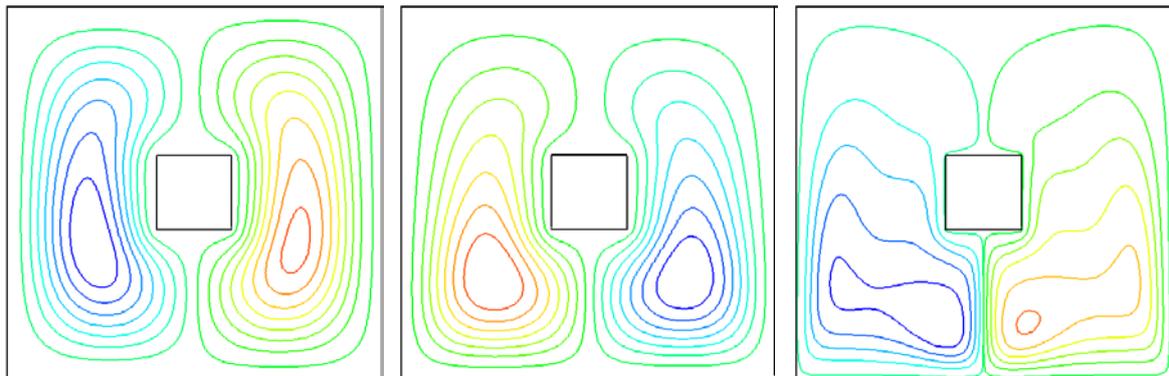


$Ra=10^3$

$Ra=10^5$

$Ra=10^7$

Pour $\varphi=0.02$

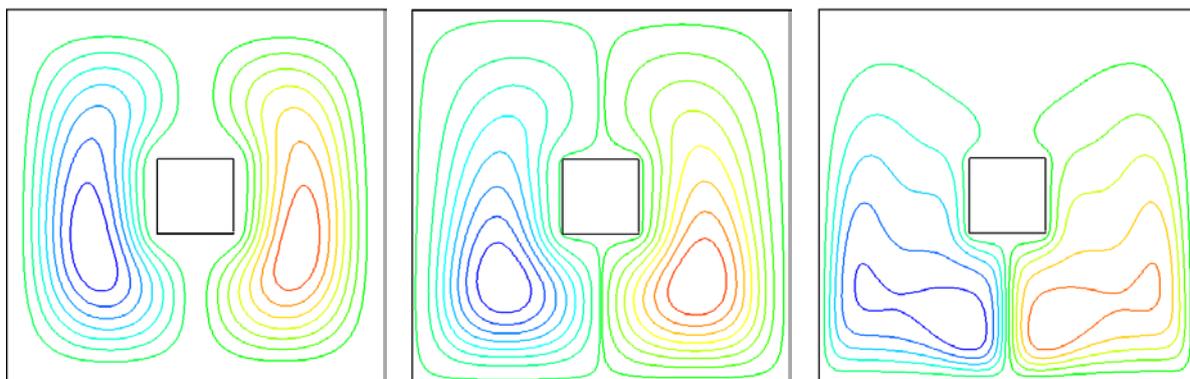


$Ra=10^3$

$Ra=10^5$

$Ra=10^7$

Pour $\varphi=0.04$

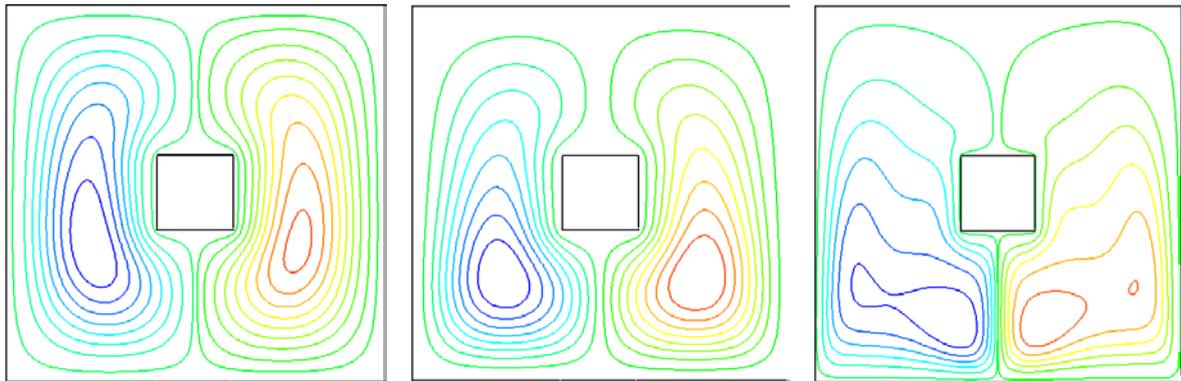


$Ra=10^3$

$Ra=10^5$

$Ra=10^7$

Pour $\varphi=0.06$

