

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
X•⊙V•EX •K||E C:K÷|A :||K•X - X:⊙EO÷t -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en **Génie Mécanique**
Option : **Énergétique**

Thème

**Simulation des effets du champ magnétique
sur le transfert de chaleur dans une enceinte
cylindrique remplie d'un nanofluide**

Par

MANSOURI Oussama et KERIM Abdelouahab

Évalue le /06/2022

Par le jury composé :

Président : M^r. Ahmanache Abdennacer MCB Université Bouira

Encadreur : M^r. B. MAHFOUD MCA Université Bouira

Examineurs :

M^r. LAOUARI AZZEDINE MAA Université Bouira

REMERCIEMENTS

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la force, le courage et la patience d'entamer et de terminer ce modeste travail.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr. MAHFOUD Brahim, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs du département de Génie Mécanique de l'Université de BOUIRA pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont fait preuve malgré leurs charges académique et professionnelles.

Enfin, je remercie très sincèrement tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

OUSSAMA

ABDELOUAHAB

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère grand-mère qui m'a soutenu et encouragé, que

Dieu la protège

*A mes très chers parents qui m'ont soutenu tout au long de ma
vie,*

Qu'ils trouvent ici ma reconnaissance.

*A mes très chères sœurs qui mon soutenus tout au long de mon
Cursus.*

A mes chères cousins et cousines

A toute la famille.

A mon cher copain Oussama qui a partagé le travail avec moi

A mes très chères qui m'ont toujours soutenu.

A tous mes amis qui me connaisse de prés ou de loin.

ABDELOUAHAB

Dédicaces

À qui je dois ce que je suis,

À ma très chère grand-mère qui m'a soutenu et encouragé, que

Dieu la protège

À mes parents qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

À mes sœurs qui ont toujours su me motiver même dans les moments de doute. Elles m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

À mon cher copain Abdelouahab qui a partagé le travail avec moi.

À mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

À mes amis pour leur support et encouragement, à qui je souhaite plus de succès.

Ce mémoire leur est dédié

OUSSAMA

ملخص

في هذه الدراسة، تم النظر في التدفق الدوامي لسائل نانوي مدفوع بقرص سفلي دوار لحاوية أسطوانية تحت تأثير مجال مغناطيسي وحمل حراري. تم تحليل تأثيرات التوصيل الكهربائي للجدران الأسطوانية على تحسين نقل الحرارة عددياً. المعادلات التي تصف المشكلة المركبة (MHD والحمل المختلط) في ظل الافتراضات المعتمدة يتم حلها عددياً بتقنية الحجوم المتناهية. تم إجراء الحسابات لرقم رينولدز الثابت ($Re = 1000$)، ورقم ريتشاردسون ($0 \leq Ri \leq 2$)، ونسبة العرض إلى الارتفاع ($H / R = 2$)، ورقم هارتمان ($0 \leq Ha \leq 60$) والجسيمات النانوية الصلبة (النحاس) ذات الكسر الحجمي ($\phi = 0.1$). تم دراسة حالتين وهي على التوالي: (جدران EI: جدران عازلة)، (جدران EC: جدران موصلة كهربائياً) لوحظ انخفاض في متوسط عدد نيسلت Nu مع زيادة عدد ريتشاردسون بسبب التقسيم الطبقي. يحد الأخير من انتقال الحرارة بين المناطق الساخنة والباردة من الأسطوانة. تشير النتائج إلى أن رقم نسلت يصبح أكبر في نطاق معين من أرقام هارتمان، وخاصة عندما يكون الغطاء الدوار موصل كهربائياً. في الواقع، متوسط عدد نسلت يتناقص بينما يزيد رقم هارتمان بعد تجاوز قيمة حرجية. أخيراً، تلعب الموصلية الكهربائية للجدران دوراً مهماً في تحسين نقل الحرارة في تدفق دوامة السوائل النانوية.

الكلمات المفتاحية: الموصلية الكهربائية، Nanofluid، رقم Nusselt، المجال المغناطيسي، التدفق الدوامي.

Résumé

Dans cette étude, l'écoulement tourbillonnant d'un nano fluide entraîné par un disque inférieur rotatif d'un récipient cylindrique sous l'effet d'un champ magnétique et d'un gradient de température est considéré. Les effets de la conductivité électrique des parois cylindriques sur l'amélioration du transfert de chaleur sont analysés numériquement. Les équations qui décrivent le problème combiné (MHD et convection mixte) sous les hypothèses adoptées sont résolues numériquement par la technique des volumes finis. Les calculs ont été effectués pour un nombre de Reynolds fixe ($Re=1000$), un nombre de Richardson ($0 \leq Ri \leq 2$), un rapport d'aspect ($H/R = 2$), un nombre de Hartmann ($0 \leq Ha \leq 60$) et une nanoparticule solide (cuivre) avec une fraction volumique ($\phi = 0,1$). Deux cas sont considérés dans cette étude : (EI-parois : les parois isolantes), (EC-Paroi : les parois électriquement conductrices). Une diminution du nombre de Nusselt moyen a été constatée avec l'augmentation du nombre de Richardson due aux couches de stratification. Ces dernières limitent les transferts de chaleur entre les zones chaudes et froides du cylindre. Les résultats indiquent que le nombre de Nusselt devient plus grand dans une certaine gamme de nombres de Hartmann, et surtout lorsque le couvercle rotatif est électriquement conducteur. En effet, le nombre de Nusselt moyen diminue alors que le nombre de Hartmann augmente après avoir dépassé une valeur critique. Enfin, la conductivité électrique des parois joue un rôle important dans l'amélioration du transfert de chaleur dans un écoulement tourbillonnaire de nano fluide.

