

Université de Bouira
Akli Mohand Oulhadj



جامعة البويرة
أكلي محمد أولحاج

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master **Spécialité** : Génie mécanique
Option : Énergétique

THEME

Amélioration du Transfert de Chaleur dans les Nanofluides
(Al_2O_3 - eau) via l'Application d'un Champ Magnétique

Par :

ROUBACHE DJEDJIGA
BAHLOUL AMINE

Soutenu le / /2023 devant le jury composé

Pr. Mahfoud Brahim

Université de Bouira

Université de Bouira

Université de Bouira

Université de Bouira

Présédant

Promoteur

Examineur

Examineur



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد (ة)
 الحامل (ة)
 المسجل (ة)
 والمكلف (ة)
 عنوانها:
 تحت إشراف الأستاذ (ة):
 أصرح بشرفي اني ألتمز بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 05.02.2024

توقيع المعنى (ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:



%

30

النسبة:

الامضاء:



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد (ة) إبراهيم بن الصفة: طالب، استاذ، باحث طالب

الحامل (ة) لبطاقة التعريف الوطنية: والصادرة بتاريخ

المسجل (ة) بكلية / معهد العلوم والتكنولوجيا قسم هندسة ميكانيكية

والمكلف (ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Amélioration du transfert de chaleur dans les
Nano - fluides (AL 203 - eau) via l'application d'un champ magnétique.
MAHFOUD B.

تحت إشراف الأستاذ (ة):
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/09/06

Bey

توقيع المعني (ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

Turnitin

% 30

النسبة:

مساعد رئيس قسم الهندسة الميكانيكية
مكلف بما بعد التخرج والبحث العلمي بالجامعة
أ. موسى محمد

الامضاء:

Remerciement

Nous exprimons notre gratitude à ALLAH (SWT) pour le courage et la volonté qui ont rendu possible la réalisation de cette étude.

Nous souhaitons également exprimer nos sincères remerciements à nos parents bien-aimés pour leur soutien et leurs conseils tout au long de ces années d'études.

*En premier lieu, nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance envers notre promoteur, le **Dr. MAHFOUD Brahim**, pour son aide inestimable, sa disponibilité, sa bienveillance et ses conseils précieux tout au long de ce travail. Sans sa méthodologie, ses orientations et ses conseils avisés, cette étude n'aurait pas pu aboutir.*

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'évaluer notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Leur soutien et leur participation ont été précieux.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

Ames chers parents ma mère et mon père

*Pour leur patience, leur amour, leur
soutien leurEncouragement.*

Mes frères et mes sœurs.

Toute ma famille.

Toutes mes amies.

*N'oublions pas de mentionner tous les
enseignants, qu'ils travaillent aux
départements de génie mécanique.*

ROUBACHE DJEDJIGA

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

Ames chers parents ma mère et mon père

*Pour leur patience, leur amour, leur
soutien leurEncouragement.*

Mes frères et mes sœurs.

Toute ma famille.

Toutes mes amies.

*N'oublions pas de mentionner tous les
enseignants, qu'ils travaillent aux
départements de génie mécanique.*

BAHLOUL AMINE

ملخص

يتم محاكاة الحمل الحراري الطبيعي في وعاء مربع مملوء بسائل نانو-مائع (الماء النحاسي) ، تتناول هذه الدراسة تأثير الحقل المغناطيسي على نقل الحرارة داخل حاوية مملوءة بنانوسائل مكونة من ماء وألومينا (Al_2O_3) ، تخضع لحقل مغناطيسي شعاعي. تتميز الحاوية بوجود جدارين عموديين يتم الحفاظ على درجات حرارة ثابتة ، بينما تكون الجدارين الآخرين أفقيين عديمي الحرارة. من خلال محاكاة عددية، يتم استكشاف تأثير معاملات رئيسية مثل عدد راييلي ($Ra = 10^4$ و 10^5 و 10^6)، نسبة الحجم الصلب ($\phi = 0.03$ و 0.06)، وعدد هارتمان (Ha) على توزيعات التدفق ودرجات الحرارة، وكذلك كفاءة نقل الحرارة داخل الحاوية.

تظهر النتائج أن زيادة قيم عدد راييلي تؤدي إلى زيادة في معدلات نقل الحرارة، في حين ترتبط قيم عدد هارتمان المرتفعة بانخفاض في نقل الحرارة. تتفاوت تأثير زيادة نسبة الحجم الصلب بناءً على التركيبة المحددة لقيم هارتمان ورايلي، سواء بزيادة أو تقليل أداء نقل الحرارة.

Résumé

Cette étude examine l'impact d'un champ magnétique sur le transfert de chaleur au sein d'une enceinte remplie d'un nanofluide eau- Al_2O_3 , soumis à un champ magnétique radial. L'enceinte est délimitée par deux parois verticales maintenues à des températures Th et Tc , tandis que les deux autres parois sont adiabatiques horizontalement. À travers des simulations numériques, l'influence des paramètres clés tels que le nombre de Rayleigh ($Ra = 10^4$, 10^5 et 10^6), les fractions volumiques des solides ($\phi = 0,03$ et $0,06$) et le nombre de Hartmann (Ha) sur les distributions de flux et de température, ainsi que sur l'efficacité du transfert de chaleur de l'enceinte, est examinée.

Les résultats révèlent que des nombres de Rayleigh plus élevés entraînent une augmentation des taux de transfert de chaleur, tandis que des nombres de Hartmann élevés correspondent à une diminution du transfert de chaleur. L'effet de l'augmentation de la fraction volumique de solides varie en fonction de la combinaison spécifique des nombres de Hartmann et de Rayleigh, amplifiant ou entravant la performance du transfert de chaleur.

Abstract

This study investigates the impact of a magnetic field on heat transfer within an enclosure filled with a water- Al_2O_3 nanofluid, subjected to a radial magnetic field. The enclosure is defined by two vertical walls maintained at temperatures Th and Tc , while the other two walls are horizontally adiabatic. Through numerical simulations, the influence of key parameters including the Rayleigh number ($Ra = 10^4$, 10^5 , and 10^6), solid volume fraction ($\phi = 0.03$ and 0.06), and the Hartmann number (Ha) on both flow and temperature distributions, as well as the heat transfer efficacy of the enclosure, is investigated.

The outcomes reveal that higher Rayleigh numbers lead to an augmentation in heat transfer rates, whereas elevated Hartmann numbers correspond to a decrease in heat transfer. The effect of increased solid volume fraction varies based on the specific combination of Hartmann and Rayleigh numbers, either amplifying or impeding heat transfer performance.

Sommaire

ملخص.....	I
Résumé.....	I
Abstract	I
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux	V
Nomenclature	VI
Introduction générale.....	9
Chapitre I : Généralités et revue bibliographique	10
I.1 Revue bibliographique	10
I.2 Définition des nanofluides	2
I.3 Convection naturelle.....	2
I.4 La conductivité thermique	3
I.5 Conductivité électrique	3
I.6 Préparation de nano-fluide.....	3
I.7 Les avantages et les inconvénients du nano-fluide	4
I.8 Domaine d'applications des nano-fluides.....	5
Chapitre II : Géométries-modèles mathématiques	17
II.1 Introduction.....	17
II.2 Forme géométrique	17
II.3 Equations de transport	19
II.4 Les conditions initiales et aux limites à l'état.....	22
II.5 Conclusion	23
Chapitre III : Méthode Numérique	23
III .1 Introduction	23
III .2 Principe Fondamental de la Méthode des Volumes Finis	23
III.2 Mise en Œuvre de la Méthode des Volumes Finis	23

III.3 Avantages et Applications de la Méthode des Volumes Finis	24
III.5. Etapes de résolution par la méthode des volumes finis	25
III.6 Maillage.....	26
III.7. Paramètres numériques utilisés dans cette étude	28
Conclusion	29
Chapitre IV : Résultats et discussion.....	30
IV. Introduction	30
IV.2 Test d'indépendance de maillage	30
IV.3 Validation.....	30
IV.4 L'influence du nombre de Hartmann sur le transfert de chaleur	31
Conclusions générale.....	Erreur ! Signet non défini.

Liste des figures

Fig II.1 : schéma de principe du modèle physique.....	18
Fig II.2 Les conditions aux limites du problème adimensionnel.....	22
Fig III.1 : Maillage (100×100) nœuds.....	27
Fig.IV.1 : Validation des présents résultats (en bas) avec [2] (en haut) dans le $\phi = 0,03$ et $Ra=105$	31
Fig. IV.2 Validation des présents résultats (en bas) avec [2] (en haut) dans le cas $Ra=105$ et $\phi=0,03$	32
Fig. IV.3 Les lignes de courant pour trois valeurs du nombre de Rayleigh ($Ra = 104, 105, 106$) et $\phi = 0.03$	34
Fig. IV.4 Les isothermes pour trois valeurs du nombre de Rayleigh ($Ra = 104, 105, 106$) et $\phi = 0.03$	35
Fig. IV.5. La vitesse adimensionnelle en y (gauche) et la température adimensionnelle (droite) le long du milieu horizontal de l'enceinte pour trois valeurs et $\phi = 0.03$	36
Fig. IV.6 Nusselt local le long de la paroi chaude verticale de l'enceinte pour trois valeurs du nombre de Rayleigh lorsque $\phi = 0.03$	37
Fig. IV.7 La variation Nusselt moyenne avec le nombre de Hartmann pour $\phi = 0.03$	39
Fig. IV.8 La variation Nusselt moyenne avec Rayleigh pour $\phi = 0.03$	39
Fig. IV.9 Les lignes de courant (top) et isothermes (bottom) pour $Ra = 105$, l'eau pure (___) et le nanofluide avec $\phi = 0.06$ (___ _).....	41

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Propriétés thermo physiques de l'eau et de Alumine (Al_2O_3) [8].....	18
Tableau II.2. Properties de nanofluids de Sheikholeslami et al. [5].....	19
Tableau II.3 : Résumé des équations fondamentales adimensionnelles.....	20
Tableau II.4. Conditions aux limites.....	22
Tableau III-1 : schéma de discrétisations.....	28
Tableau III-2 : Sous relaxation.....	28
Tableau IV.1 Test d'indépendance de maillage dans le $\text{Ra}=10^5$	30
Tableau IV.2 Nusselt moyen pour différentes Ra and ϕ ($\text{Ha} = 30$)	41

Nomenclature

b : longueur de la source de chaleur [m].

B : longueur adimensionnelle de la source de chaleur (b/L).

d : la distance entre la source de chaleur et la paroi gauche [m].

D : la distance adimensionnelle entre la source de chaleur et la paroi gauche (d/L).

T_c : Température [K].

T_s : température de la source [K].

T_∞ : Température de l'entourage [K].

L : longueur de la cavité [m].

Pr : Nombre de Prandtl. $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$.

Nu : nombre de Nusselt. $Nu = \frac{h L}{k_f}$.

Ra : Nombre de Rayleigh. $Ra = \frac{g \beta L^3 (T_h - T_c)}{\nu \alpha}$.

Ha : [Nombre de Hartmann](#). $Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}$.

B : longueur de la source de chaleur [m].

g : Accélération de pesanteur [m. s⁻²].

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

p : pression [Nm⁻²].

\bar{p} : Pression modifiée [Nm⁻²].

t : Temps [s].

C_p : Chaleur spécifique à pression constante [J.kg⁻¹.K⁻¹].

V : volume [m³].

m : la masse [kg].

q'' : la quantité de chaleur de la source par unité de surface [W/m^2].

S_Φ : Terme source.

K : la conductivité thermique [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

u, v : les composants de vitesse dans la direction des x, y [ms^{-1}].

U, V : les composants adimensionnelle de vitesse ($uL/\alpha_f, vL/\alpha_f$).

x, y : Coordonnée cartésienne [m].

X, Y : coordonnées adimensionnelle ($x/L; y/L$).

Δx : variation de x . [m].

Δy : variation de y [m].

Symboles grecs :

α : Diffusivité thermique [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

β : Coefficient d'expansion thermique à pression constante [K^{-1}].

μ : Viscosité dynamique [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$].

ν : Viscosité cinématique [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

ρ : Masse volumique [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

ψ : Fonction de courant adimensionnelle.

ΔT : la différence de température.

θ : Température adimensionnelle.

Ω : vorticité adimensionnelle.

σ :

ϕ : fraction volumique.

Φ : variable dépendante.

Les indices :

nf : nano-fluide.

p : particule.

f : fluide de base.

c : chaude.

Max: maximale.

Rouge : nano-fluide.

Vert : eau.

Orange : chaude.

Bleu : Froid.

i : suivant la direction x.

j : suivant la direction y.

n : indice d'itérations.

* : valeur estimée.

' : Indice de la correction ou les fluctuations.

Introduction générale

Lorsque le fluide est électriquement conducteur et exposé à un champ magnétique, la force de Lorentz est également activée et interagit avec la force de flottabilité pour que les champs de flux et de température soient régis. L'emploi d'un champ magnétique externe est de plus en plus utilisé dans l'industrie de la nanotechnologie en tant que mécanisme de contrôle, car les courants de convection sont supprimés par la force de Lorentz, réduisant ainsi les vitesses. L'étude et la compréhension approfondie du transfert de quantité de mouvement et de chaleur dans un tel processus sont d'une importance cruciale pour améliorer le contrôle et la qualité des produits manufacturés.