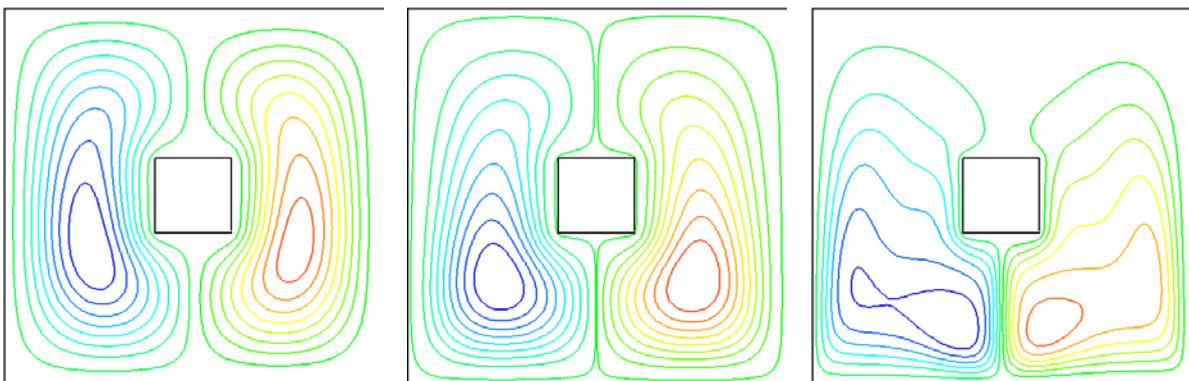


$Ra=10^3$

$Ra=10^5$

$Ra=10^7$

Pour $\varphi=0.08$

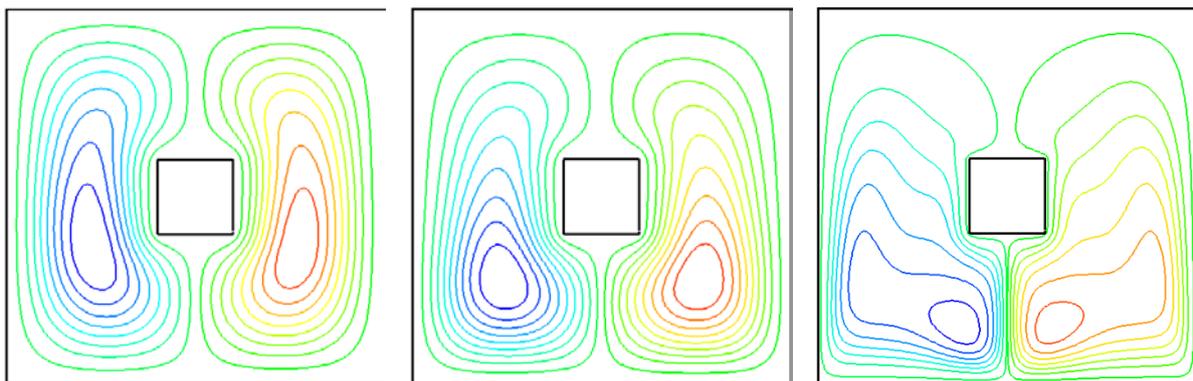


$Ra=10^3$

$Ra=10^5$

$Ra=10^7$

Pour $\varphi=0.1$



$Ra=10^3$

$Ra=10^5$

$Ra=10^7$

Figure III. 2 : les lignes de courants pour différents fraction et différents nombres Rayleigh.