Mots clés : conductivité électrique, nano fluide, nombre de Nusselt, champ magnétique, écoulement tourbillonnaire

Abstract

In this study, the swirling Nanofluid flow, which is driven by a rotating bottom disk of a cylindrical container under magnetic field effect and temperature gradient, is considered. Effects of electrical conductivity of cylindrical walls on heat transfer enhancement are numerically analyzed. The governing equations that describe the combined problem (MHD and mixed convection) under the adoptive assumptions are solved numerically by the finite volume technique. Calculations were made for fixed Reynolds number ($Re=1000$), Richardson number ($0 \leq Ri \leq 2$), aspect ratio ($H/R = 2$), Hartmann number ($0 \leq Ha \leq 60$), and solid nano particle (copper) with volume fraction ($\phi = 0.1$). Two cases are considered in this study: (EI-Walls: insulating all wall), (EC-wall: electrically all walls). A decrease in the mean Nusselt number was found with the increase of the Richardson number due to stratification layers. These latter limit the heat transfers between the hot and cold zones of the cylinder. The results indicate that the Nusselt number gets bigger within a certain range of Hartmann numbers, and especially when the rotating lid is electrically conducting. Indeed, average Nusselt number decreases while the Hartmann number increase after it exceeds a critical value. Finally, the electrical conductivity of walls plays an important role in heat transfer enhancement in nano fluid swirling flow.

Key words: *electric conductivity, nano fluid, Nusselt number, magnetic field, swirling flow*

Sommaire

Remerciements	(I)
Dédicaces	(II)
ملخص	(IV)
Résumé	(IV)
Abstract	(V)
Listes des figures	(VI)
Listes des tableaux	(VIII)
Nomenclature	(IX)
Introduction générale	(1)

Chapitre I : généralité et revues bibliographiques

I.1. Généralité	(2)
I.2. Revues bibliographiques	(3)
I.3. Les définitions	(5)
I.3.1. Nanofluide	(5)
I.3.2. La convection	(10)
I.4. L'utilisation des nanofluides	(11)
I.4.1 Comment un nano fluide peut-il améliorer le transfert thermique	(11)
I.4.2 Quels phénomènes principaux sont candidats pour expliquer ces améliorations	(12)

Chapitre II : Géométrie et modèle mathématique

II.1 Introduction	(14)
II.2. Écoulement axisymétrique	(14)

Chapitre III : Méthode Numérique

III.1. Introduction	(20)
III.2 La méthode des volumes finis	(21)
III.3 Étapes de résolution par la méthode des volumes finis	(22)
III.3.1 Maillage	(22)
III.3.2 Discrétisation	(23)
III.4 Détails numériques utilisés dans ce travail	(25)
III.4.1 Choix de maillage	(25)
III.4.2 Fluent	(27)
III.5 Conclusion	(28)

Chapitre IV Résultats et discussion

IV.1 Introduction	(29)
IV.2. Les effets de nanoparticules dans l'eau sans champ magnétique	(30)
IV.3. Isolation électrique de toutes les parois (EI-parois)	(33)
IV.4. Conductivité électrique de toutes les parois (EC-parois)	(35)
IV.5 Comparaison	(37)
Conclusion générale	(40)
Bibliographique	(41)

Liste des figures

Chapitre I : Généralité et revues bibliographiques

Figure I.1.Echelle nano molécule (6)

Figure I.2 : Nano fluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% ;
eau + nanotube, eau + alumine, eau + or à 2nm(8)

Figure I.3 : Procèdes de synthèse de nano fluide en une seule étape(8)

Chapitre II : Géométrie et modèle mathématique

Figure II.1 : Géométrie à l'étude(16)

Chapitre III : Méthode Numérique

Figure III.1 : Schéma du volume de contrôle dans le cas bidimensionnel (22)

Figure III.2. Organigramme de l'algorithme SIMPLE (25)

Figure III.3. Maillage (80*160)(26)

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure IV.1. Comparaison avec (a) expérimental d'Escudier, (b) résultat numérique de
Sheikholeslami *et al*(30)

Figure IV.2 Fonction de courant (en haut) et les isothermes (au-dessous de) avec Nano
fluide Cu-eau (ligne pointillée) par rapport l'eau pur (ligne continue) à différent nombres de
Richardson(32)

Figure IV.3. Effet de nombre de Richardson sur le nombre de Nusselt moyen(33)

Figure IV.4. Fonction de courant pour le cas de (EI- Parois) lorsque
 $Ha=10$ et différent Ri (35)

Figure IV.5. Fonction de courant pour le cas de (EI- Parois) lorsque
 $Ri=0.2$ et différent Ha (35)

Figure IV.6. Effet de nombre de Hartmann sur (a) le nombre de Nusselt local et (b) nombre
de Nusselt moyen (35)

Figure IV.7. Fonction de courant pour le cas de (EC- Parois) lorsque Ha=10 et différent Ri	(37)
Figure IV.8. Fonction de courant pour le cas de (EC- Parois) lorsque Ri=0.2 et différent Ha	(37)
Figure IV.9. Effet de nombre de Hartmann sur le (a) nombre de Nusselt local et (b) nombre de Nusselt moyen	(37)
Figure IV.10. Cas de Ri=0,02 (a) nombre de Nusselt moyen ; (b) $\psi_{\max}$; (c) lignes de courant et (d) isothermes	(38)
Figure IV.11. Cas de Ri=0,2 (a) nombre de Nusselt moyen ; (b) $\psi_{\max}$; (c) Fonction de courant et (d) isothermes	(39)

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité et revues bibliographiques

Tableau I.1. Les propriétés thermo physiques des différents matériaux (7)

Chapitre II : Géométrie et modèle mathématique

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

[Sheikholeslami et al, 2014..... (15)

Tableau II.2 : Propriétés des nano fluides de Sheikholeslami et al. [2014], avec ϕ (fraction volumique), f (fluide) et p (phases solides) (15)

Tableau II.3 : Les conditions aux limites (18)

Tableau II.4 : Les conditions aux limites utilisées pour le potentiel électrique (19)

Chapitre III : Méthode Numérique

Tableau III.1 : schéma de discrétisation (27)

Tableau III.2 : les valeurs de sous relaxation (27)

Nomenclature

R : rayon de cylindre [m].

H : hauteur de cylindre [m].

T : Température [K].

T_c : Température de disque froid [K].

T_h : Température de disque chaud [K].