En effet, les objectifs de ce travail sont d'étudier la convection magnétohydrodynamique dans une enceinte carrée contenant un nanofluide (eau- Al_2O_3) et soumise à un champ magnétique. Des modèles mathématiques régissant ces phénomènes ont été développés. De plus, des simulations numériques ont été effectuées. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel Fluent (version étudiant).

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation d'une revue bibliographique ainsi qu'à la théorie des principaux travaux publiés dans le domaine du transfert thermique dans des cavités.
- Le deuxième chapitre est dédié à la proposition du modèle mathématique, des conditions initiales et des limites, en situation bidimensionnelle (x-y).
- Le troisième chapitre se penche sur la description de la méthode des volumes finis, ainsi que sur la discrétisation numérique de l'équation générale de transport, et une présentation du code de calcul - FLUENT.
- Le quatrième chapitre comprend la validation de notre programme de calcul ainsi que les principaux résultats numériques de cette étude. De plus, les commentaires, interprétations et analyses des divers résultats de cette étude paramétrique sont également exposés.
- Enfin, une conclusion générale, résumant les principaux résultats obtenus, est donnée à la fin de ce mémoire.

Chapitre I :

Généralités et

revue

bibliographique

Chapitre I : Généralités et revue bibliographique

Dans le premier chapitre, nous introduisons tout d'abord une vue d'ensemble et une rétrospective sur le phénomène de convection naturelle qui se produit dans une enceinte close contenant un nanofluide et exposée à l'influence d'un champ magnétique. Ce chapitre s'attache également à clarifier certaines définitions essentielles, tout en offrant des éclaircissements plus généraux sur les nanofluides en tant que catégorie de fluides particulièrement intéressante.

Au cours de cette exploration initiale, nous aborderons les aspects historiques de la convection naturelle dans de telles enceintes, mettant en lumière les progrès et les découvertes qui ont contribué à notre compréhension actuelle de ce phénomène complexe. Par la suite, nous proposerons des définitions claires et approfondies liées aux concepts et aux termes clés qui sous-tendent notre étude, tout en jetant un regard plus large sur la nature des nanofluides, en examinant leurs caractéristiques et leur pertinence dans le contexte de notre recherche.

I.1 Revue bibliographique

Ces dernières années, les techniques de refroidissement ont connu des développements et un intérêt considérable, tant dans la recherche que dans l'industrie. En conséquence, les systèmes de refroidissement font partie intégrante des processus industriels ou des dispositifs. Les nanofluides peuvent améliorer la conductivité thermique en ajoutant des nanoparticules au fluide de base, où les propriétés thermiques peuvent considérablement changer. Le refroidissement par nanofluides peut être une solution essentielle dans la technologie contenant des composants en rotation. L'examen de Godson et al. [1] offre un aperçu clair des avancées de la recherche réalisées dans le comportement du transfert de chaleur convectif des nanofluides. De nombreux chercheurs ont simulé les effets du diamètre des nanoparticules et de la concentration sur la convection naturelle des nanofluides [2-3]. L'examen de la littérature montre que les écoulements tourbillonnants avec les nanofluides n'ont pas encore été détaillés, à l'exception de quelques travaux récents. Parmi cette série de travaux, la recherche de Bachok et al. [4], qui a présenté l'écoulement de nanofluides rotatifs stationnaires autour d'un disque en rotation. Le modèle de pompage d'écoulement de Von Karman analysé par Turkyilmazoglu [5] montre que l'ajout de nanoparticules dans l'écoulement tourbillonnaire améliore considérablement les caractéristiques de transfert de chaleur. Il convient de mentionner que les nanoparticules de Cu dans un fluide de base ont un taux de transfert de chaleur important. Talat et Mustafa [6] ont analysé l'écoulement de nanofluides instationnaires initié sur un disque en rotation décélérant par une approche de similitude. Ils ont découvert que la vitesse angulaire

Dépendante du temps dans l'écoulement de nanofluides affecte positivement le taux de transfert de chaleur. Sheikholeslami [7] a utilisé la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre pour analyser numériquement le transfert de chaleur dans l'écoulement de nanofluides en rotation. Ils ont constaté qu'une augmentation à la fois des paramètres de thermophorèse et de Brownian diminue l'épaisseur de la couche limite. L'étude du comportement des nanofluides dans les milieux en rotation sous l'effet d'un champ magnétique est devenue récemment un objectif attractif pour les chercheurs, dans lequel des méthodes numériques et analytiques combinent les nanofluides et les champs magnétiques. Il est important de noter que le réviseur [8-9] a suffisamment résumé les publications récentes associant les nanofluides et les champs magnétiques. La majorité des résultats obtenus ont prouvé que la concentration de particules solides et la flottabilité augmentent le gradient de température, mais au contraire, l'augmentation du champ magnétique le diminue.

Il est connu que la stabilisation électromagnétique est favorisée en imposant un champ magnétique à l'écoulement tourbillonnaire dans la direction préférée pour les cylindres de petite et moyenne taille [10-11]. Le courant électrique induit est dû au mouvement du fluide électroconducteur à travers le champ magnétique (interaction du tourbillon convectif avec le magnétique). Les forces apparaissent en raison du champ magnétique qui modifie l'écoulement du fluide. Un équilibre entre les forces centrifuges et visqueuses se développe dans la couche limite d'Ekman à proximité du couvercle en rotation. Cette dernière est remplacée par la couche de Hartmann sous l'effet du champ magnétique appliqué [12-13]. Notez que la couche de Hartmann disparaît lorsque le couvercle en rotation est électroconducteur, et ensuite, le fluide tourne par la force d'inertie du disque inférieur en rotation [14]. Les recherches antérieures affirment le passage de l'instabilité oscillatoire à la bifurcation stable [15-16] par l'application du champ magnétique.

Notre examen dans ce cas se limite uniquement convection naturelle contenant des nanofluides soumis à l'effet du champ magnétique. L'action MHD externe au-delà d'un cylindre étiré a été décrite par Ashorynejad et al. [17]. Leurs résultats ont confirmé qu'à faible champ magnétique, le cuivre marque une performance thermique maximale. Sheikholeslami et al. [18] ont analysé l'écoulement de nanofluides MHD dans un système en rotation où le type de nanofluide présente un facteur clé pour l'amélioration du transfert de chaleur. Sheikholeslami [19] a signalé les influences de la longueur, de la fraction volumique (ϕ) et du nombre de Hartmann (Ha) pour les nanofluides dans une enceinte de convection naturelle poreuse. Leurs résultats indiquent que le gradient de température diminue avec l'augmentation de la force de Lorentz. Mustafa et al. [20] ont exploré l'écoulement tridimensionnel en rotation MHD. Il a montré que le nombre de Nusselt local dans

un ferrofluide est supérieur à celui de l'eau pure. Récemment, la fusion de nanofluides entre deux rouleaux circulaires du milieu a été étudiée en termes de transfert de chaleur par Sheikholeslami et Ganji [21]. Leurs résultats ont montré que le gradient de température augmente avec l'augmentation du champ magnétique, mais que l'augmentation du paramètre de fusion le diminue. L'effet d'un champ magnétique sur la convection naturelle d'un nanofluide n'a été examiné que pour des plaques plates verticales [22], et selon les meilleures connaissances des auteurs, aucune étude examinant les effets du champ magnétique sur la convection naturelle dans des enceintes remplies de nanofluides avec des parois électriquement conductives n'a été rapportée dans la littérature. Ainsi, la présente étude examine numériquement la convection naturelle dans une enceinte carrée avec des parois électriquement conductives remplies d'un nanofluide eau- Al_2O_3 et soumise à l'influence d'un champ magnétique appliqué horizontalement.

I.2 Définition des nanofluides

Les nanofluides sont des suspensions colloïdales constituées de nanoparticules dispersées dans un fluide de base. Ces nanoparticules, généralement de l'ordre de quelques nanomètres à quelques dizaines de nanomètres. Ils sont désignés sous le nom de particules ultrafines (PUF), sont des éléments dont les dimensions oscillent entre 1 et 100 nanomètres ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000000001 \text{ m}$). Ils sont fabriqués à partir de matériaux tels que des métaux, des oxydes ou des carbonates. Les nanofluides présentent des propriétés thermophysiques améliorées par rapport aux fluides de base, notamment une conductivité thermique accrue et une capacité de transfert de chaleur plus élevée. Ces propriétés uniques font des nanofluides des candidats prometteurs pour diverses applications, allant du refroidissement des systèmes électroniques à l'optimisation des échanges thermiques dans les dispositifs industriels. La manipulation des propriétés des nanofluides en ajustant la composition, la concentration et la taille des nanoparticules ouvre de nouvelles perspectives pour l'ingénierie thermique et la conception de dispositifs plus performants.

I.3 Convection naturelle

La convection naturelle représente un phénomène inhérent à la dynamique des fluides, survenant lorsque des régions connaissent des variations de température et se mettent à se déplacer verticalement sous l'impulsion de la poussée d'Archimède. L'ajustement thermique d'un fluide agit sur sa densité, laquelle devient différente de celle du fluide environnant. Ces déplacements sont communément appelés des mouvements convectifs, et ils engendrent divers phénomènes, tels que les courants marins en océanographie, les orages en météorologie, ainsi que les élévations de magma en géologie, pour ne citer que quelques exemples.

I.4 La conductivité thermique

La conductivité thermique est une propriété physique qui mesure la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Elle représente la quantité de chaleur qui se propage à travers une unité de matériau d'une épaisseur donnée lorsque les extrémités de ce matériau sont maintenues à une différence de température constante. La conductivité thermique est généralement exprimée en watts par mètre-kelvin ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) et indique la vitesse à laquelle la chaleur se déplace à travers un matériau.

La conductivité thermique varie considérablement en fonction du type de fluide. Voici quelques exemples de conductivités thermiques pour différents fluides à température ambiante

1. Eau (liquide) : Environ $0,606 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
2. Air (gaz sec) : Environ $0,0257 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
3. Huile moteur (minérale) : Environ $0,135 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
4. Aluminium (solide) : Environ $237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
5. Cuivre (solide) : Environ $398 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
6. Argon (gaz) : Environ $0,0163 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
7. Verre (solide) : Environ $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
8. Silicone (polymère) : Environ $0,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

Ces valeurs sont approximatives et peuvent varier en fonction de la température et de la composition spécifique du fluide.

I.5 Conductivité électrique

La conductivité électrique, également appelée conductivité électrique ou conductance électrique, mesure la capacité d'un matériau à permettre le passage du courant électrique. Elle indique la facilité avec laquelle les charges électriques (habituellement des électrons) se déplacent à travers un matériau lorsqu'une différence de potentiel électrique est appliquée entre ses extrémités. La conductivité électrique est exprimée en siemens par mètre (S/m) et est inversement proportionnelle à la résistance électrique d'un matériau. Les matériaux conducteurs tels que les métaux ont une conductivité électrique élevée, tandis que les isolants ont une conductivité électrique faible.

I.6 Préparation de nano-fluide

Il existe deux méthodes principales pour la production de nanofluides :

1. **Méthode en une étape** : Cette méthode implique la vaporisation d'un matériau solide dans un environnement sous vide, puis la condensation directe de sa vapeur dans le liquide. En d'autres termes, le matériau solide est transformé en vapeur, puis cette

vapeur est condensée dans le liquide pour former des nanoparticules dispersées. Cette méthode permet une production directe de nanofluides, mais elle peut présenter des défis en termes de contrôle de la taille et de la distribution des particules.

2. **Méthode en deux étapes :** Cette méthode implique d'abord la fabrication d'une poudre nanostructurée sèche, puis cette poudre est mélangée et dispersée dans le liquide. Dans cette approche, les nanoparticules sont d'abord produites sous forme solide, puis elles sont incorporées dans le liquide pour former le nanofluide. Cela permet un meilleur contrôle de la taille des particules, mais cela implique un processus en deux étapes.

Les procédés de fabrication peuvent être de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de recherches continues pour optimiser le coût de production, qui peut parfois être élevé en raison des défis liés à la mise en œuvre et à l'obtention de la taille de particules souhaitée. Chaque méthode présente des inconvénients et certaines peuvent ne pas être adaptées à la production de masse de grandes quantités de nanoparticules, en raison des contraintes spécifiques aux procédés, en particulier pour les méthodes en une étape.

I.7 Les avantages, inconvénients et risques des nano-fluides

- **Les avantages**

- ✓ L'utilisation des nanofluides comme liquides caloporteurs présente un avantage qui repose sur un équilibre subtil entre l'augmentation de la conductivité thermique.
- ✓ Une superficie considérable pour les échanges thermiques entre les particules et les fluides.
- ✓ Moins de risque de colmatage par rapport aux boues conventionnelles, facilitant ainsi la réduction de la taille du système.
- ✓ Les caractéristiques personnalisables incluent la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en ajustant les concentrations de particules selon les besoins spécifiques des différentes applications.
- ✓ Les études futures devront donc se focaliser sur le choix de matériaux ainsi que la forme et la taille des nanoparticules, afin de maximiser la conductivité thermique tout en limitant modérément l'augmentation de la viscosité.