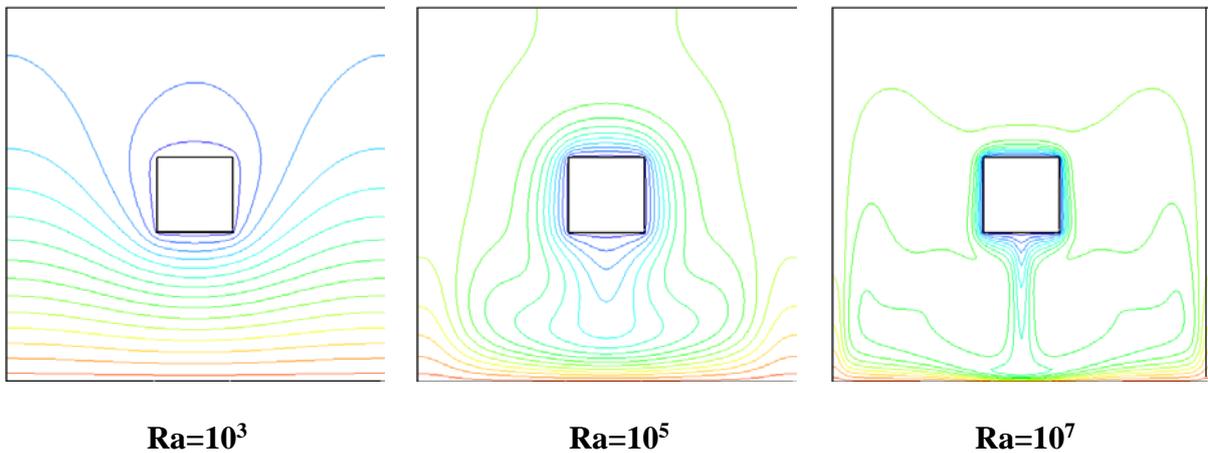
Ces champs représentés par les contours des lignes de courants dans la **Figure III.5** pour un nombre de Rayleigh qui varie ($10^3, 10^5$ et 10^7) avec différente fraction de nanoparticules

allant de (0 à 0.1), on remarque la formation de deux cellules contrarotatives dont l'une tourne dans le sens des aiguilles de la montre et l'autre dans le sens inverse. En raison de la différence de température et les forces dynamiques, le fluide s'élève le long des parois latérales isolées et elles se refroidissent au centre pour redescendre au milieu. Cette solution représente un écoulement symétrique formant deux vortex contrarotatifs pour tous les nombres de Rayleigh.

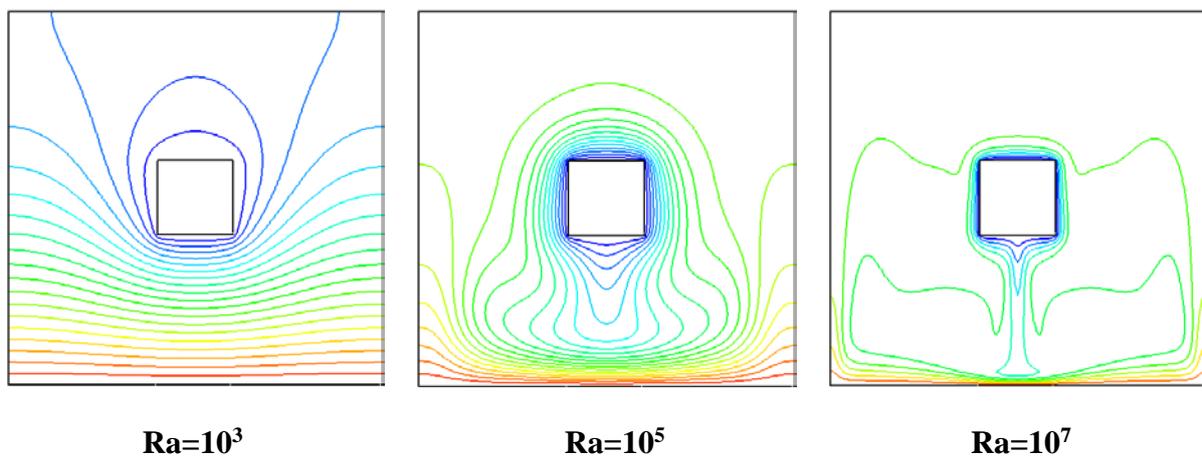
On remarque aussi que pour chaque fraction, la variation du nombre de Rayleigh pour $Ra=10^3$, les cellules prennent toutes la cavité et elles sont formées verticalement, et en augmentant le nombre de Rayleigh la circulation des particules s'intensifie de plus en plus vers le bas de la cavité en gardant la symétrie.