B : champ magnétique.

L_c : longueur caractéristique.

$\vec{e}_r, \vec{e}_z, \vec{e}_\theta$: Les vecteurs unitaires respectivement des directions radiales, axiales et azimutales

$f'_{Lr}, f'_{Lz}, f'_{L\theta}$: Les composantes de la force électromagnétique de Lorentz radiale, axiale et azimutale (N. m⁻³)

$F_{Lr}, F_{Lz}, F_{L\theta}$: Les forces de Lorentz adimensionnelles dans les directions radiale, axiale et azimutale

$\vec{j}$: Densité volumétrique de courant (A. m⁻³).

J_r, J_z, J_θ : Les courants électriques adimensionnels dans les directions radiales, axiales et azimutales

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

Re : nombre de Reynolds. $Re = \frac{\Omega R^2}{\nu}$

Ri : nombre de Richardson. $Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{\beta g (T_h - T_c)}{\Omega^2 R}$

Ha : nombre de Hartmann. $Ha = BR\sqrt{\sigma / \rho \nu}$

Gr : nombre de Grashof. $Gr = \frac{\beta (T_h - T_c) g R^3}{\nu^2}$

Ra : nombre de Rayleigh. $Ra = Pr.Gr$

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

$\overline{Nu}$: Nombre de Nusselt moyen $\overline{Nu} = 2 \int_0^1 Nu(r) r dr$

p : pression [Nm^{-2}].

t: Temps [s].

C_p : Chaleur spécifique à pression constante [$J.kg^{-1}.K^{-1}$].

Γ_ϕ : le coefficient de diffusion.

S_ϕ : le terme source.

K : la conductivité thermique [$w. m^{-1}. K^{-1}$].

V : volume [m^3].

m : la masse [kg].

Kr : paramètre de rotation.

V : vitesse axiale.

u, v, w : les composants de vitesse dans les directions radiale, axiale et azimutale.

Δx : variation de x. [m].

Δy : variation de y [m].

Symboles grecs :

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

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

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

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

ρ : Masse volumique [$kg. m^{-3}$]

ψ : Fonction de courant adimensionnelle.

ΔT : la différence de température.

θ : Température adimensionnelle.

Ω : vitesse angulaire

ϕ : fraction volumique.

ϕ : variable dépendante.

σ : conductivité électrique [$\Omega^{-1}.m^{-1}$]

Φ : Potentiel électrique adimensionnel

τ : Temps adimensionnel.

Les indices :

nf : nanofluide.

p : particule.

f : fluide de base.

max : maximale.

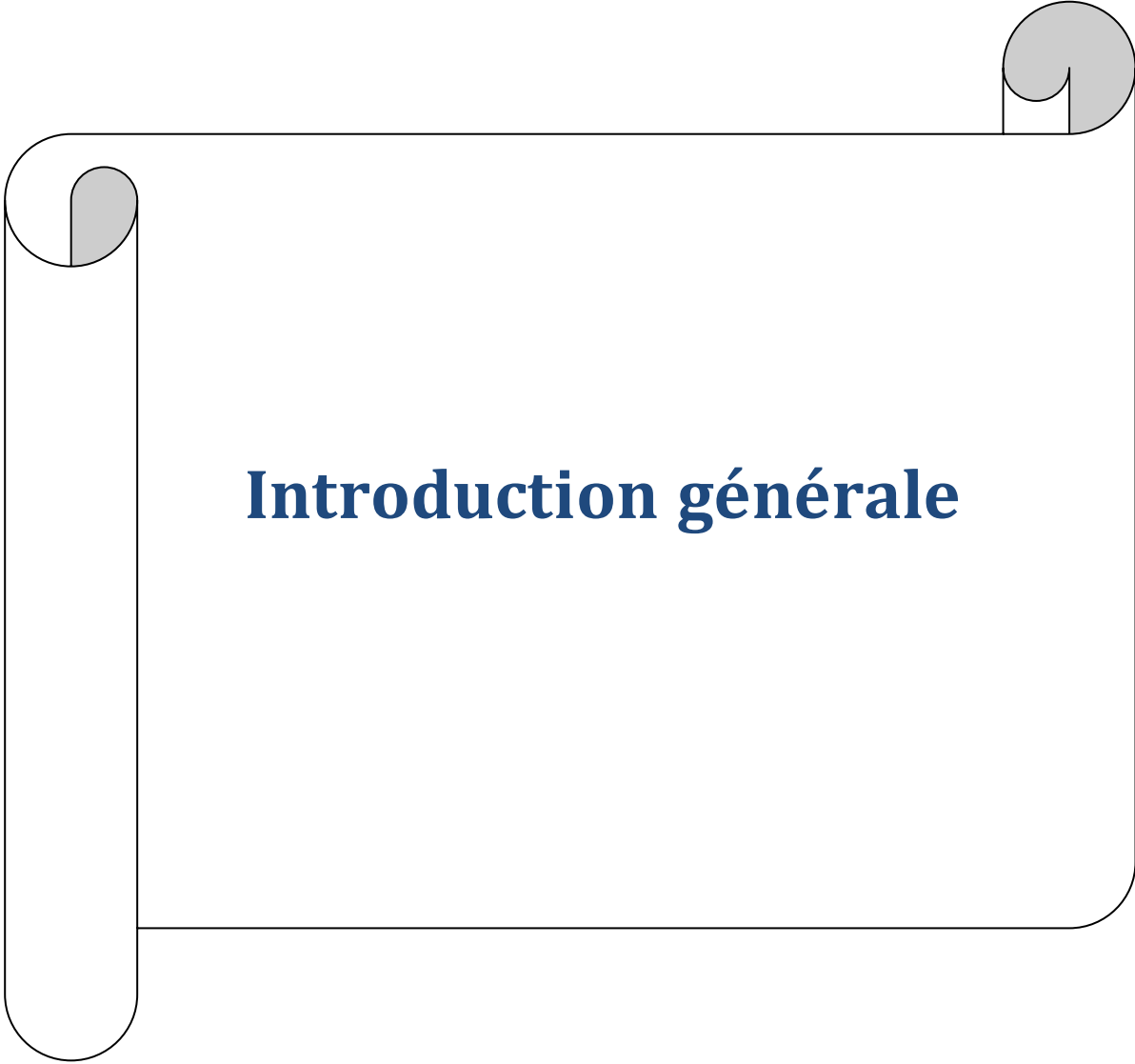
i : suivant la direction x.

j : suivant la direction y

P : Nœud considéré du maillage

E, W, N, S : Nœud considéré du côté Est, West, Nord, Sud, respectivement du nœud P

e, w, n, s : Les faces Est, West, Nord, Sud, respectivement du volume de contrôle considéré.