- **Les Limitations des Nanofluides**

- ✓ Les coûts associés aux nanofluides sont généralement élevés.
- ✓ Les mécanismes responsables des changements de propriétés des nanofluides ne sont pas encore pleinement compris d'un point de vue théorique.
- ✓ Le processus de production de nanofluides peut rencontrer des difficultés techniques.

- ✓ La caractérisation précise des suspensions de nanofluides peut s'avérer difficile.
- ✓ Maintenir la dispersion stable des nanoparticules dans le fluide peut représenter un défi.
- ✓ L'utilisation de nanofluides peut entraîner une augmentation de la chute de pression et de la puissance de pompage.
- ✓ En raison de l'incorporation de nanoparticules, les nanofluides peuvent avoir une viscosité accrue et une capacité thermique spécifique réduite.
- **Risques**
 - ✓ Toxicité des nanoparticules : Certaines nanoparticules utilisées dans les nanofluides peuvent être toxiques pour la santé humaine et l'environnement. Il est essentiel de prendre des précautions appropriées lors de la manipulation et de l'élimination des nanofluides pour minimiser les risques d'exposition.
 - ✓ Impact environnemental : Les nanoparticules peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement, en particulier si elles sont rejetées dans les écosystèmes aquatiques ou terrestres. Des études approfondies sont nécessaires pour évaluer l'impact environnemental des nanofluides.
 - ✓ Interaction avec les matériaux : les nanofluides peuvent interagir avec les matériaux des systèmes dans lesquels ils sont utilisés, ce qui peut entraîner une corrosion.

I.8 Domaine d'applications des nano-fluides

Le mélange Les nanofluides ont un large éventail d'applications dans différents domaines en raison de leurs propriétés améliorées de transfert de chaleur et de conductivité thermique. Voici quelques domaines d'applications des nanofluides :

1. **Refroidissement électronique** : Les nanofluides peuvent être utilisés pour améliorer le refroidissement des composants électroniques, tels que les puces et les processeurs, en dissipant la chaleur générée de manière plus efficace.
2. **Industrie automobile** : Les nanofluides peuvent être utilisés comme liquides de refroidissement dans les systèmes de refroidissement des moteurs automobiles, ce qui peut améliorer l'efficacité thermique et contribuer à une meilleure gestion de la température.
3. **Énergies renouvelables** : Les nanofluides peuvent être employés dans les systèmes solaires thermiques pour accroître l'efficacité de la collecte et du stockage de chaleur, ainsi que dans les échangeurs de chaleur des centrales géothermiques.

4. **Refroidissement industriel** : Les nanofluides peuvent être employés pour le refroidissement dans les installations industrielles et les processus de fabrication, améliorant ainsi l'efficacité des échanges thermiques.
5. **Stockage thermique** : Les nanofluides peuvent être utilisés dans les systèmes de stockage thermique pour améliorer la capacité de stockage et l'efficacité des systèmes de chauffage et de climatisation.
6. **Applications spatiales** : Les nanofluides peuvent être utilisés pour le refroidissement des équipements spatiaux, où la gestion de la chaleur est cruciale en raison des conditions extrêmes de l'espace.
7. **Domaine pétrolier et gazier** : Les nanofluides peuvent être appliqués pour améliorer les transferts thermiques dans les équipements utilisés dans l'exploration et la production d'hydrocarbures.

I.9 Les nombres Adimensionnels

1. Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt est une grandeur adimensionnelle utilisée en thermique pour caractériser le transfert de chaleur. Il est caractérisé comme étant le ratio entre le transfert de chaleur convectif et le transfert de chaleur conductif à travers une couche limite fluide.

$$Nu = \frac{hl}{\lambda}$$

h : coefficient de convection.

l : longueur caractéristique .

λ : conductivité thermique du fluide.

2. Le nombre de Raleigh

Le nombre de Rayleigh (Ra) est une grandeur adimensionnelle qui intervient dans les phénomènes de convection thermique, particulièrement dans les fluides. Il caractérise le rapport entre les effets de la convection naturelle (due aux différences de densité thermique) et la conduction thermique dans un fluide.

La formule générale du nombre de Rayleigh elle peut être exprimée comme suit :

$$Ra = \frac{g \beta L^3 \Delta T}{\alpha \nu}$$

Où :

g : l'accélération due à la gravité.

β : la dilatation volumique.

ΔT : la différence de température entre les parois.

L : la hauteur de la couche de fluide.

ν : la viscosité cinématique.

α : la diffusivité thermique.

3. Nombre de Hartmann

Le nombre de Hartmann est souvent utilisé pour caractériser l'importance des forces magnétiques par rapport aux forces visqueuses dans un fluide électriquement conducteur soumis à un champ magnétique. Il est particulièrement pertinent dans les applications liées à la magnétohydrodynamique.

Le nombre de Hartmann est noté Ha et est défini comme :

$$Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}$$

Où :

B_0 : l'induction magnétique.

L : une longueur caractéristique.

σ : la conductivité électrique du fluide.

ρ : la densité du fluide.

ν : la viscosité cinématique.

Chapitre II :

Géométries-

modèles

mathématiques

Chapitre II : Géométries-modèles mathématiques

II.1 Introduction

L'étude d'un phénomène physique nécessite la formalisation de ses lois sous forme d'équations mathématiques, établissant des relations entre les diverses variables impliquées dans ce phénomène. Ces équations fondamentales se présentent généralement sous différentes formes.

Tout d'abord, nous avons l'équation de continuité, qui traduit le principe fondamental de la conservation de la masse. Cette équation reflète la manière dont la masse totale dans le système reste constante au fil du temps, même si elle peut être redistribuée ou transformée.

Ensuite, les équations de Navier-Stokes entrent en jeu. Elles incarnent le principe essentiel de conservation de la quantité de mouvement, et ces équations sont cruciales pour comprendre comment les fluides se déplacent et réagissent aux forces extérieures. Elles décrivent la dynamique des fluides en fonction des pressions, des viscosités et des forces qui s'exercent sur eux.

Enfin, l'équation de l'énergie joue un rôle central. Elle exprime le principe fondamental de la conservation de l'énergie dans le système étudié. Cette équation décrit comment l'énergie est transférée, stockée et dissipée au sein du phénomène physique, et elle est essentielle pour comprendre les variations de température et les flux de chaleur.

En parallèle à l'énoncé de ces équations, la description complète d'un problème donné suppose également la spécification de conditions aux frontières. Ces conditions définissent les comportements ou les valeurs des variables à la périphérie du domaine d'étude. En outre, en cas de stabilité du processus, des conditions initiales doivent être définies pour déterminer l'état du système à un moment initial donné.

En somme, la formalisation mathématique des lois physiques, accompagnée de conditions aux frontières et de conditions initiales le cas échéant, constitue un cadre fondamental pour l'analyse et la résolution de problèmes physiques complexes.

II.2 Forme géométrique

On se propose, Fig. (II.1) montre un schéma de principe de l'enceinte remplie d'un nanofluide eau- Al_2O_3 . L'enceinte est délimitée par deux isothermes parois verticales aux

températures T_h et T_c et par deux parois horizontales murs adiabatiques. On suppose que les nanoparticules d' Al_2O_3 et l'eau sont en équilibre thermique et que le nanofluide est newtonien et incompressible. L'écoulement est réputé stable., bidimensionnel et laminaire, et les effets du rayonnement sont négligeables. Les courants de déplacement, champ magnétique induit, dissipation et le chauffage Joule sont également négligés. Les propriétés thermo-physiques du fluide de base et des nanoparticules sont données dans le tableau II .1.

Tableau II.1 : Propriétés thermo physiques de l'eau et d'Alumine (Al_2O_3) [23].

	$C_p(J.kg^{-1}.k^{-1})$	$K(W.m^{-1}.k^{-1})$	$\rho(kg.m^{-3})$	$\beta(k^{-1})$	$\sigma(\Omega.m)^{-1}$
Alumine (Al_2O_3)	765	40	3970	0.85×10^{-5}	10^{-10}
H_2O (l'eau pure)	4179	0.613	997.1	21×10^{-5}	0.05

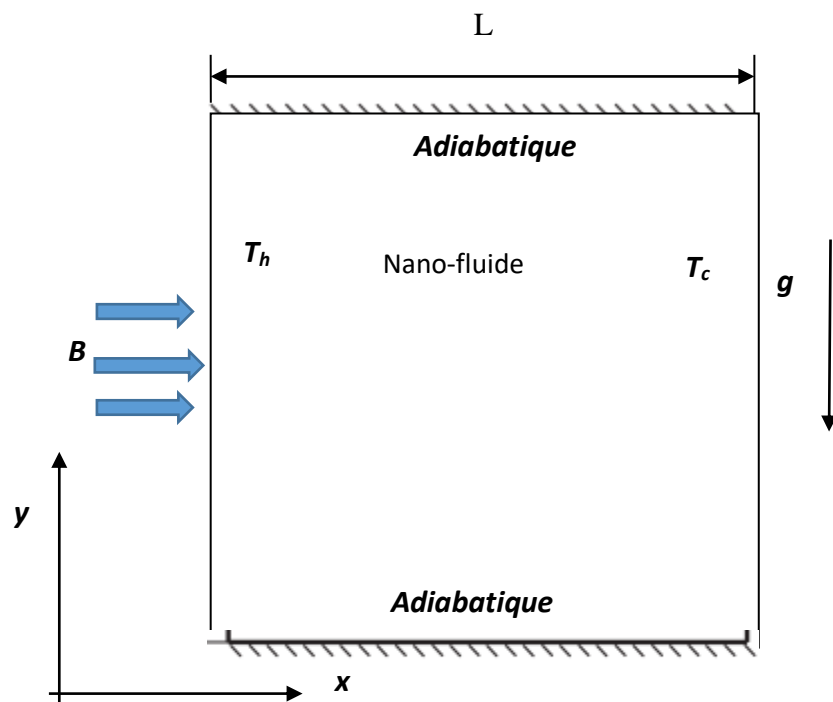


Figure II.1 : schéma de principe du modèle physique.

Tableau II.2. Prospérités de nanofluids de Sheikholeslami et al. [24]

Thermophysical property	Relation
Density	$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p$
Dynamic viscosity	$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}}$
Heat capacity	$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p$
Expansion coefficient	$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p$
Diffusivity	$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho C_p)_{nf}$
Conductivity	$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_f + 2k_p) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right]$
Electrical conductivity	$\sigma_{nf} = \sigma_f \left[1 + \frac{3(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 1)\phi}{(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} + 2) + \phi(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 1)} \right]$

Dans les équations fournies précédemment, ϕ représente la fraction volumique du matériau solide, σ correspond à la conductivité électrique, ρ désigne la densité, α représente la diffusivité thermique, C_p symbolise la chaleur spécifique, et β représente le coefficient d'expansion thermique du nanofluide. 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 :

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

Avec :

T_0 température de référence, β est le coefficient d'expansion thermique à pression constante, ρ_0 est la masse volumique du fluide à T_0 .

II.3 Equations de transport

- **Equation générale de Navier Stokes**

Voici donc l'équation de Navier-Stokes, et en quoi elle est l'analogue de « *Somme des forces = m a* » pour un fluide :

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \right) + \left(\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right) = -\vec{\nabla}(p) + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{V} + \vec{F} \quad (\text{II.2})$$

$$\blacksquare \text{ Equation de conservation de masse } \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) \right) = 0. \quad (\text{II.3})$$

$$\blacksquare \text{ Équation de quantité de mouvement : } \left(\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = -\vec{\nabla}(p) + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{V} + \vec{F} \quad (\text{II.4})$$

On applique les hypothèses de simplification, les équations gouvernantes peuvent être écrites sous forme adimensionnelle comme suit :

• **Equation de Continuité :**

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (\text{II.5})$$

• **Équation de quantité de mouvement :**

Axial:

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

Vertical:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial P}{\partial X} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + (\rho \beta)_{nf} g (T - T_c) \right] + \sigma_{nf} B_0^2 V \quad (\text{II.7})$$

• **Équation de l'énergie :**

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

• **Fonction de courant :**

$$V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}, \quad U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \quad (\text{II.9})$$

En utilisant les variables adimensionnelles suivantes :

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{uL}{\alpha_f}, \quad V = \frac{vL}{\alpha_f}, \quad P = \frac{\bar{p}L^2}{\rho_{nf}\alpha_f^2} \\ Pr &= \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Ra = \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\alpha_f \nu_f}, \quad \Theta = \frac{T-T_c}{\Delta T}, \quad \Delta T = \frac{q''L}{k_f} \\ Ha &= B_0 L \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\rho_{nf}\nu_{nf}}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.10})$$

Les équations (II.2-6) peut se convertir à la forme adimensionnelle présenter par l'Eq (II.7)

$$\frac{\partial(U_\varphi)}{\partial X} + \frac{\partial(V_\varphi)}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial(\varphi)}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial(\varphi)}{\partial Y} \right) + S_\varphi \quad (\text{II.11})$$

Où φ représente les paramètres adimensionnels dépendants U, V, Θ et Γ_φ , S_φ sont les termes de diffusion et de source correspondants, respectivement, comme résumé dans Tableau (II.3).