b) Les lignes isothermes

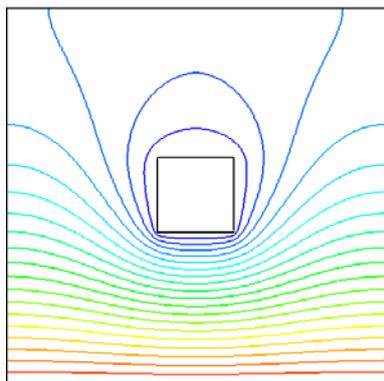
Pour $\varphi=0$



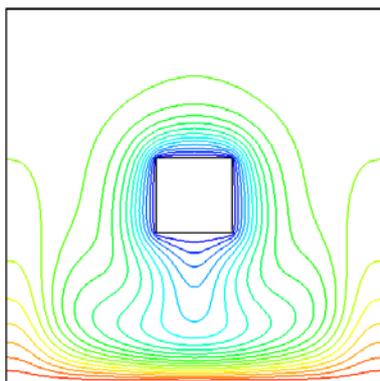
Pour $\varphi=0.02$



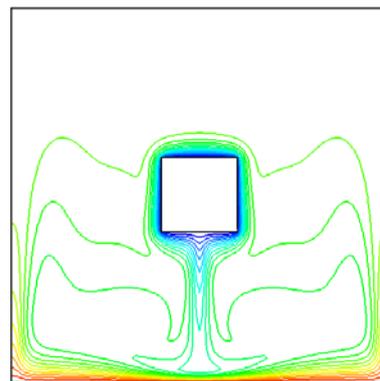
Pour $\varphi=0.04$



$Ra=10^3$

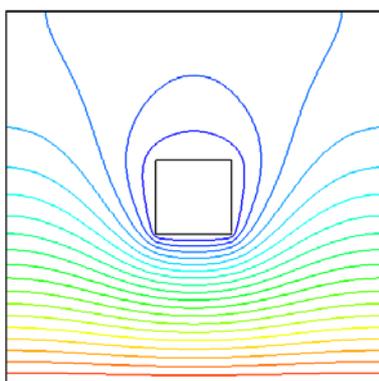


$Ra=10^5$

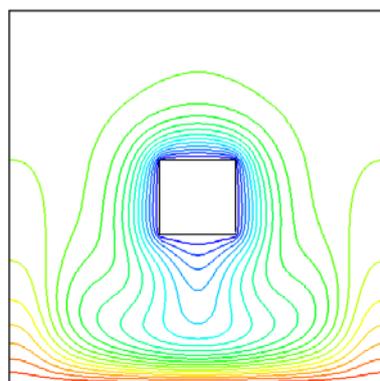


$Ra=10^7$

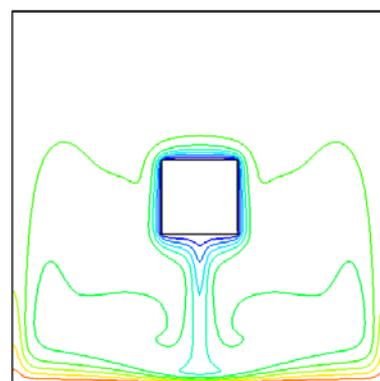
Pour $\varphi=0.06$



$Ra=10^3$

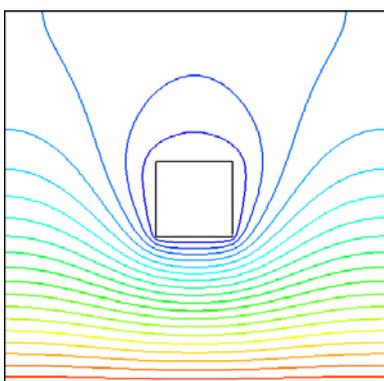


$Ra=10^5$

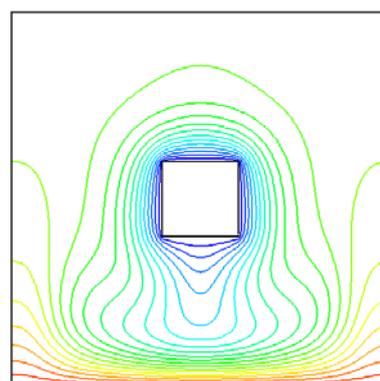


$Ra=10^7$

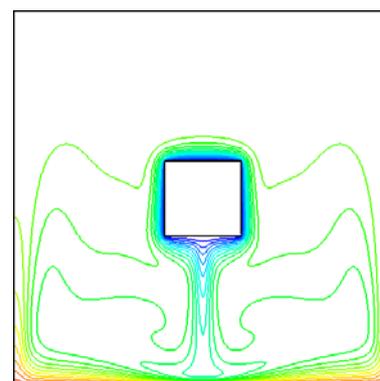
Pour $\varphi=0.08$



$Ra=10^3$



$Ra=10^5$



$Ra=10^7$

Pour $\phi=0.1$

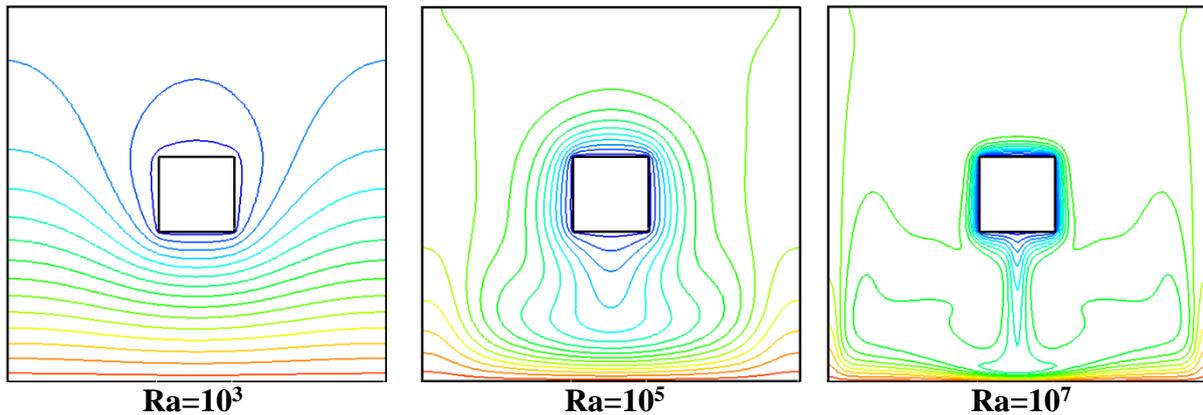


Figure III. 3 : les lignes isothermes pour différents fraction et différents nombres Rayleigh.

A $Ra\ 10^3$ d'après le résultat présenté par la **figure III.6** nous pouvons facilement constater que la situation thermique correspond à une conduction vue la stratification thermique présentée en bas de la cavité. En effet, la figure montre une disposition horizontale des couches thermiques le long de la paroi chaude. Evidement dans ce cas on parle d'un régime conductif dominant la cavité. En revanche, quand le gradient thermique augmente, les lignes isothermes sont largement affectées par le $Ra\ 10^5$. En fait, la figure montre qu'un panache thermique vient de se produire