Introduction générale

Introduction générale

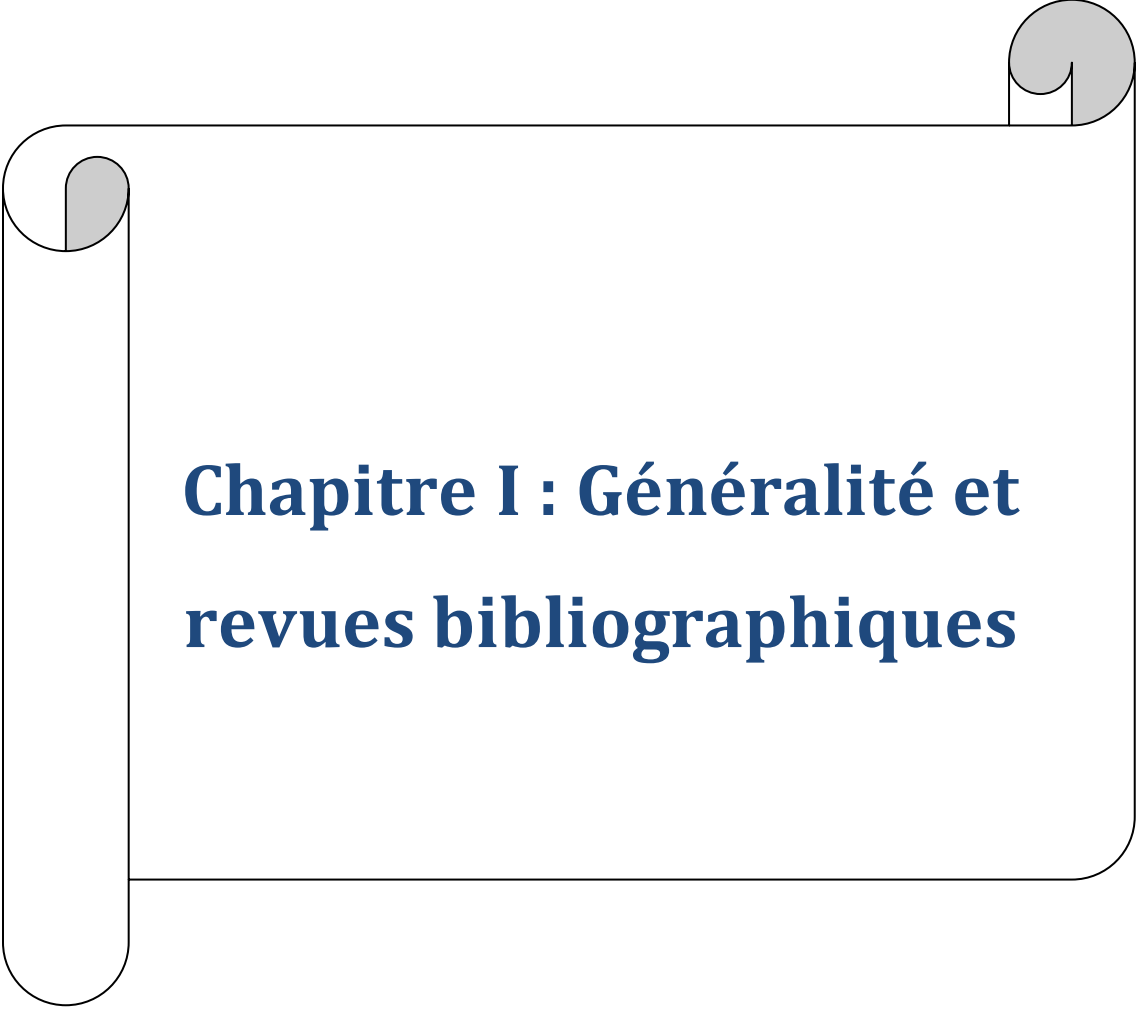
Le transfert de chaleur au sein des fluides conduit à de nombreuses applications pratiques et industrielles, bien qu'il se manifeste sous diverses formes (rayonnement, conduction, convection).

Le transfert de chaleur dépend principalement de la conductivité et la capacité thermique d'un fluide caloporteur. Avec les nano fluides, l'idée est alors d'insérer au sein de fluide de base des nanoparticules de conductivité thermique très élevée, afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange et ainsi améliorer ces performances. Ce terme nano fluide a été introduit par Choi Nano fluides pour les applications thermiques [1]. Le champ magnétique est aussi un paramètre de contrôle important pour le transfert de chaleur par convection dans les tuyaux, conduits et cavités [2].

Dans cette étude, on s'intéressera particulièrement à l'étude de transfert de chaleur dans une enceinte cylindrique remplie de nano fluide menu d'un mouvement de rotation par le disque en bas. Le nano fluide est chauffé par une source de chaleur qui se trouve en bas et sous l'effet sous champ magnétique vertical. La méthode des volumes finis est utilisée pour la discrétisation et la résolution des équations d'énergies par la méthode de volume finie

Cette présente étude est divisée en quatre chapitres organisés de la manière suivante :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les nano fluides, ainsi qu'une synthèse bibliographique des différents travaux publiés dans le domaine de transfert thermique dans les cavités.
- ✓ Le deuxième chapitre est consacré au modèle mathématique de la conductivité thermique, la viscosité dynamique et la chaleur spécifique avec la formulation mathématique du problème et les équations gouvernantes ainsi que les conditions aux limites, en situation bidimensionnelle (r-z).
- ✓ Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la méthode des volumes finis, sa mise en œuvre pour la discrétisation des équations du problème ainsi que le choix du maillage adéquat.
- ✓ Dans le chapitre quatre on rassemble la validation des résultats ainsi que les principaux résultats numériques de cette étude. Les commentaires, interprétations et analyses des divers résultats de cette étude paramétrique sont également présentés.
- ✓ Finalement nous terminons ce mémoire par une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and grey shaded rollers at the top-left, top-right, and bottom-left corners. The text is centered within the scroll's body.