Tableau II.3 : Résumé des équations fondamentales adimensionnelles

Equation	φ	Γ_φ	S_φ
Continuité	1	0	
X-Mouvement	U	$\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_{nf}}$	$-\frac{\partial P}{\partial X}$
Y-Mouvement	V	$\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_{nf}}$	$-\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} RaPr \Theta - Ha^2 Pr V$

Les nombres de Nusselt locaux et moyens définissent le transfert de chaleur et le mode de convection sont exprimés comme suit :

$$Nu(Y) = -\frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial X} \right) \Big|_{X=0} \quad \text{and} \quad Numoy = \int_0^1 Nu(Y) dY, \quad (II.12)$$

L'influence du champ magnétique appliqué sur le tourbillonnement de l'écoulement du nanofluide entraîne une densité de courant électrique J, conforme à la loi d'Ohm telle que décrite par [25].

$$\mathbf{J} = \sigma_{nf} (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (II.13)$$

où V est le vecteur de vitesse (u, w, v), E est le champ électrique et le champ magnétique appliqué est B(0, 0, B₀).

La loi de Faraday pour le champ magnétique donne

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad (II.14)$$

ce qui signifie que le potentiel électrique est

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi. \quad (II.15)$$

La conservation du courant électrique conduit à :

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (II.16)$$

Autrement dit, le courant électrique résulte d'un potentiel électrique Φ . En remplaçant les équations (7) et (8) dans l'équation (6), nous obtenons :

$$\nabla \cdot (-\nabla \varphi + \mathbf{V} \wedge \mathbf{B}) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta \Phi = \nabla (\mathbf{V} \wedge \mathbf{B}) \quad (II.17)$$

En conséquence, l'équation de Laplace pour le potentiel électrique devient :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{w}{r} + \frac{\partial w}{\partial r} \quad (\text{II.18})$$

Lorsque l'on suppose l'existence d'un champ magnétique constant et uniforme dirigé verticalement à travers le cylindre, cela suggère que la force de Lorentz dépend uniquement des variables (r) et (θ).

Ils peuvent être trouvés par : $\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$, les forces de Lorentz adimensionnelles dans les directions x , y sont respectivement

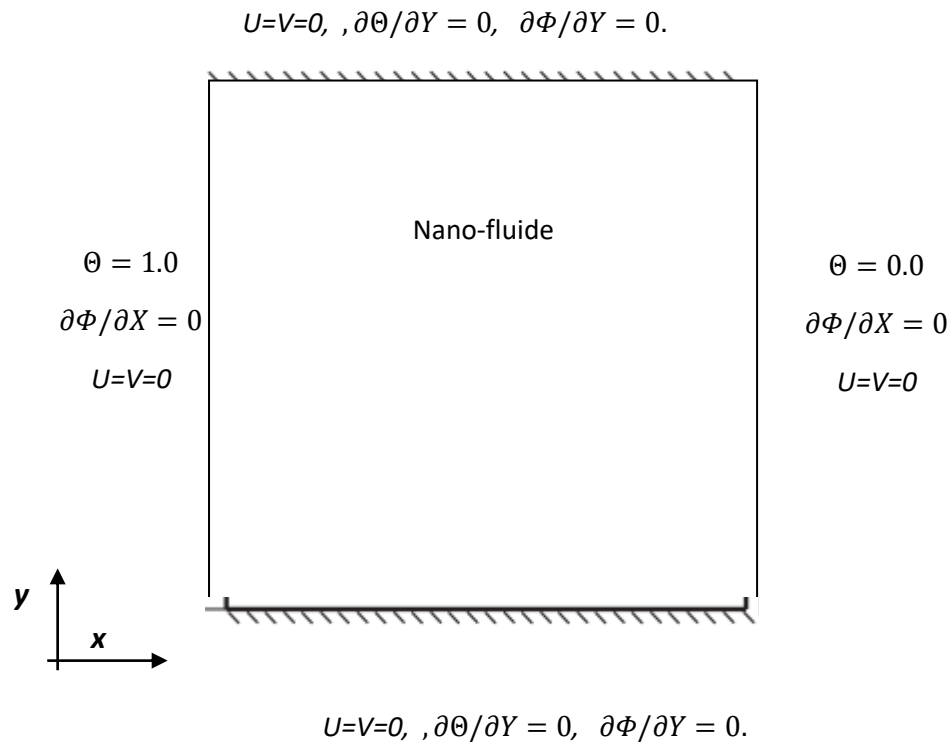
II.4 Les conditions initiales et aux limites à l'état

Pour résoudre le système d'équations dérivé précédemment, il est nécessaire d'incorporer les conditions initiales et les conditions limites pour chaque variable dépendante. Dans ce contexte, le fluide est au repos et sa température adimensionnelle est nulle à l'intérieur de toute la cavité.

Les parois de la cavité sont fixe. La température adimensionnelle reste constante le long des parois gauches et droite. Les deux parois horizontales sont soumises à une condition d'adiabatisme. Toutes les parois de la cavité sont isolées électriquement.

Tableau II.4. Conditions aux limites

Limites	x-vitesse ,	y- vitesse	Temperature	Electric potential
$Y=0, 0 \leq X \leq 1$	$U = 0.$	$V = 0.$	$\partial \theta / \partial Y = 0$	$\partial \Phi / \partial Y = 0.$
$Y=1, 0 \leq X \leq 1$	$U = 0.$	$V = 0.$	$\partial \theta / \partial Y = 0$	$\partial \Phi / \partial Y = 0.$
$X=0, 0 \leq Y \leq 1$	$U = 0.$	$V = 0.$	$\theta = 1.0$	$\partial \Phi / \partial X = 0.$
$X=1, 0 \leq Y \leq 1$	$U = 0.$	$V = 0.$	$\theta = 0.0$	$\partial \Phi / \partial X = 0.$

**Figure II.2** Les conditions aux limites

II.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons introduit le modèle physique examiné ainsi que les équations régissant le phénomène considéré. Ensuite, nous avons décrit en détail les conditions limites appliquées à l'ensemble de la frontière de ce domaine.

Chapitre III :

Méthode

Numérique

Chapitre III : Méthode Numérique

III .1 Introduction

La résolution numérique d'équations aux dérivées partielles (EDP) est une étape cruciale dans la modélisation et la simulation de phénomènes physiques et mathématiques complexes. Parmi les méthodes de discrétisation couramment utilisées, la Méthode des Volumes Finis (MVF) se distingue par sa capacité à fournir des solutions précises et stables pour une variété de problèmes. Ce rapport explore en détail la MVF en tant que méthode de discrétisation, décrivant son principe fondamental, sa mise en pratique et sa contribution à la détermination des champs de variables dans un problème spécifique.

III .2 Principe Fondamental de la Méthode des Volumes Finis

La Méthode des Volumes Finis est une approche de discrétisation largement utilisée pour résoudre des EDP. Son principe fondamental repose sur la discrétisation de l'espace en volumes finis, également appelés cellules ou éléments de maillage. Plutôt que de résoudre les équations sur des points individuels, la MVF se concentre sur l'intégration des équations sur chaque volume fini entourant un point du maillage. Cette intégration sur les volumes finis permet de prendre en compte les flux entrants et sortants à travers les frontières des cellules, ce qui est essentiel pour la modélisation précise de phénomènes de transport, de diffusion et de convection.

III.2 Mise en Œuvre de la Méthode des Volumes Finis

L'application de la Méthode des Volumes Finis s'effectue en plusieurs phases. Tout d'abord, le domaine de résolution est discrétisé en un maillage composé de cellules finies. Ensuite, les équations aux dérivées partielles du problème sont intégrées sur chaque cellule, en tenant compte des termes sources, des conditions aux limites et des flux. Les valeurs des variables inconnues sont ensuite approximées au centre de chaque cellule, et les équations discrétisées sont assemblées pour former un système d'équations linéaires.

La résolution de ce système d'équations permet de déterminer les valeurs des variables inconnues à travers tout le domaine de résolution. La MVF offre une grande flexibilité dans le choix des schémas numériques pour approximer les dérivées spatiales et temporelles, ce qui permet d'adapter la méthode aux propriétés spécifiques du problème.

III .3 Avantages et Applications de la Méthode des Volumes Finis

La Méthode des Volumes Finis présente plusieurs avantages. Elle est particulièrement adaptée aux géométries complexes et aux maillages non structurés, ce qui en fait un choix populaire pour des applications variées telles que la mécanique des fluides, la thermodynamique, l'électromagnétisme, la diffusion de la chaleur, et bien d'autres. De plus, la MVF conserve des propriétés telles que la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement, ce qui garantit des résultats physiquement cohérents.

En conclusion, la Méthode des Volumes Finis est une approche puissante et polyvalente pour la résolution numérique d'équations aux dérivées partielles. Son principe de discrétisation spatiale basé sur les volumes finis, associé à des schémas numériques adaptés, permet de modéliser une large gamme de phénomènes physiques avec précision. La MVF trouve des applications dans de nombreux domaines scientifiques et d'ingénierie, contribuant ainsi de manière significative à la compréhension et à la résolution de problèmes complexes.

Pour illustrer l'application de cette méthode, on étudie l'équation générale de transport formulée pour une propriété Φ comme suit :

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \Phi \mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) + S_{\Phi} \quad (\text{III.1})$$

En d'autres termes :

$$\begin{aligned} & \left(\text{variation de } \Phi \text{ dans un } \right) + \underbrace{\left(\text{flux net de l'élément de fluide} \right)}_{\text{terme convectif}} \\ & = \underbrace{\left(\text{variation de } \Phi \text{ due à la diffusion} \right)}_{\text{terme diffusif}} + \underbrace{\left(\text{variation de } \Phi \text{ due aux sources} \right)}_{\text{terme source}} \end{aligned}$$

Tel que :

Γ_{Φ} : le coefficient de diffusion.

S_{Φ} : le terme source.

La résolution de l'équation à l'aide de la méthode des volumes finis implique essentiellement son intégration sur un volume de contrôle :

$$\int_{cv} \frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t} dv + \int_{cv} \text{div}(\rho \Phi \mathbf{u}) dv = \int_{cv} \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) dv + \int_{cv} S_{\Phi} dv \quad (\text{III.2})$$

III.5. Etapes de résolution par la méthode des volumes finis

1. **Discretisation du domaine :** Divisez votre domaine de calcul en un maillage discret constitué de cellules. Ces cellules forment un ensemble de volumes finis sur lesquels vous allez résoudre l'équation. Chaque cellule possède des frontières communes avec ses cellules voisines.
2. **Équation discrète :** Pour chaque cellule du maillage, discrétisez l'équation de transport en remplaçant les dérivées partielles par des approximations appropriées. Par exemple, pour l'approximation de la dérivée spatiale, vous pourriez utiliser une méthode comme la différence finie ou la méthode des éléments finis. Cela donne une équation discrète pour chaque cellule.
3. **Intégration sur le volume :** Intégrez l'équation discrète sur chaque cellule pour obtenir une équation de bilan pour cette cellule. Cela implique d'intégrer les termes sur la partie intérieure de la cellule ainsi que les flux à travers les faces de la cellule.
4. **Approximation des flux :** Les flux à travers les faces de chaque cellule doivent être approximatés. Cela peut être fait en utilisant des schémas numériques adaptés, comme le schéma de flux centrés ou le schéma de flux décentrés, en fonction de la géométrie du maillage et de la solution attendue.
5. **Assemblage des équations locales :** En combinant les équations de bilan obtenues pour chaque cellule, vous obtenez un système d'équations linéaires couvrant tout le domaine. Ce système comprendra des inconnues discrètes pour les valeurs de Φ à l'intérieur de chaque cellule.
6. **Conditions aux limites :** Ajoutez les conditions aux limites appropriées au système d'équations. Ces conditions peuvent concerner les valeurs de Φ sur les bords du domaine ou des conditions internes spécifiques.
7. **Résolution du système d'équations :** Résolvez le système d'équations linéaires résultant pour les valeurs discrètes de Φ à l'intérieur de chaque cellule du maillage. Cela peut être fait à l'aide de techniques numériques telles que les méthodes itératives (ex. : méthode de Gauss-Seidel) ou directes (ex. : décomposition LU).
8. **Calcul des flux numériques :** Une fois les valeurs de Φ déterminées pour chaque cellule, calculez les flux numériques à travers les faces du maillage en utilisant les valeurs approchées des dérivées spatiales.

9. Mise à jour temporelle : Si vous résolvez le problème dans le temps, utilisez un schéma de discrétisation temporelle (comme le schéma explicite ou implicite) pour mettre à jour les valeurs de Φ au cours du temps.
10. Itérations temporelles : Répétez les étapes 2 à 9 pour chaque pas de temps afin de suivre l'évolution de Φ dans le temps.

Ces étapes constituent une vue d'ensemble du processus de résolution de l'équation de transport à l'aide de la Méthode des Volumes Finis. La complexité détaillée dépendra des choix spécifiques concernant les schémas numériques, les méthodes d'intégration, les conditions aux limites, etc.

III.6 Maillage

Le domaine de calcul est subdivisé en une série de sous-domaines désignés comme des volumes de contrôle. Ces volumes de contrôle couvrent l'ensemble du domaine de calcul de telle manière que la somme de leurs volumes corresponde précisément au volume total du domaine de calcul.