en bas du bloc froid et se dirige vers le bas. En effet, le long de la paroi chaude, une couche limite thermique vient de se développée. Effectivement, ce scénario, montre que le régime convectif vient de se développer au niveau de la cavité. A $Ra\ 10^7$, le régime convectif domine toute la cavité vue l'importance du gradient de température. Par conséquence et ont vu de la **figure III.8**, on remarque que la variation de la fraction des nanoparticules au sein de l'enceinte affecte légèrement le profil de température ce qui signifie la ressemblance des lignes isothermes.

III.4.2 le profil de vitesse et de température

La **Figure III.7** représente le profil de vitesse des différentes fractions des nanoparticules pour un $Ra=10^5$, en remarque que pour un axe de $x=0.5$ une répartition des vitesses symétriques indiquant l'existence de deux vortex, et l'existence des valeurs négatives nous permet de déduire une circulation contrarotative, et d'après la Figure III.7 les résultats montrent que l'augmentation de la concentration des nano particules diminue la vitesse et cela est dû à la viscosité et la superposition de la paroi chaude et le bloc froide qui influence sur l'effet de gravité.

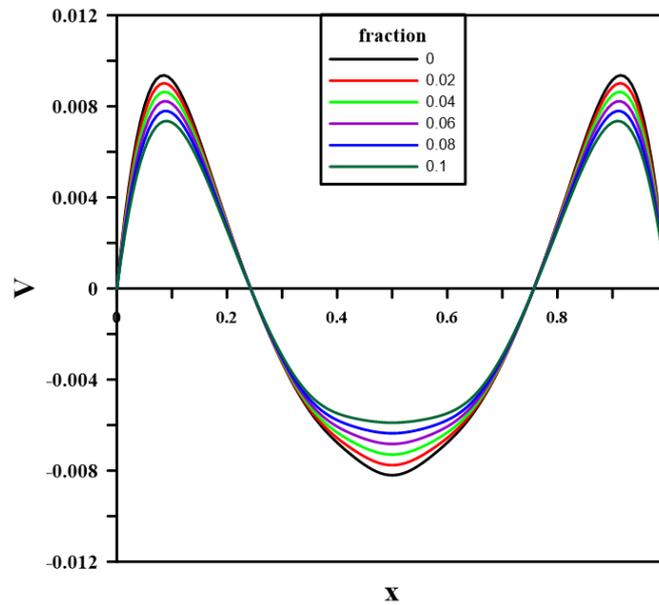


Figure III. 4 : les différents profils de vitesses pour différents fraction a $Ra=10^5$, $x=0.5$ et $y=0.25$.