Chapitre I : Généralité et revues bibliographiques

Chapitre I : Généralité et revues bibliographiques

Dans ce premier chapitre nous présentons : une généralité et l'historique sur la convection naturelle, les nano-fluides et aussi les effets du champ magnétique sur l'écoulement. A la fin de ce chapitre quelques définitions.

I.1 Généralité :

Le transfert de chaleur est une discipline riche en phénomènes physiques et en applications pratiques dans notre vie de tous les jours. Il peut être défini comme l'énergie thermique en transit à cause d'une différence de température. On peut observer les phénomènes de transfert de chaleur aussi bien dans des situations industrielles (fours, réacteurs, échangeurs de chaleur, colonnes à distiller, chambres froides, presses à injection, coulée des métaux...) que dans notre vie quotidienne (le chauffage et l'isolation de la maison, la cuisson des aliments, les vêtements d'hiver et le facteur de refroidissement éolien, le coup de soleil sur la plage ! ...).

Les nano-fluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide. Leurs propriétés thermiques étonnantes en ont fait l'objet d'intenses investigations durant la dernière décennie. Le développement des recherches traitant les nano-fluides a pour but d'améliorer de façon appréciable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pur une faible concentration de nanoparticules (taille inférieure à 100nm). Plusieurs études ont été réalisées sur la convection naturelle des nano-fluides.

En appliquant un champ magnétique externe, on peut agir sur le flux sans contact physique, éliminant ainsi les fluctuations, contrôlant les transferts de chaleur et de masse, améliorant ainsi la qualité du cristal. À cette fin, les gradients de température sont devenus un moyen privilégié et ont fait l'objet de plusieurs applications industrielles.

I.2 Revues bibliographiques :

Nous présentons dans cette partie l'historique des études théoriques et expérimentales portant sur les nano fluides depuis leur découverte jusqu'à nos jours.

Les premiers travaux traitant le transfert de chaleur en présence des nanoparticules ont pratiquement commencé en 1995 avec l'étude de **Choi** [3], qui a permis plus tard de déterminer les propriétés thermo physiques des nano fluides. Choi a trouvé que la conductivité thermique effective du mélange eau- Al_2O_3 augmente de pour une concentration en volume entre 1% et 5% de Al_2O_3 . Par la suite de nombreuses études expérimentales et numériques ont menées par plusieurs chercheurs pour comprendre et analyser le comportement thermo hydraulique des nano fluides, ces études peuvent être classées en trois catégories selon le type de matière de nanoparticules. L'idée est alors d'introduire au sein de fluide, des particules de taille nanométrique pour espérer augmenter la conductivité thermique effective du mélange. Plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour l'obtention de nano fluide à base nanoparticules.

Cheikh et **autres** [4] ont étudié la convection naturelle dans une enceinte carrée passionnée d'en bas et refroidi d'en haut pour un grand choix d'états de frontière thermiques au-dessus et aux parois latérales. Ils ont effectué leur simulation pour deux longueurs différentes de la source de chaleur et des divers nombres de Rayleigh.

Plusieurs recherches en matière de transfert de chaleur ont été menées au cours des précédentes décennies au développement des nouvelles techniques d'améliorations des performances de transfert par l'utilisation des additifs métalliques ou non métalliques aux fluides de base pour augmenter leur conductivité thermique [5].

Afin de prédire la conductivité thermique de nano-fluides, de nombreux modèles théoriques ont été développés récemment. Cependant, il existe toujours une controverse sur l'interprétation de l'amélioration de la conductivité thermique des nano-fluides. Ainsi, aucun des modèles théoriques développé ne peut complètement expliquer l'amélioration de conductivité thermique dans les nano-fluides. D'autre part, certains chercheurs ont rapporté des données expérimentales de la conductivité thermique qui est compatible avec les prédictions des modèles classiques (comme le modèle de **Hamilton** et **Crosser** [6]). Pour les travaux de recherche portant sur le transfert de chaleur et les propriétés des nano fluides, il faut se référer aux études **d'Eastman** et al. [7], **Maïga** et al. [8] et **Wang** et **Mujumdar** [9].

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

Khanafer et **al.** [10] ont étudié numériquement la convection naturelle d'un nanofluide confiné dans une enceinte différentiellement chauffée. Les résultats ont montré que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.

Jou et **Tzeng** [11] ont adopté le modèle de Khanafer pour mener une étude numérique de la convection naturelle des nano-fluides dans une enceinte rectangulaire. Ils ont démontré que l'augmentation de la fraction volumique améliore le transfert thermique.

Une étude numérique de la convection naturelle dans les enceintes rectangulaires partiellement chauffées a été effectuée par **Oztop** et **Abu- Nada** [12].

Différents types de nanoparticules ont été testés. Il a été constaté que la position de la source de chaleur affecte les champs thermiques et dynamiques et l'amélioration du transfert de chaleur est très importante lorsque l'enceinte présente un faible rapport de forme. Malgré l'abondance des travaux dans le domaine de la convection naturelle des nano-fluides, la plupart de ces travaux se sont limités aux cas de cavités sans partition et très peu de recherches ont été faites en utilisant les nano-fluides dans des cavités partitionnées.

Wen et **al.** [13] ont adopté une procédure expérimentale similaire dans un tube circulaire chauffé uniformément, mais avec des nanoparticules de trioxyde d'aluminium (Al_2O_3) de 27-56 nm de diamètre. L'utilisation du nanofluide a augmenté significativement le coefficient de transfert de chaleur en régime laminaire.