Les équations gouvernantes sans dimension soumises aux conditions aux limites sont résolues à l'aide de la formulation par volumes finie en utilisant l'algorithme SIMPLE de Patankar [26]. Les termes de convection-diffusion sont discrétisés par un schéma de loi de puissance et le système est modélisé numériquement en Fluent (version étudiant). Le domaine de solution consiste en une grille décalée bidimensionnelle uniformément espacée. La dépendance de la grille est également testée dans cette étude. Les résultats présentés dans la Fig.III.1 montrent qu'une taille de grille de 100×100 satisfait l'indépendance de la grille. Le critère de convergence consiste à réduire le résidu de masse maximal du volume de contrôle de la grille en dessous de 10^{-6} .

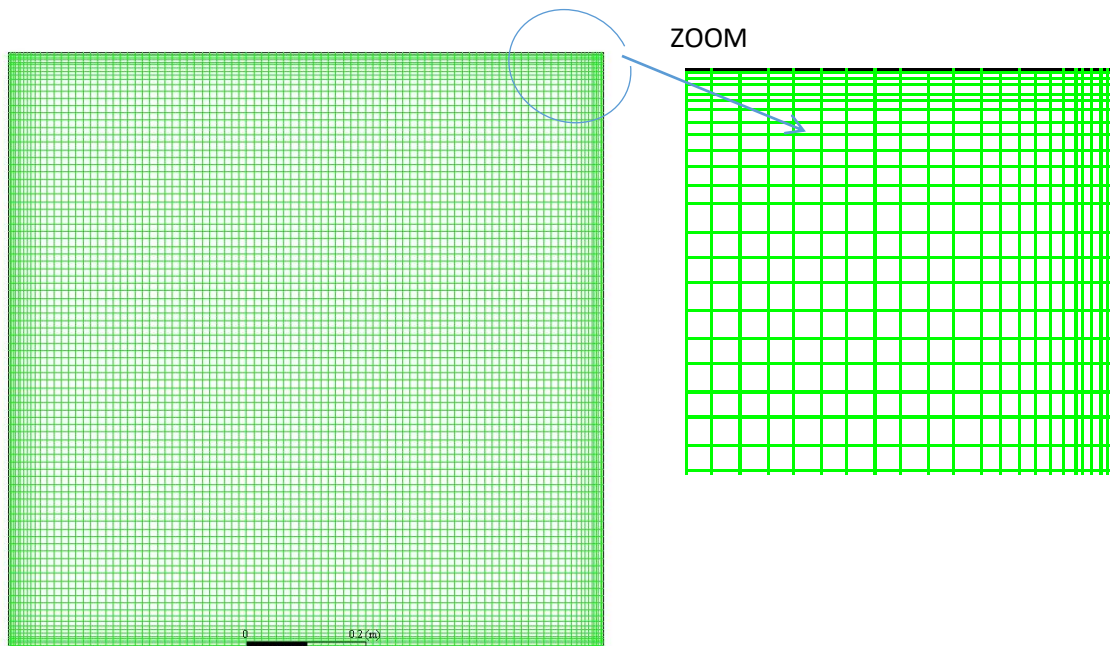


Fig III.1 : Maillage (100×100) nœuds

- Relation entre la vitesse et la pression :

Les équations qui décrivent les composantes de la quantité de mouvement sont interdépendantes en raison de l'influence de la pression, qui agit via les gradients de pression. Cependant, il n'existe pas d'équation spécifique pour décrire la pression en tant que variable indépendante.

- Algorithme utilisé :

L'algorithme SIMPLE, abréviation de "Semi-Implicit Method for Pressure Linked-Equations", est employé pour résoudre ce système d'équations discrètes. Cet algorithme établit un lien entre les vitesses corrigées et les pressions corrigées, assurant ainsi la conservation de la masse.

Lorsque nous appliquons la méthode des volumes finis pour discrétiser une équation de transport-diffusion sur un volume de contrôle, les valeurs des vitesses aux interfaces des volumes (U_e , U_w , U_s , U_n) sont nécessaires. Il devient donc avantageux de calculer ces vitesses directement aux interfaces, évitant ainsi des interpolations supplémentaires. De plus, lors de la discrétisation de l'équation de continuité et du gradient de pression avec une interpolation linéaire, des erreurs significatives peuvent survenir car une distribution de pression ou de vitesse sous forme de "damier" est traitée comme un champ uniforme. Pour remédier à ces problèmes, nous adoptons l'utilisation de grilles décalées, souvent appelées "staggered grids". Une grille principale est mise en place pour calculer la pression, la température et la concentration. Deux

grilles supplémentaires, l'une décalée vers la droite et l'autre vers le haut, sont utilisées pour calculer les vitesses horizontales et verticales.

III.7. Paramètres numériques utilisés dans cette étude

FLUENT applique la méthode des volumes finis pour discrétiser et résoudre les équations qui gouvernent l'écoulement, telles que l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie. Cette méthode implique l'intégration des équations sur des volumes de contrôle spécifiques. Le logiciel FLUENT est accessible via une interface graphique conviviale, et les utilisateurs avancés ont la possibilité de personnaliser cette interface en rédigeant des macros et des fonctions de menu pour automatiser diverses procédures selon leurs besoins. Les schémas de discrétisation employés pour différentes variables sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III-1 : schéma de discrétisations.

Variable	Schéma
La Pression	Schema Standard
Eq. Quantité de mouvement	Décentré amont (1 ^{er} ordre)
Eq. Energie	Décentré amont (1er ordre)
Couplage pression-vitesse	Algorithme Simple

Sous relaxation

Dans notre situation, les valeurs de sous-relaxation sont répertoriées dans le tableau ci-dessous. Les sous-relaxations sont couramment employées pour prévenir la divergence des processus itératifs dans les problèmes non linéaires. Elles consistent à modérer la vitesse de variation d'une variable entre deux itérations en introduisant un coefficient de sous-relaxation

Tableau III-2 : Sous relaxation

Factures de sous relaxation	Variable
0.3	Pression
0.7	Quantité de mouvement
1	Densité
1	Energie

- Critères de convergence :

La convergence d'une procédure se manifeste lorsque toute erreur a tendance à diminuer au fil des itérations jusqu'à atteindre une valeur ε . Une méthode est qualifiée de convergente lorsque les itérations ne produisent plus de changements significatifs dans les variables, selon un critère défini par l'utilisateur. Pour l'ensemble de notre étude, le critère de convergence est fixé à un résidu normalisé inférieur ou égal à 10^{-6} .

III.8. Conclusion

Au cours de cette section, nous avons succinctement présenté la méthode des volumes finis ainsi que les paramètres numériques employés dans cette étude. Les résultats de la résolution obtenus grâce au logiciel FLUENT seront examinés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV :

Résultats et

discussion

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV. Introduction

Cette étude examine numériquement la convection naturelle dans une enceinte carrée contenant un nanofluide à base d'eau et d' Al_2O_3 , soumise à l'influence d'un champ magnétique horizontal. Elle analyse les effets de paramètres tels que le nombre de Rayleigh, la fraction volumique de solides et le nombre de Hartmann sur les champs d'écoulement et de température, ainsi que sur le taux de transfert de chaleur.

IV.2 Test d'indépendance de maillage

Compte tenu de la convection naturelle couplée aux couches de Hartmann un choix minutieux de maillage est nécessaire pour garantir une bonne précision. Une maille avec des éléments quadratiques a été sélectionnée ; les détails des tests d'indépendance de la grille sont présentés dans le Tableau 1. L'influence du nombre de volumes de contrôle sur la précision des résultats a été étudiée, avec le nombre de Nusselt moyen à travers la paroi chauffée en fonction de la fraction volumique solide ϕ . À mesure que nous augmentons le nombre de volumes de contrôle au-dessus de 100×100 , le nombre de Nusselt moyen devient presque constant. En conséquence, la grille de 100×100 nœuds a été utilisée dans tous les calculs de cette étude.

Tableau IV.1 Test d'indépendance de maillage dans le $\text{Ra}=10^5$

Grille (x, y)	$\text{Nu}_{\text{moy}} (\phi=0.0)$ $\phi=0.0$	$\text{Nu}_{\text{moy}} (\phi=0.03)$	$\text{Nu}_{\text{moy}} (\phi=0.06)$
80×80	3.101	3.112	2.989
90×90	3.144	3.123	3.005
100×100	3.155	3.134	3.103
110×110	3.156	3.134	3.105

IV.3 Validation

Le code numérique est également validé par rapport aux résultats d'autres études portant sur la convection induite par la poussée magnéto-hydrodynamique dans des enceintes. Par exemple,

les résultats du transfert de chaleur par convection dans une enceinte carrée obtenus à partir du modèle actuel sont validés par rapport aux résultats de l'étude menée par Ghassemi et al.[2] (Fig. IV.1). Dans cette étude ils ont examiné la convection naturelle dans une enceinte remplie d'un nanofluide eau-Al₂O₃ et influencée par un champ magnétique. Ils ont montré les effets de paramètres importants tels que le nombre de Rayleigh, la fraction de densité des solides et le nombre de Hartmann sur le transfert de chaleur. Fig. (VI.2) montre la fonction de courant pour le cas $Ra = 10^5$ et $\phi = 0.03$, où nos résultats sont schématisés ci-dessous.

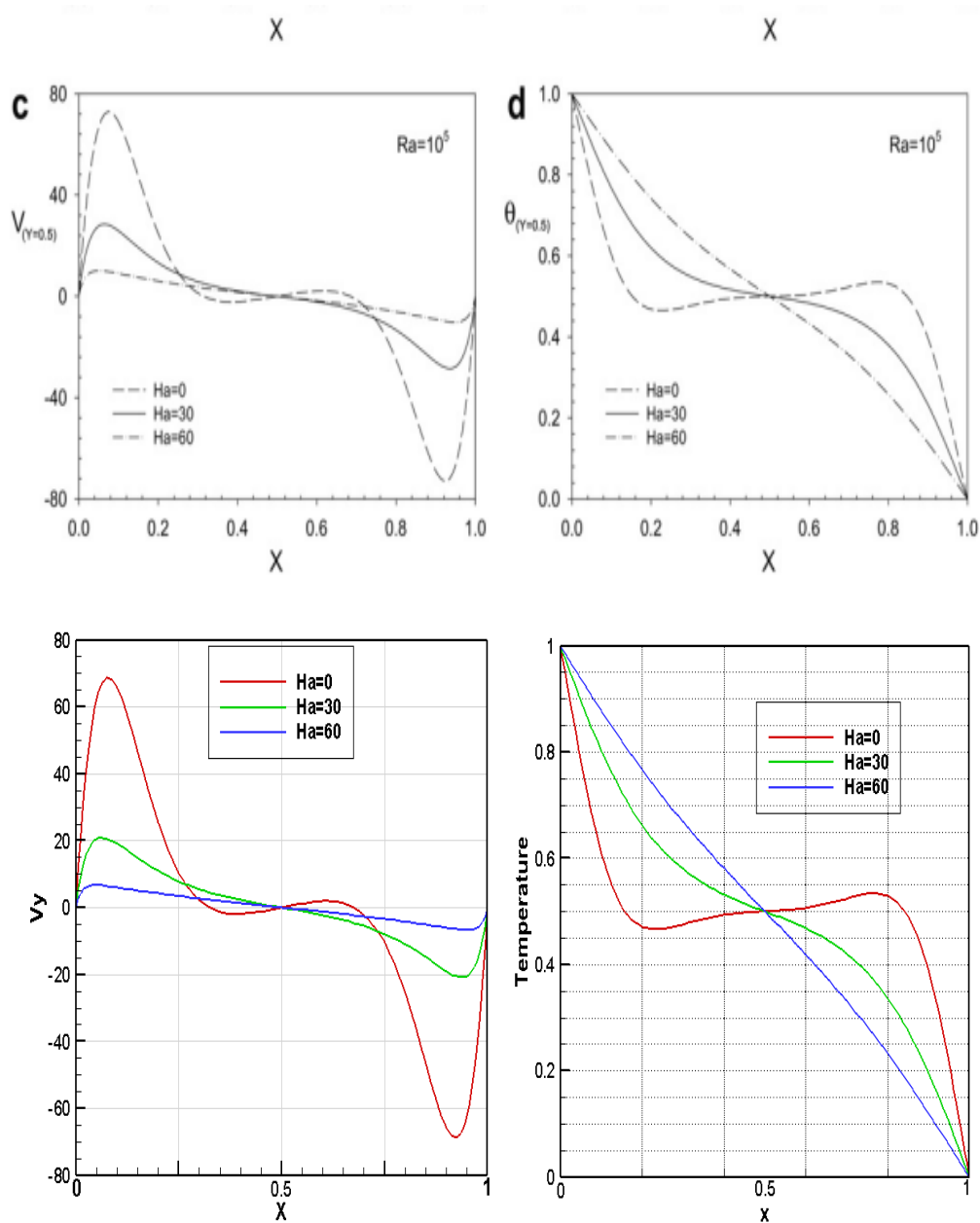


Fig.IV.1 : Validation des présents résultats (en bas) avec [2] (en haut) dans le $\phi= 0,03$ et $Ra=10^5$