Dans cette **Figure III.8** on présente le profil de température en bas de la cavité suivant l'axe y et au milieu suivant l'axe x , en variant les différentes fractions volumiques. Les valeurs maximales et minimales sont atteintes à chaque fois qu'on augmente la fraction, ceci dit la valeur maximal et atteint par la fraction $\phi=0.1$ au extrémité latéral. Et la valeur minimale et enregistré sous le bloc froid.

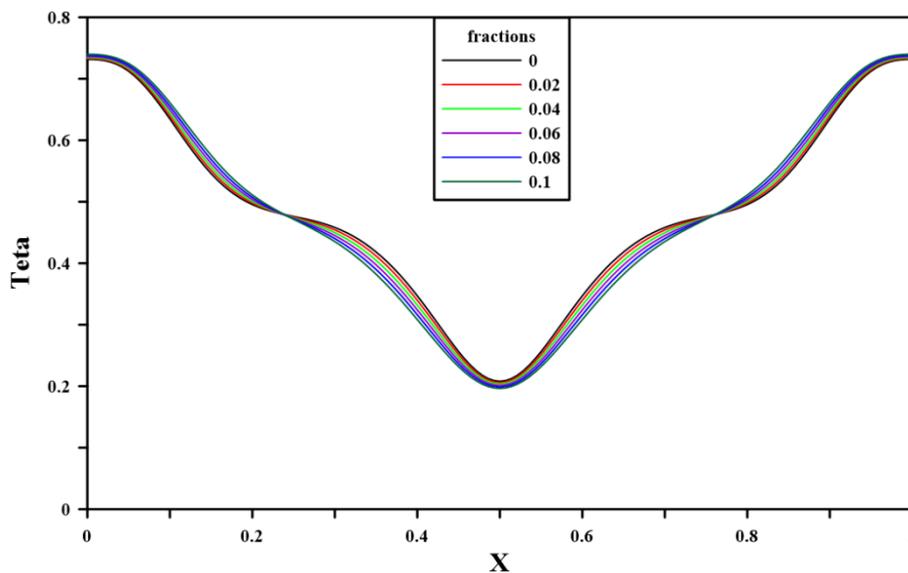


Figure III. 5 : les différents profils de températures pour un $Ra=10^5$, $x=0.5$ et $y=0.25$.

III.4.3. Le nombre Nusselt moyen

Tableau III. 3 : les nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Ra= 10^3 , 10^5 , 10^7 .

ϕ	1000	100000	10000000
0	1,898838	5,440492	15,56956
0,02	1,898765	5,326761	15,33915
0,04	1,898704	5,207282	15,09605
0,06	1,89865	5,082255	14,84076
0,08	1,898603	4,951709	14,57592
0,1	1,898563	4,815874	14,30322

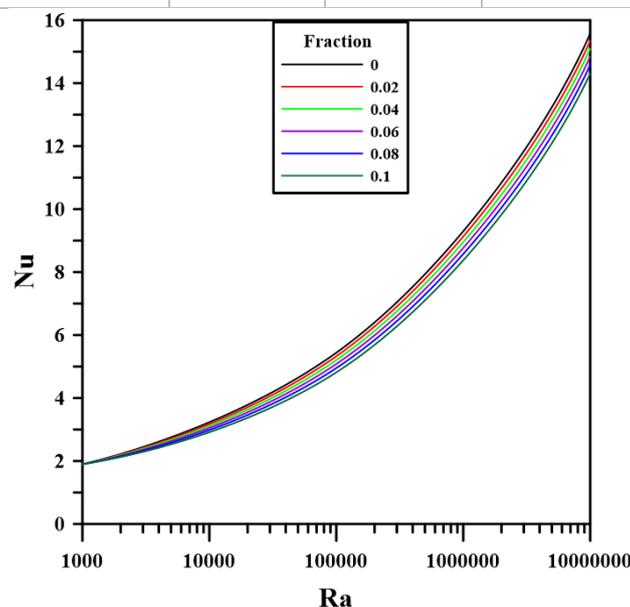


Figure III. 6 : le nombre de Nusselt moyen en fonction des différents nombre de Rayleigh pour chaque fraction de nanoparticule $\phi=[0 ; 0.1]$.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence de la concentration des nanoparticules dans un fluide de base et le nombre de Rayleigh numériquement, en utilisant le nano-fluide Al_2O_3 -eau pour un maillage valide de 140×140 et en arriver aux résultats suivant :

- Les nanoparticules suspendu dans l'eau augmentent la conductivité thermique du fluide et donc le transfert de chaleur.
- Les résultats nous montre que l'augmentation du nombre de Rayleigh diminue le nombre Nusselt du au contrainte de gravité et la superposition vertical des deux parois chaude et froide.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, on a présenté une étude numérique sur le transfert thermique par convection naturel en utilisant un nano-fluide de Al_2O_3 -eau avec un régime laminaire permanent dans une géométrie carrée avec la paroi inférieure chauffée, un bloc au centre froid et le reste de la cavité isolée. Les simulations numériques sont effectuées pour les nombres de Rayleigh ($Ra=10^3, 10^5, 10^7$), et différentes fractions des nanoparticules ($\phi=0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1$).