Heris et **al.** [14] ont examiné des nanoparticules d'oxyde de cuivre (Cu) et de trioxyde d'aluminium (Al_2O_3), dispersés à différentes concentrations dans l'eau. L'ensemble constituant un nanofluide est testé en écoulement convectif laminaire dans un tube circulaire horizontal maintenu à température constante, Les résultats expérimentaux ont montré que l'augmentation du coefficient de transfert convectif est plus importante pour le mélange (eau/ Al_2O_3) que celui du mélange (eau/Cu) et ceci est plus significatif pour les grandes concentrations volumiques en nanoparticules, et pour un optimum compris entre 2.5 et 3 %.

Behzadmehr et **al** [15] ont étudié la convection forcée turbulente dans un tube circulaire, utilisant de l'eau à 1% de nanoparticules cuivre (Cu) Ils ont démontré que

l'augmentation du nombre de Reynolds engendré la croissance de la valeur du nombre de Nusselt.

Apurba et al. [16] ont étudié l'effet du nanofluide sur un écoulement en régime laminaire dans une conduite rectangulaire horizontale bidimensionnelle chauffé à deux extrémités haut et bas, Ils ont démontré que l'augmentation du nombre de Reynolds et de la fraction volumique améliore le transfert thermique.

Oztop et al. [17] ont étudié l'effet d'employer différents nano-fluides sur la distribution du champ des températures dans une enceinte remplie d'un mélange d'eau et de nanofluide. Ils ont démontré que l'augmentation de la valeur du nombre de Rayleigh, la taille de réchauffeur et la fraction volumique des nano-fluides améliorent le transfert thermique.

Xuan et Li (2000) [18] ont présenté une procédure de préparation d'un nano fluide qui est une suspension composée de poudres nano phase et d'un liquide de base. Au moyen de la procédure, certains échantillons de nano fluides sont préparés. Leurs photographies TEM sont données pour illustrer la stabilité et la régularité de la suspension. L'étude théorique de la conductivité thermique des nano fluides est introduite. L'appareil à fil chaud a été utilisé pour mesurer la conductivité thermique de nano fluides avec des poudres de cuivre en suspension.

Bhattad et al (2017) [19] ont résumé des recherches sur la préparation et la caractérisation des nano fluides, diverses propriétés thermo physiques et électriques (densité, capacité thermique, viscosité, conductivité thermique, tension superficielle, conductivité électrique, caractéristiques de congélation, etc.) des nano fluides. Les applications des nano fluides dans les systèmes de réfrigération en tant que réfrigérant, lubrifiant et fluide secondaire sont bien regroupées et discutées. Enfin, les défis et les opportunités de recherche future sont identifiés, ce qui sera utile pour les nouveaux arrivants et les fabricants dans ce domaine.

I.3 Les définitions :

I.3.1 Nano fluide :

Les nano fluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés. L'idée d'améliorer les propriétés thermiques de fluides par l'adjonction de particules n'est pas nouvelle, mais l'utilisation de particules de taille nanométrique permet potentiellement de minimiser considérablement les problèmes d'érosion et de sédimentation rencontrés avec les particules de taille plus élevée.

❖ Nanoparticules :

Les nanoparticules, également appelées particules ultrafines (PUF), sont des molécules dont la taille varie entre 1 et 100 nanomètres ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}=0,000000001\text{m}$). Elles sont donc plus grandes que des atomes et plus petites qu'une cellule.

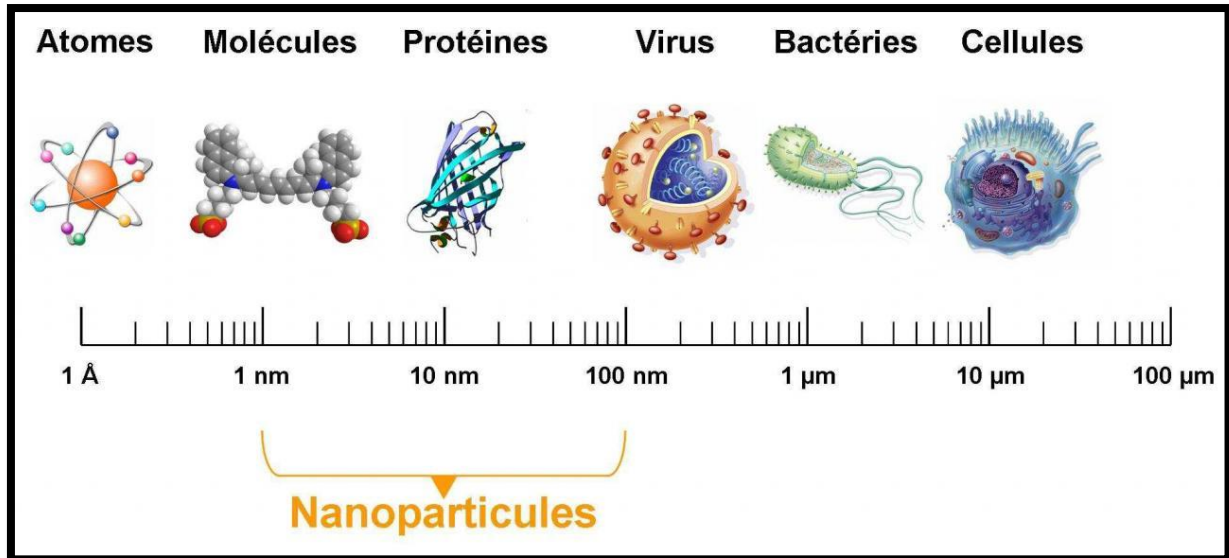


Figure I.1.Echelle nano molécule

Les nanoparticules ont de nombreux procédés de préparation qui peuvent être classés en deux catégories :

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

Les nanoparticules les plus utilisés pour obtenir des nano fluides sont :

➤ Les nanoparticules des oxydes métalliques

L'oxyde de l'aluminium (Al_2O_3)

L'oxyde de cuivre (CuO)