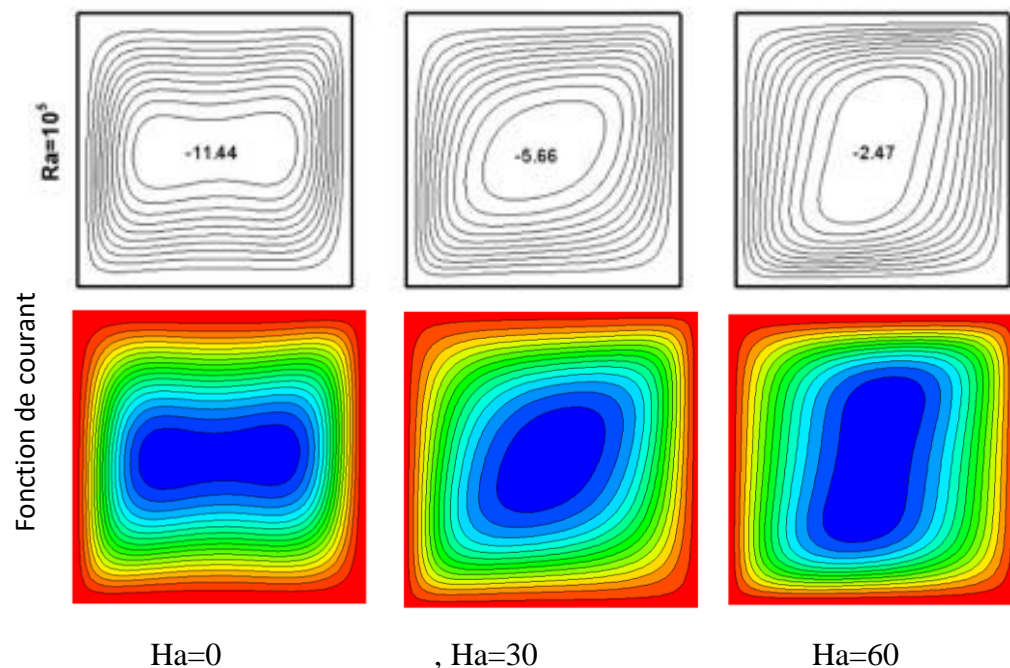


Fig. IV.2 Validation des présents résultats (en bas) avec [2] (en haut) dans le cas $Ra=10^5$ et $\phi=0,03$.

IV.4 L'influence du nombre de Hartmann sur le transfert de chaleur

Les effets du nombre de Hartmann sur les lignes de courant et les isothermes sont présentés respectivement dans les figures (IV.3) et (IV.4) pour trois valeurs du nombre de Rayleigh ($Ra = 10^4, 10^5, 10^6$). L'enceinte est remplie d'un nanofluide eau- Al_2O_3 , qui a une fraction volumique de solides de $\phi = 0.03$. Les écoulements de recirculation induits par la poussée de flottabilité à l'intérieur de l'enceinte sont évidents pour toutes les valeurs des nombres de Rayleigh et de Hartmann. L'intensité de ces circulations augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et diminue avec l'augmentation du nombre de Hartmann. Les résultats montrent également un régime dominé par la conduction avec des isothermes verticales à faibles nombres de Rayleigh et un régime dominé par la convection avec des isothermes horizontales à des nombres de Rayleigh élevés. Les isothermes sont affectés par les variations du nombre de Hartmann. Ces effets sont plus remarquables à $Ra = 10^5$, où une augmentation du nombre de Hartmann entraîne un changement des isothermes, passant de l'horizontal au vertical. Cela indique des écoulements de convection plus faibles à des nombres de Hartmann plus élevés. La figure Fig. (IV.5) montre les effets du nombre de Hartmann sur la vitesse adimensionnelle en y (gauche) et la température adimensionnelle (droite) le long du milieu horizontal de l'enceinte pour trois valeurs du nombre de Rayleigh ($Ra = 10^4, 10^5, 10^6$) et pour une fraction volumique de solides de $\phi = 0.03$. La vitesse en y maximale augmente lorsque

le nombre de Rayleigh augmente en raison des forts écoulements de flottabilité, et elle diminue lorsque le nombre de Hartmann augmente en raison de l'influence du champ magnétique sur les écoulements de convection. L'influence du nombre de Hartmann sur le profil de vitesse en y est plus significative à $Ra = 10^5$, où le champ d'écoulement de convection n'est pas très fort et peut être influencé par le champ magnétique. Cette influence peut également être déduite des profils de température. Les profils de température montrent l'influence maximale du nombre de Hartmann à $Ra = 10^5$. Cependant, à $Ra = 10^4$, où le transfert de chaleur est principalement dû à la conduction, et à $Ra = 10^6$, où des écoulements de convection forts se produisent à l'intérieur de l'enceinte, il est observé que le nombre de Hartmann a une influence insignifiante sur le profil de température. La Fig(IV.6) montre les effets du nombre de Hartmann sur le nombre de Nusselt local le long de la paroi chaude verticale gauche de l'enceinte pour trois valeurs du nombre de Rayleigh ($Ra = 10^4, 10^5, 10^6$). L'enceinte est remplie d'un nanofluide eau- Al_2O_3 avec une fraction volumique de solides de $\phi = 0.03$. Les résultats montrent qu'en raison de l'augmentation de l'écoulement de flottabilité renforcé, le nombre de Nusselt local augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et en raison de la suppression des écoulements circulatoires de convection par le champ magnétique plus fort, il diminue avec l'augmentation du nombre de Hartmann. Le changement du nombre de Hartmann a un effet plus remarquable sur le nombre de Nusselt local à $Ra = 10^5$, où les écoulements de flottabilité sont significativement influencés par le champ magnétique. Cette constatation est similaire aux résultats précédents.

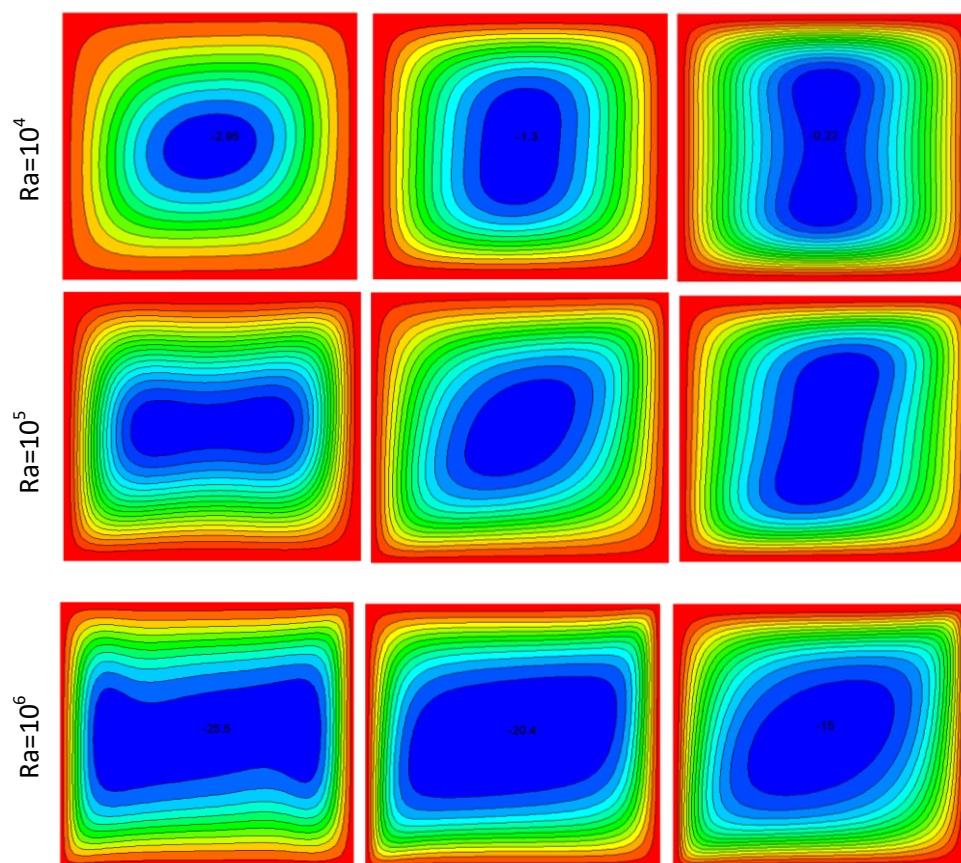


Fig. IV.3 Les lignes de courant pour trois valeurs du nombre de Rayleigh ($Ra = 10^4, 10^5, 10^6$) et $\phi = 0.03$.

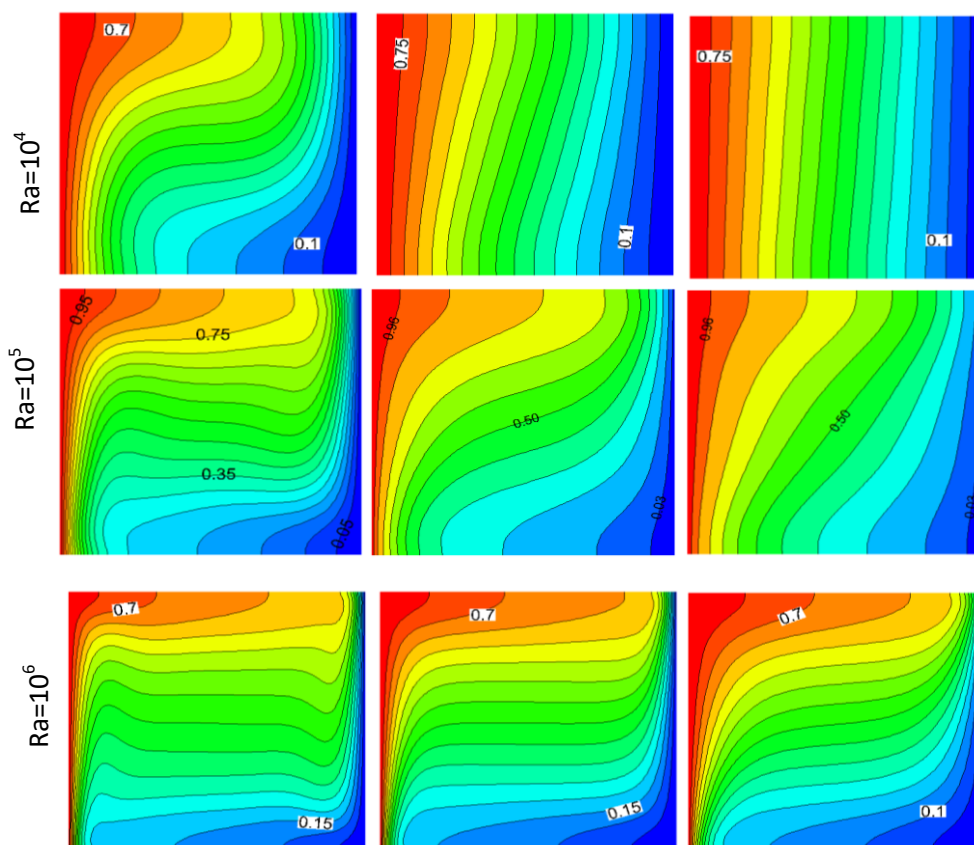


Fig. IV.4 Les isothermes pour trois valeurs du nombre de Rayleigh ($Ra = 10^4, 10^5, 10^6$) et $\phi = 0.03$.

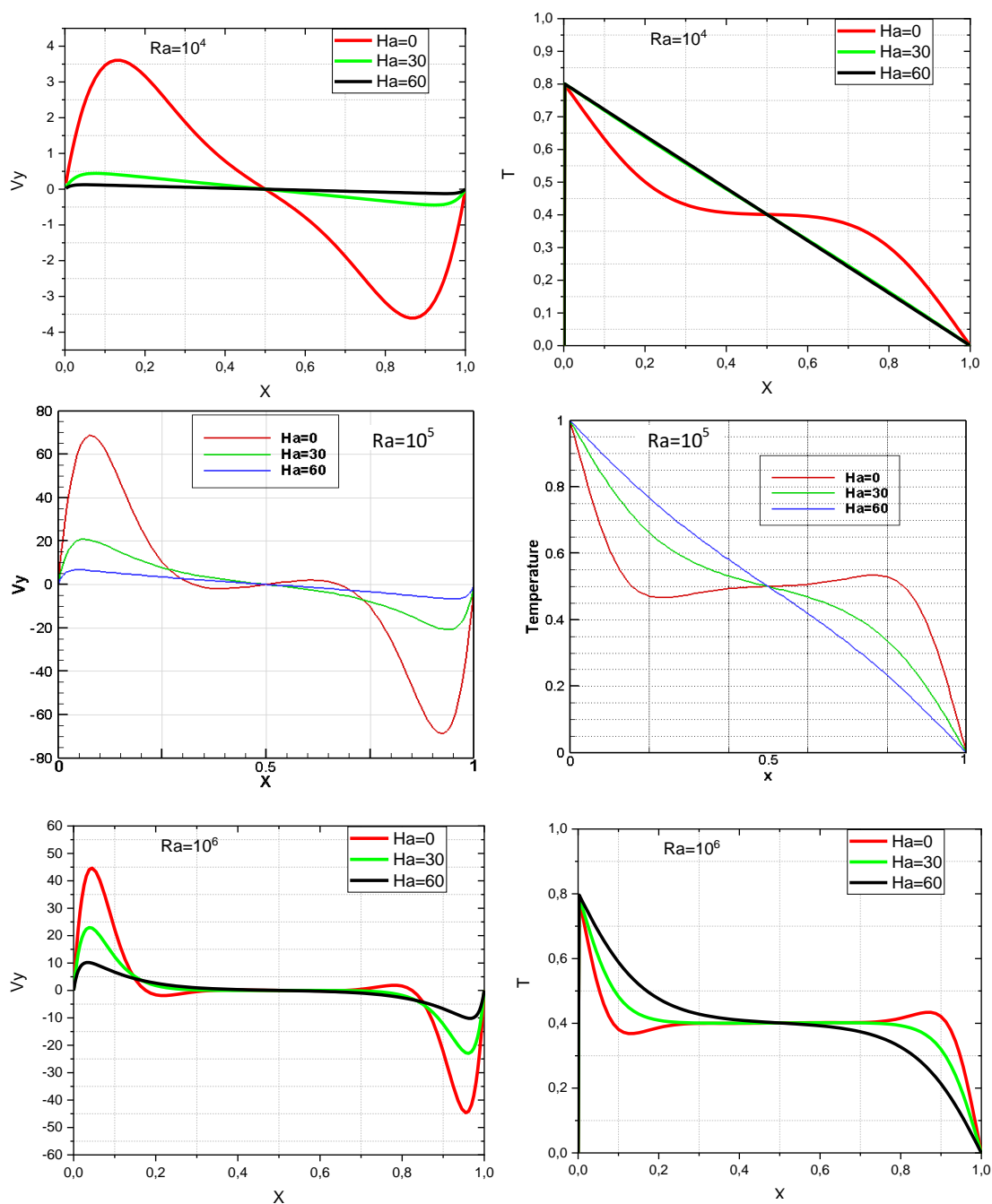


Fig. IV.5. La vitesse adimensionnelle en y (gauche) et la température adimensionnelle (droite) le long du milieu horizontal de l'enceinte pour trois valeurs et $\phi = 0.03$.