En se basant sur l'approximation Boussinesq, on a développé le modèle mathématique décrivant notre problème, tout en mettant en point un modèle numérique basé sur la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations gouvernantes, notre procédure de simulation a été validée en comparant nos résultats à ceux de **Hakan F. oztop et Eiyad Abu-Nada**.

Après la validation de notre maillage à 140×140 les résultats obtenus montre que :

- La différence de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et le nombre de Rayleigh.
- L'effet des nano-fluides sur la convection se manifeste pour les nombres de Rayleigh élevés.
- D'après la simulation le nombre de Nusselt diminue en augmentant la fraction volumique.
- Le profil de vitesse diminue en augmentant la fraction volumique et atteint des vitesses maximal pour le fluide de base.
- La température atteint des valeurs minimales au centre de la cavité, tout en croissant vers des valeur maximales en s'éloignant du centre pour des fractions plus élevés.
- La diminution du nombre de Nusselt devient de plus en plus important à chaque augmentation du nombre de Rayleigh.

On peut conclure que les conditions aux limites jouent un rôle considérable sur le mode de transfert, et les propriétés thermo physique du nano-fluide jouent aussi un rôle principal sur l'amplification du mode de transfert.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] H. RAZIK, “ÉTUDE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE DE L’AILETTE HUMIDE,” 2014.
- [2] S. U. S. Choi and J. A. Eastman, “ENHANCING THERMAL CONDUCTIVITY OF FLUIDS WITH NANOPARTICLES *,” 1995.
- [3] W. Yu, D. M. France, S. U. S. Choi, and J. L. Routbor, “Review and Assessment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications,” 2007.
- [4] E. Hafad Bara, S. El Hamdani, A. Bendou, and K. Limam, “Parametric study on natural convection of nanofluids in a heated chamber,” *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 424–429, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.232.
- [5] T. S. Krishnakumar, A. Sheeba, V. Mahesh, and M. Jose Prakash, “Heat transfer studies on ethylene glycol/water nanofluid containing TiO₂ nanoparticles,” *Int. J. Refrig.*, vol. 102, pp. 55–61, 2019, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.02.035.
- [6] A. S. Abedalh, Z. A. Shaalan, and H. N. Saleh Yassien, “Mixed convective of hybrid nanofluids flow in a backward-facing step,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 25, no. November 2020, p. 100868, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.100868.
- [7] A. R. Sajadi and M. H. Kazemi, “Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 10, pp. 1474–1478, 2011, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.007.
- [8] S. El Bécaye Maïga, S. J. Palm, C. T. Nguyen, G. Roy, and N. Galanis, “Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 26, no. 4 SPEC. ISS., pp. 530–546, 2005, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.02.004.
- [9] R. Dehnavi and A. Rezvani, “Numerical investigation of natural convection heat transfer of nanofluids in a Γ shaped cavity,” *Superlattices Microstruct.*, vol. 52, no. 2, pp. 312–325, 2012, doi: 10.1016/j.spmi.2012.05.006.

- [10] S. Mojumder, S. Saha, S. Saha, and M. A. H. Mamun, "Combined effect of Reynolds and Grashof numbers on mixed convection in a lid-driven T-shaped cavity filled with water-Al₂O₃ nanofluid," *J. Hydrodyn.*, vol. 27, no. 5, pp. 782–794, 2015, doi: 10.1016/S1001-6058(15)60540-6.
- [11] Y. Hu, Y. He, C. Qi, B. Jiang, and H. Inaki Schlager, "Experimental and numerical study of natural convection in a square enclosure filled with nanofluid," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 78, pp. 380–392, 2014, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.001.
- [12] M. N. Hasan, K. Samiuzzaman, S. H. Haque, S. Saha, and M. Q. Islam, "Mixed convection heat transfer inside a square cavity filled with Cu-water nanofluid," *Procedia Eng.*, vol. 105, no. Icte 2014, pp. 438–445, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.05.031.
- [13] H. F. Oztop and E. Abu-Nada, "Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 29, no. 5, pp. 1326–1336, 2008, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.04.009.
- [14] M. M. Billah, M. M. Rahman, and U. M. Sharif, "Heat transfer enhancement of nanofluids in a lid-driven triangular enclosure having a discrete heater," *Procedia Eng.*, vol. 56, pp. 330–336, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.127.
- [15] E. Abu-Nada and A. J. Chamkha, "Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures filled with a CuO-EG-Water nanofluid," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 49, no. 12, pp. 2339–2352, 2010, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2010.07.006.
- [16] Z. Haddad, E. Abu-Nada, H. F. Oztop, and A. Mataoui, "Natural convection in nanofluids: Are the thermophoresis and Brownian motion effects significant in nanofluid heat transfer enhancement?," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 57, pp. 152–162, 2012, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.01.016.
- [17] M. S. Sadeghi, A. S. Dogonchi, M. Ghodrat, A. J. Chamkha, H. Alhumade, and N. Karimi, "Natural convection of CuO-water nanofluid in a conventional oil/water separator cavity: Application to combined-cycle power plants," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 000, pp. 1–13, 2021, doi: 10.1016/j.jtice.2021.03.031.