L'oxyde de silicium (SiO_2)

L'oxyde de titane (TiO_2)

➤ Les nanoparticules métalliques

L'aluminium (Al)

Le cuivre (Cu)

L'or (Ag)

➤ Les nanoparticules non métalliques

Le nanotube de carbone (CNT), Le diamante (C)

Les fluides de frigérations (R12, R22)

	Nanoparticule et fluide de base	K (W /m K)	ρ (Kg/m ³)	Cp (J/ Kg K)	μ (Pa. s)
Métallique (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80,2	7870	447	
	Ni	90,7	8900	444	
	Au	317	19,300	129	
	Ag	429	10,500	235	
	C (diamant)	2300	3500	509	
Oxyde Métallique (solides)	SiO ₂	1,38	2220	745	
	TiO ₂	8,4	4157	710	
	Al ₂ O ₃	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
Liquides non métallique	L'eau	0,613	1000	4183	0,0008
	Ethylène glycol (EG)	0,258	1132	2349	513 0,0157

Tableau I.1. Les propriétés thermo physiques des différents matériaux

En outre, les fluides de base connus en littératures sont :

- L'eau :
- L'éthylène et le propylène glycol.
- Les huiles et autres lubrifiants.
- Le toluène.
- Les bois-fluides.

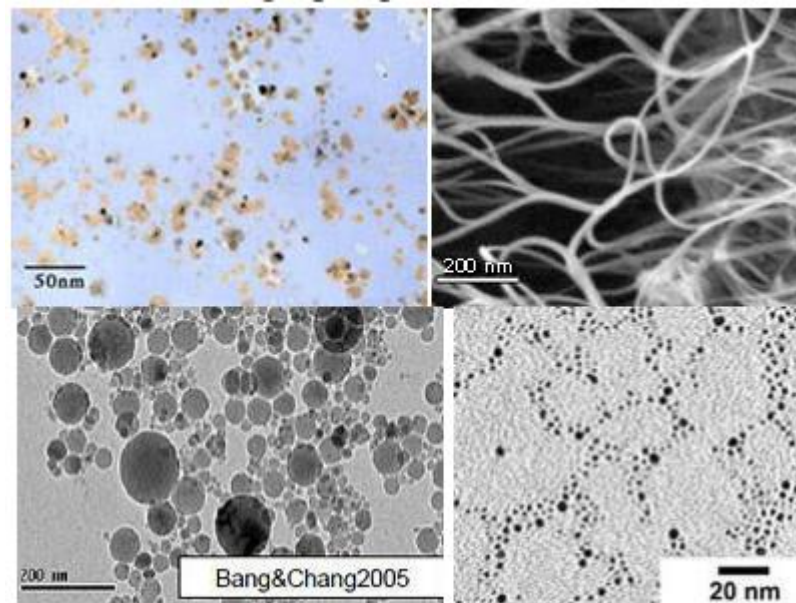


Figure I.2 : Nano fluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% ; eau + nanotube, eau + alumine, eau + or à 2nm [20]

I.3.1.1 Préparations des nano fluides :

Il existe deux méthodes principales pour produire des nano fluides :

✓ La méthode en une seule étape :

Consiste à la dispersion des nanoparticules directement dans un fluide de base (synthèse directe dans un fluide de base).

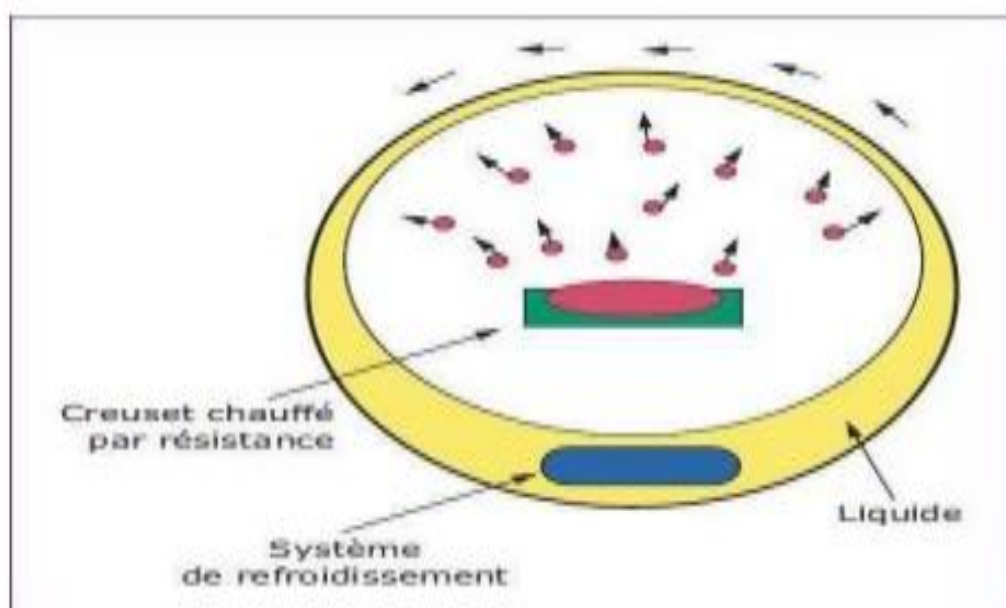


Figure I.3 : Procèdes de synthèse de nano fluide en une seule étape [21]

✓ La méthode en deux étapes :

La première étape consiste à fabriquer les nanoparticules, et dans la seconde étape les nanoparticules sont dispersées dans un fluide de base.

Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de recherche pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en œuvre et pour obtenir des particules de taille voulue. Chaque méthode a ses inconvénients et certaines ne sont pas aptes à produire de grandes quantités de nanoparticules pour une production de masse vu les contraintes inhérentes aux procédés, notamment les méthodes en une étape.

• Les procédés physiques :

La méthode la plus simple consiste à subdiviser un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique. Toutefois, cette méthode présente d'importantes limitations car elle ne permet pas un contrôle précis des distributions de taille. Afin d'obtenir un meilleur contrôle de la taille et de la morphologie comme le broyage mécanique.