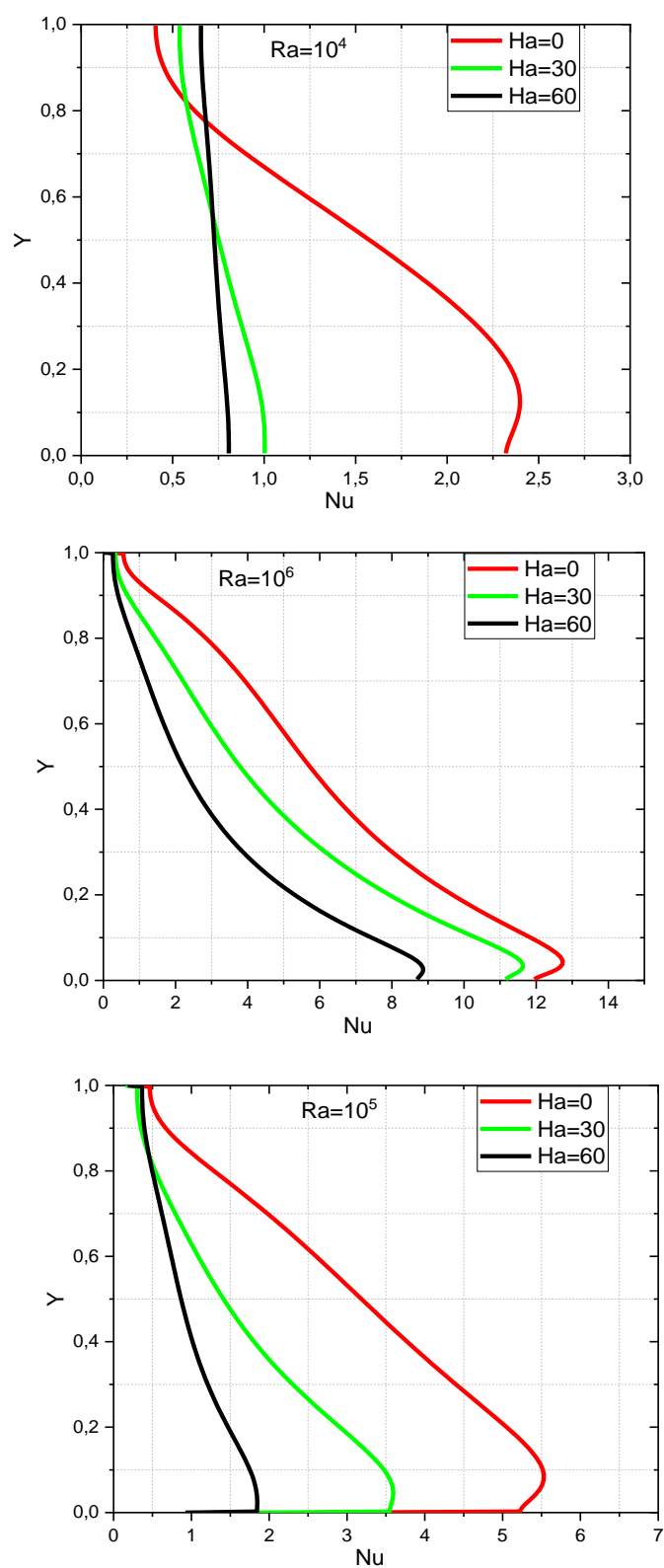


Fig. IV.6 Nusselt local le long de la paroi chaude verticale de l'enceinte pour trois valeurs du nombre de Rayleigh lorsque $\phi = 0.03$

La Figure (IV.7) montre comment le nombre de Nusselt moyen varie en fonction du nombre de Hartmann pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh lorsque l'enceinte est remplie d'un nanofluide eau-Al₂O₃ ($\phi = 0.03$). Pour $Ra = 10^4$, où le transfert de chaleur est uniquement dû à la conduction et où le champ magnétique n'a pas un effet considérable sur les performances de transfert de chaleur, le nombre de Nusselt moyen reste inchangé lorsque le nombre de Hartmann augmente. Cependant, le nombre de Nusselt moyen diminue lorsque le nombre de Hartmann augmente pour des valeurs plus élevées du nombre de Rayleigh, où le transfert de chaleur est en partie ou principalement dû à la convection et où le champ magnétique peut supprimer les écoulements de convection. Un examen du rapport moyen des nombres de Nusselt ($Num/Num, Ha = 0$) révèle les effets du champ magnétique sur les performances de transfert de chaleur de l'enceinte. La Figure (IV. 8) montre la variation de ($Num/Num, Ha = 0$) par rapport au nombre de Rayleigh à différentes valeurs du nombre de Hartmann. Le rapport moyen des nombres de Nusselt à $Ha = 0$ est la valeur de référence et la fraction volumique de solides est supposée constante ($\phi = 0.03$) pour cette partie de l'étude. Comme observé précédemment, l'influence du nombre de Hartmann sur le rapport moyen des nombres de Nusselt est insignifiante à $Ra = 10^4$, où la conduction est le principal mode de transfert de chaleur. À $Ra = 10^6$, où les écoulements de convection sont très forts, le nombre de Hartmann a également un effet mineur sur ($Num/Num, Ha = 0$). Cependant, pour d'autres valeurs du nombre de Rayleigh, où le champ magnétique supprime les écoulements de convection, le nombre de Hartmann peut avoir un effet significatif sur le rapport moyen des nombres de Nusselt. Il convient également de noter que pour toute valeur du nombre de Hartmann, il existe un nombre de Rayleigh critique pour lequel le rapport moyen des nombres de Nusselt atteint son minimum. La corrélation suivante a été établie entre les valeurs critiques du nombre de Rayleigh et du nombre de Hartmann lorsque la fraction volumique de solides est $\phi = 0.03$.

$$Ra_{\text{critique}} = aHa^2 + bHa + c$$

$$\text{Avec } a = 22.2, b = -600 \text{ et } c = 14000$$

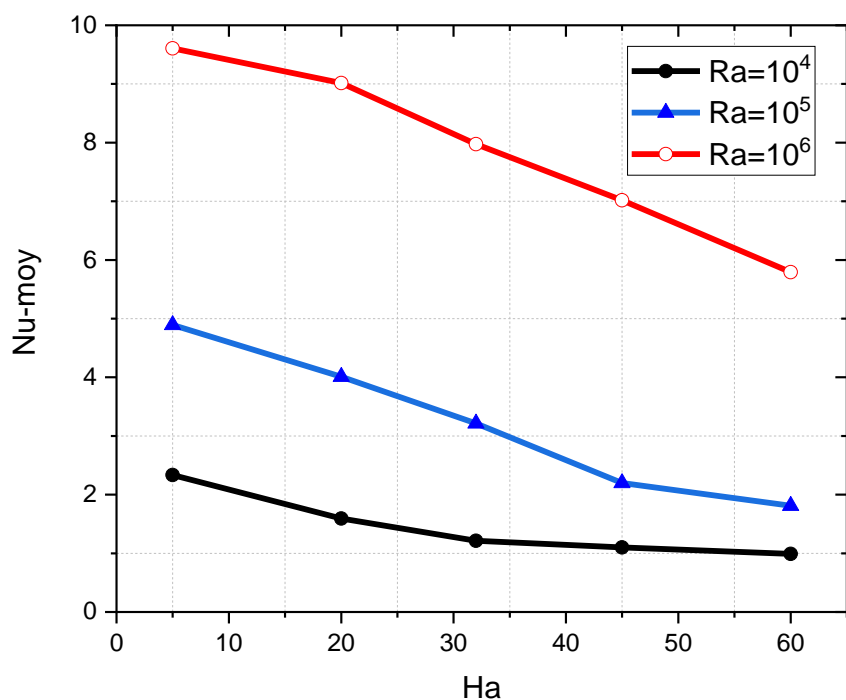


Fig. IV.7 La variation Nusselt moyenne avec le nombre de Hartmann pour $\phi = 0.03$.

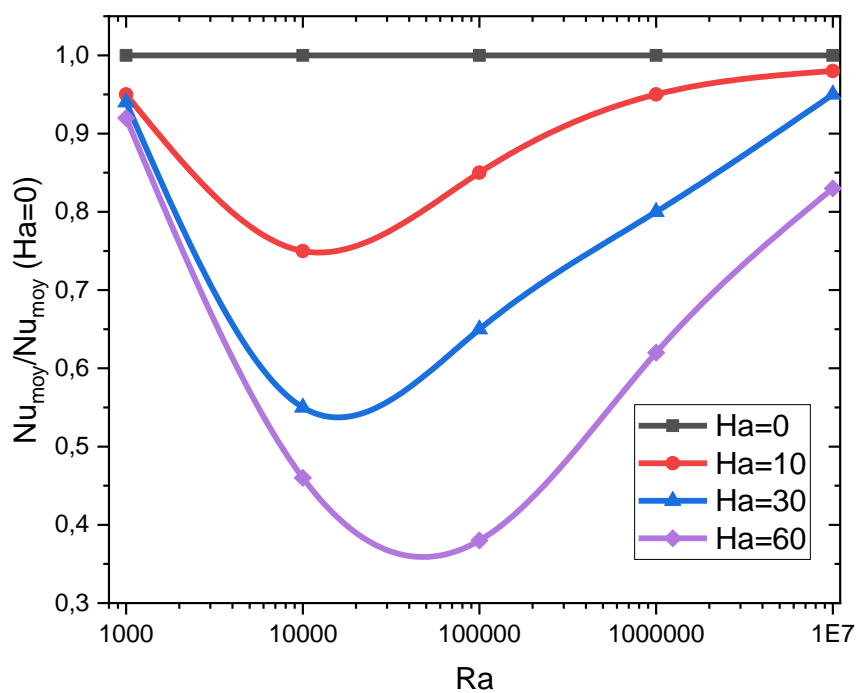
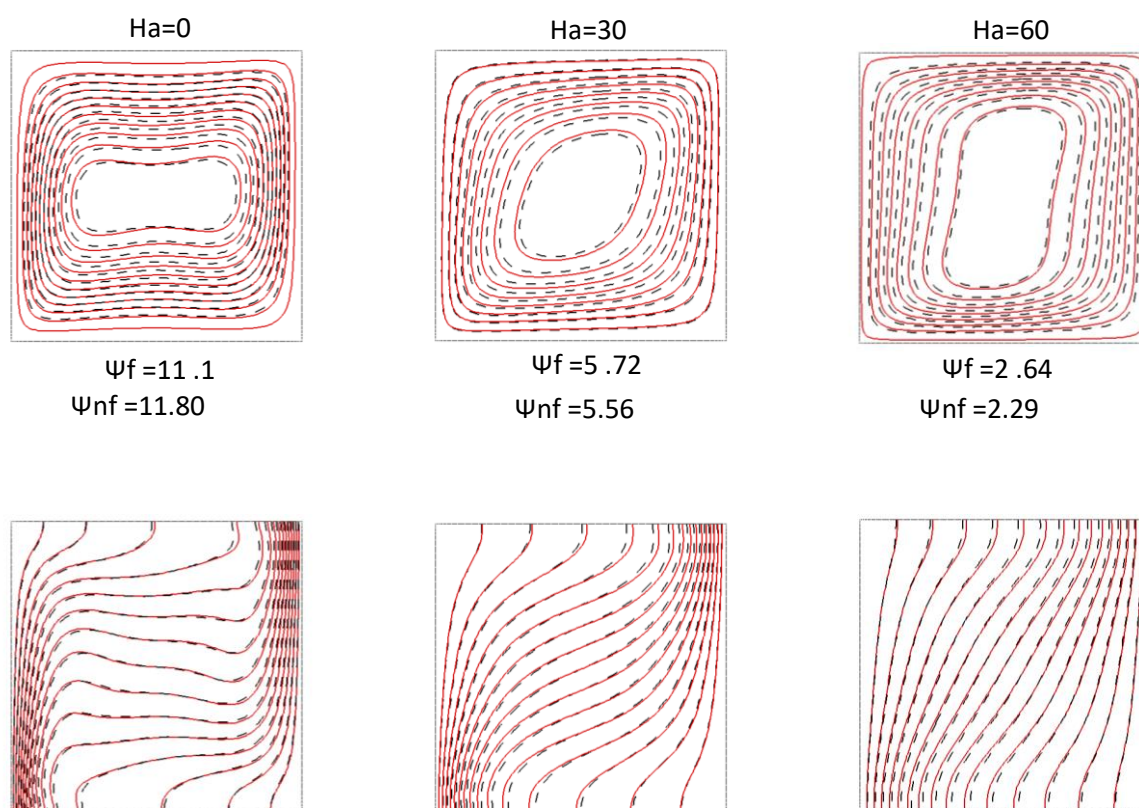


Fig. IV.8 La variation Nusselt moyenne avec Rayleigh pour $\phi = 0.03$.