- [18] A. Ouahouah, N. Labsi, X. Chesneau, and Y. K. Benkahla, "Natural convection within a non-uniformly heated cavity partly filled with a shear-thinning nanofluid and partly with air," *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 289, no. January, p. 104490, 2021, doi: 10.1016/j.jnnfm.2021.104490.
- [19] D. Dey and D. S. Sahu, "Experimental study in a natural convection cavity using nanofluids," *Mater. Today Proc.*, vol. 41, pp. 403–412, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.631.
- [20] D. Xu, Y. Hu, and D. Li, "A lattice Boltzmann investigation of two-phase natural convection of Cu-water nanofluid in a square cavity," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 13, no. September 2018, p. 100358, 2019, doi: 10.1016/j.csite.2018.11.009.
- [21] C. Abdellahoum, A. Mataoui, and H. F. Oztop, "Comparison of viscosity variation formulations for turbulent flow of Al₂O₃-water nanofluid over a heated cavity in a duct," *Adv. Powder Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 1210–1218, 2015, doi: 10.1016/j.appt.2015.06.002.
- [22] I. Pishkar and B. Ghasemi, "International Journal of Thermal Sciences Cooling enhancement of two fins in a horizontal channel by nano fluid mixed convection," vol. 59, pp. 141–151, 2012, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.04.015.
- [23] M. Shariat, A. Akbarinia, A. Hossein, A. Behzadmehr, and R. Laur, "Numerical study of two phase laminar mixed convection nano fluid in elliptic ducts," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 14–15, pp. 2348–2359, 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.03.035.
- [24] W. Jiang, K. Du, Y. Li, and L. Yang, "Experimental investigation on the influence of high temperature on viscosity , thermal conductivity and absorbance of ammonia – water nanofluids Étude expérimentale sur l ' influence de la température élevée sur la viscosité , la conductivité thermique et," *Int. J. Refrig.*, vol. 82, pp. 189–198, 2017, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.05.030.
- [25] M. ADNANI, B. MEZIANI, O. OURRAD, and M. ZITOUNE, "Natural Convection in a Square Cavity : Numerical Study for Different values of Natural Convection in a Square Cavity : Numerical Study for Different values of Prandtl Number," no. October, 2017, doi: 10.3970/fdmp.2016.012.001.

- [26] M. Sannad, A. Btissam, and B. Lahoucine, “Numerical Simulation of the Natural Convection with Presence of the Nanofluids in Cubical Cavity,” vol. 2020, 2020.
- [27] S.V.Patankar, Patankar Numerical Heat Transfert and Fluid Flow. 1980

Résumé:

Dans ce travail, nous présentons une étude numérique de la convection naturelle dans une cavité carrée remplis d'un nano-fluide en présence d'un bloc froid au centre de la cavité. Notre étude a été faite en fonction du nombre de Rayleigh et en fonction de la fraction volumique des nanoparticules. Les résultats indiquent que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du Ra. En revanche, avec l'augmentation de la fraction volumique le transfert de chaleur diminue et cela est dû à la superposition des deux parois chaude et froide et la force de gravité qui agit sur les nanoparticules.

Abstract :

In this work, we present a numerical study of natural convection in a square cavity filled with a nano-fluid in the presence of a cold block in the center of the cavity. Our study was done as a function of the Rayleigh number and as a function of the nanoparticle volume fraction. The results indicate that the heat transfer increases with the increase of the Ra. On the other hand, with the increase of the volume fraction the heat transfer decreases and this is due to the superposition of the two hot and cold walls and the gravity force acting on the nanoparticles.