Le Tableau (IV.2) présente l'effet de la fraction volumique de solides (ϕ) sur le nombre de Nusselt moyen (Nu_{moy}) et la valeur maximale de la fonction de courant (Ψ_{max}) à différentes valeurs du nombre de Rayleigh (Ra). Le nombre de Hartmann est supposé être $Ha = 30$. Pour toutes les valeurs de la fraction volumique de solides, les résultats montrent que Nu_{moy} et Ψ_{max} augmentent lorsque le nombre de Rayleigh augmente. Cela est dû à l'augmentation de la force de l'écoulement induit par la poussée de flottabilité à l'intérieur de l'enceinte à mesure que le nombre de Rayleigh augmente. Pour $Ra = 10^5$ et 10^6 , une augmentation de la fraction volumique de solides conduit à des valeurs plus élevées du nombre de Nusselt moyen et de la fonction de courant maximale. Cela est dû aux écoulements de convection plus forts qui régissent le processus de transfert de chaleur. Cependant, pour $Ra = 10^4$, la conduction est le principal moteur du transfert de chaleur. Pour ces faibles valeurs du nombre de Rayleigh, les forces de flottabilité sont faibles et la diffusion régit le comportement du fluide. L'ajout de nanoparticules solides au fluide de base entraîne une augmentation de mnf/rnf dans le terme de diffusion. Cela signifie un écoulement de circulation plus faible et des valeurs inférieures de la fonction de courant maximale. Cela étant dit, le taux de transfert de chaleur devrait toujours augmenter à mesure que la fraction volumique de solides augmente. La raison en est que l'ajout de nanoparticules solides avec une conductivité thermique plus élevée améliore le processus de transfert de chaleur par conduction à faibles nombres de Rayleigh. Les résultats intéressants apparaissent à $Ra = 10^5$, où à la fois Num et Ψ_{max} diminuent lorsque la fraction volumique de solides augmente. Pour illustrer cet effet, le comportement du fluide à ce nombre de Rayleigh est présenté dans la Fig (IV.8). La Fig (IV.9) présente une étude comparative entre le fluide pur ($\phi = 0$) et le nanofluide ($\phi = 0.06$) en termes de lignes de courant et d'isothermes à $Ra = 10^5$. Les résultats sont présentés pour trois valeurs du nombre de Hartmann ($Ha = 0, 30, 60$). Les résultats montrent que l'ajout de nanoparticules entraîne une augmentation de la fonction de courant maximale en l'absence du champ magnétique. Cependant, la force des circulations de convection diminue lorsque le champ magnétique est appliqué. C'est pourquoi l'ajout de nanoparticules en présence de forces magnétiques entraînera des circulations de poussée de flottabilité plus faibles et des valeurs inférieures de la fonction de courant.

Tableau IV.2 Nusselt moyen pour différentes Ra and ϕ ($Ha = 30$).

	$Ra=10^4$	$Ra=10^5$	$Ra=10^6$
$Nu_{moy} \quad \phi=0.0$	1.179	3.155	7.903
$Nu_{moy} \quad \phi=0.03$	1.214	3.134	7.977
$Nu_{moy} \quad \phi=0.06$	1.293	3.103	8.092

**Fig. IV.9** Les lignes de courant (haut) et isothermes (bas) pour $Ra = 10^5$, l'eau pure (—) et le nanofluide avec $\phi= 0.06$ (— —)

Conclusion générale

La convection naturelle dans une enceinte carrée remplie d'un nanofluide eau- Al_2O_3 et influencée par un champ magnétique a été étudiée numériquement. Les effets de paramètres tels que le nombre de Rayleigh, la fraction volumique de solides et le nombre de Hartmann sur les champs d'écoulement et de température, ainsi que le taux de transfert de chaleur, ont été examinés. Les résultats de l'analyse numérique ont conduit aux conclusions suivantes.

- Des circulations d'écoulement plus intenses à l'intérieur de l'enceinte et des isothermes renforcées près des parois verticales sont évidentes à des nombres de Rayleigh plus élevés et à des nombres de Hartmann plus faibles pour une fraction volumique de solides fixe.
- Les profils de vitesse en y et de température le long du milieu horizontal de l'enceinte montrent également des champs d'écoulement plus forts à l'intérieur de l'enceinte et des gradients de température plus élevés près des parois verticales à des nombres de Rayleigh plus élevés et à des nombres de Hartmann plus faibles.
- Les profils du nombre de Nusselt local le long de la paroi chaude et le nombre de Nusselt moyen confirment que lorsque le nombre de Hartmann augmente, le taux de transfert de chaleur diminue.
- Le taux de cette diminution dépend du nombre de Rayleigh. L'influence la plus significative du nombre de Hartmann sur la détérioration du transfert de chaleur se produit à $\text{Ra} = 10^5$, où l'écoulement induit par la poussée de flottabilité commence à dominer le mécanisme de transfert de chaleur.
- L'effet de la fraction volumique de solides sur le taux de transfert de chaleur dépend fortement des valeurs du nombre de Rayleigh et du nombre de Hartmann.
- Pour $\text{Ha} = 30$, le taux de transfert de chaleur augmente lorsque la fraction volumique de solides augmente pour toutes les valeurs du nombre de Rayleigh sauf pour $\text{Ra} = 10^5$. À ce nombre de Rayleigh, le taux de transfert de chaleur peut soit augmenter soit diminuer avec une augmentation de la fraction volumique de solides en fonction du nombre de Hartmann.

Références

- [1] Godson, L., Raja, B., Mohan, Lal D., **2010**. Wongwises, S., Enhancement Of Heat Transfer Using Nanofluids—An Overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp.629-641, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.004>
- [2] Ghasemi, B., Aminossadati, S.M, Raisi. A., **2011**. Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure »*International Journal of Thermal Sciences*, 50, 1748-1756, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2011.04.010
- [3] Zaraki, A., Ghalambaz, M., Chamkha, A. J., Ghalambaz, M., Rossi, D., **2015**. Theoretical Analysis of Natural Convection Boundary Layer Heat and Mass Transfer of Nanofluids: Effects of Size, Shape and Type of Nanoparticles, Type of Base Fluid and Working Temperature, *Advanced Powder Technology*, 26, pp. 935-946. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.03.012>
- [4] Bachok, N., Ishak, A., Pop, I., **2011**. Flow and heat transfer over a rotating porous disk in a nanofluid, *Physica B Condensed Matter*, 406, 1767-1772, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.02.024>
- [5] Turkyilmazoglu, M., **2014**. Nanofluid flow and heat transfer due to a rotating disk, *Computers & Fluids*, 94, 139-146, <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.02.009>
- [6] Rafiq, T. and Mustafa, M., **2020**. Computational Analysis of Unsteady Swirling Flow Around a Decelerating Rotating Porous Disk in Nanofluid, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45 ,1143–1154, . <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04257-z>
- [7] Sheikholeslami, M. and Ganji, D.D., **2014**. Three dimensional heat and mass transfer in a rotating system using nanofluid, *Powder Technol*, 253, pp.789–796, DOI:10.1016/J.POWTEC.2013.12.042
- [8] Sheikholeslami, M, and Rokni, B. H., **2017**. Simulation of nanofluid heat transfer in presence of magnetic field: A review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, pp.1203–1233, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.108>
- [9] Reddy, P. S, Chamkha, A.J. **2016**. Soret and Dufour Effects on MHD Convective Flow of Al₂O₃-Water and TiO₂-Water Nanofluids Past a Stretching Sheet in Porous Media with Heat Generation/Absorption. *Advanced Powder Technology*, 27, pp. 1207-1218. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.04.005>
- [10] Mahfoud, B. and Bessaïh, R., **2012**. Oscillatory swirling flows in a cylindrical enclosure with co-/counter-rotating end disks submitted to a vertical temperature gradient. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 8, pp.1-26, DOI: [10.3970/fdmp.2011.008.001](https://doi.org/10.3970/fdmp.2011.008.001)
- [11] Mahfoud, B., Benhacine, H., Laouari, A., Bendjaghoul, A., **2020**. Magnetohydrodynamic Effect on Flow Structures Between Coaxial Cylinders Heated from Below, *J. Thermophysics and Heat Transfer*, 34 (2), pp.1-10, <https://doi.org/10.2514/1.T5805>

Références

- [12] Mahfoud, B., Laouari, A., Hadjadj, A., Benhacine, H., **2019**. Counter-rotating flow in coaxial cylinders under an axial magnetic field. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 78, pp. 139-46, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.06.009>
- [13] Bendjaghlouli, A., Mahfoud, B., Ameziani, D.E., **2019**. Magnetohydrodynamic flow in a truncated conical enclosure, *Journal of Thermal Engineering*, 5 pp.77-83, <https://doi.org/10.2514/1.T5529>
- [14] [Laouari, A.](#), [Mahfoud, B.](#), [Bessaïh, R.](#), [Hadjadj, A.](#), **2021**. Hydrodynamic instabilities in swirling flow under axial magnetic field, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 85, pp. 245–260, [10.1016/j.euromechflu.2020.08.006](https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2020.08.006)
- [15] Mahfoud, B., **2021**. Effects of an Axial Magnetic Field on Vortex Breakdown and Fluid Layer” *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 14, pp. 1741–1753, <https://doi.org/10.47176/jafm.14.06.32585>
- [16] Mahfoud, B., Bessaïh, R., **2012**. Stability of swirling flows with heat transfer in a cylindrical enclosure with co/counter-rotating end disks under an axial magnetic field, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 61, pp.463–482, <https://doi.org/10.1080/10407782.2012.654461>
- [17] Ashorynejad, H.R., Sheikholeslami, M., Pop, I., Ganji, D.D., **2013**. Nanofluid flow and heat transfer due to a stretching cylinder in the presence of magnetic field, *Heat Mass Transfer*, 49 427–436, <https://doi.org/10.1007/s00231-012-1087-6>.
- [18] Sheikholeslami M., Hatami M., Ganji, D.D., **2014**. Nanofluid flow and heat transfer in a rotating system in the presence of a magnetic field, *Journal of Molecular Liquids*, 190, pp.112–120, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2013.11.002>
- [19] Sheikholeslami, M., **2017**. Influence of Lorentz forces on nanofluid flow in a porous cylinder considering Darcy model, *Journal of Molecular Liquids*, 225, pp. 903–912, doi.org/10.1016/j.molliq.2016.11.022
- [20] Mustafa, M., Mushtaq, A., Hayat, T., Alsaedi, A., **2016**. Rotating flow of magnetite water nanofluid over a stretching surface inspired by non-linear thermal radiation, *PLoS ONE*, 11, 0149304, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149304>
- [21] Sheikholeslami M. and Ganji, D. D., **2018**. Numerical investigation of nanofluid melting heat transfer between two pipes, *Alexandria Engineering Journal*, 57(3), pp. 1261-1269, [doi:10.1016/j.aej.2017.03.028](https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.03.028)
- [22] Aghamajidia, M., Yazdi, M.E., Dinarvand, S., Pop, I., **2018**. Tiwari-Das nanofluid model for magnetohydrodynamics (MHD) natural-convective flow of a nanofluid adjacent to a spinning down-pointing vertical cone, *Propulsion and Power Research*, 7, pp.78-90, <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2018.02.002>

Références

[23] E. Abu-Nada, Z. Masoud, A. Hijazi, Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 (5) (2008) 657-665

[24] Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., & Ganji, D. D. (2014). Lattice Boltzmann method for MHD natural convection heat transfer using nanofluid. *Powder Technology*, 254, 82–93.

[25] [Davidson](#), P. A., **2001**, *An Introduction to Magnetohydrodynamics*. Cambridge, University Press, Cambridge

[26] Patankar, S., **1980**. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New-York.