• Les procédés chimiques :

Aujourd'hui un grand nombre de méthodes de synthèse par voie chimique sont disponibles et présente l'avantage d'être en général simple à mettre en œuvre et d'être souvent quantitatives et peu coûteuses. Ces méthodes permettent d'obtenir des particules avec une distribution de tailles relative étroite et de morphologies variées comme la pyrolyse laser ou la précipitation chimique.

I.3.1.2 Application des nano fluides :

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications.

- Pour leurs propriétés magnétiques (paliers magnétiques à ferro-fluides, agents de contraste en imagerie médicale).
- Pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électro-mouillage pour lentilles liquides), et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules fonctionnalisées...
- En thermique, les nano fluides peuvent être utilisés partout, où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées :

refroidissement de composants électriques et électroniques, radars, transport (gestion de refroidissement/véhicule moteur thermique), espace, refroidissement des systèmes nucléaires, l'échangeur de chaleur, le chauffage solaire de l'eau, réfrigérateur domestiques, forage, lubrifiants, stockage thermique, etc.

Les nano fluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance

I.3.1.3 les avantages des nano fluides :

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominance du mouvement Brownien des particules.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux boues conventionnelles.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de [particule en fonction des différentes applications.

I.3.1.4 les inconvénients des nano fluides :

- Chute de pression accrue et la puissance de pompage.
- Viscosité supérieure, chaleur spécifique basse.
- Le coût élevé des nano fluides.
- Difficultés dans le processus de production.
- Stabilité des nanoparticules dispersion.

I.3.2 la convection :

La convection est un mode de transfert d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu, qui implique le déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides ou lorsqu'un fluide circule autour d'un solide. Lors de la convection les mouvements se produisent en général de manière spontanée sous l'effet d'une différence de température entre les zones d'un fluide. En effet, la densité d'une substance dépend de sa température. L'énergie est à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

I.3.2.1. La convection naturelle :

La convection naturelle apparaît spontanément, sous le seul effet. La différence de température ou de concentration engendre des différences de masse volumique sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

I.3.2.2 La convection forcée :

Le phénomène de convection forcée apparaît quand le mouvement du fluide est provoqué par une circulation artificielle (pompe, turbine...).

I.3.2.3 La convection mixte :

Couplage des deux phénomènes quand les vitesses d'écoulement fictives, dues aux deux types de convection, sont considérées séparément comme étant du même ordre de grandeur.

I.4 L'utilisation des nanofluides : [22]**I.4.1 Comment un nano fluide peut-il améliorer le transfert thermique :**

Pour améliorer les performances, il est nécessaire de réduire au maximum l'épaisseur de la couche limite et de l'empêcher de se développer à sa guise. Pour cela, on augmente la vitesse du fluide (passages étroits, jets d'eau...) ou bien on dispose des petits obstacles (picots, aspérités...) pour augmenter le brassage au niveau de la paroi notamment. Tout ça pour la contrarier autant que possible et repousser le fluide froid le plus près possible de la paroi chaude pour augmenter l'échange (diminution de l'épaisseur de la couche limite thermique).

En raison de leur conductivité thermique plus élevée, les nanofluides améliorent directement l'énergie thermique est transférée par conduction à travers le substrat visqueux.

Les nanoparticules peuvent considérablement modifier le comportement rhéologique des liquides. En adoptant un agencement structural spécifique dans la couche limite. Selon sa nature et forme, un comportement de fluidification par cisaillement peut être observé (en augmentation du taux de cisaillement) dans le but de réduire la viscosité apparente tout en près du mur (effet lubrifiant). Cette diminution de la viscosité entraîne l'épaisseur de la couche limite dynamique et l'épaisseur de la couche limite thermique. S'avérer là encore, le coefficient d'échange de la paroi est directement augmenté.

I.4.2 Quels phénomènes principaux sont candidats pour expliquer ces améliorations :

I.4.2.1 Le mouvement brownien et la micro-convection :

Le mouvement brownien des nanoparticules en suspension est la manifestation de leurs déplacements constants et aléatoires au sein du nano fluide. Ils sont causés par les incessantes collisions avec les molécules du liquide qui se déplacent dans toutes les directions sous l'effet de l'excitation thermique (la température du milieu est l'image de cette agitation). Les nanoparticules sont suffisamment petites pour être poussées par les chocs reçus et elles peuvent alors parcourir une certaine distance (très petite), avant de repartir dans une autre direction suite à de nouveaux chocs et ainsi de suite. Il en résulte un mouvement d'ensemble chaotique que l'on appelle le mouvement brownien.

Plus les nanoparticules seront grosses, plus ce mouvement brownien sera faible, car elles seront plus difficiles à bouger du fait d'une inertie plus importante et elles auront une vitesse de déplacement plus faible. Ce mouvement brownien rend aussi les nano fluide plus sensibles à la température que les fluides normaux. Plus la température est importante, plus l'agitation moléculaire est intense et plus les nanoparticules sont chahutées, améliorant sautamment plus la micro convection et donc la conductivité thermique du nano fluide.

I.4.2.2 Le principe thermophorèse

La thermophorèse, autre phénomène convectif lié au mouvement brownien, peut entrer en ligne de compte, même si son influence est limitée dans les applications à faible différentiel de température. Son intérêt se situe au voisinage d'une paroi chauffée ou dans des régions à fort gradient de température.

Au voisinage d'une nanoparticules, cette action de thermophorese engendre l'apparition d'une force dans une direction préférentielle, qui résulte du déséquilibre des chocs avec les molécules du liquide. Près d'une paroi dissipant une certaine quantité chaleur, le fluide est naturellement plus chaud, donc les molécules de liquide sont plus excitées thermiquement avec pour conséquence d'avoir une plus grande vitesse que celles présentes du cotes froid. Les nanoparticules sont donc poussées plus fortement par les molécules de la cote chaude à cause de la différence de quantité de mouvement. Cela les emmène automatiquement vers les régions plus froides, favorisant une fois de plus l'homogénéisation de température.

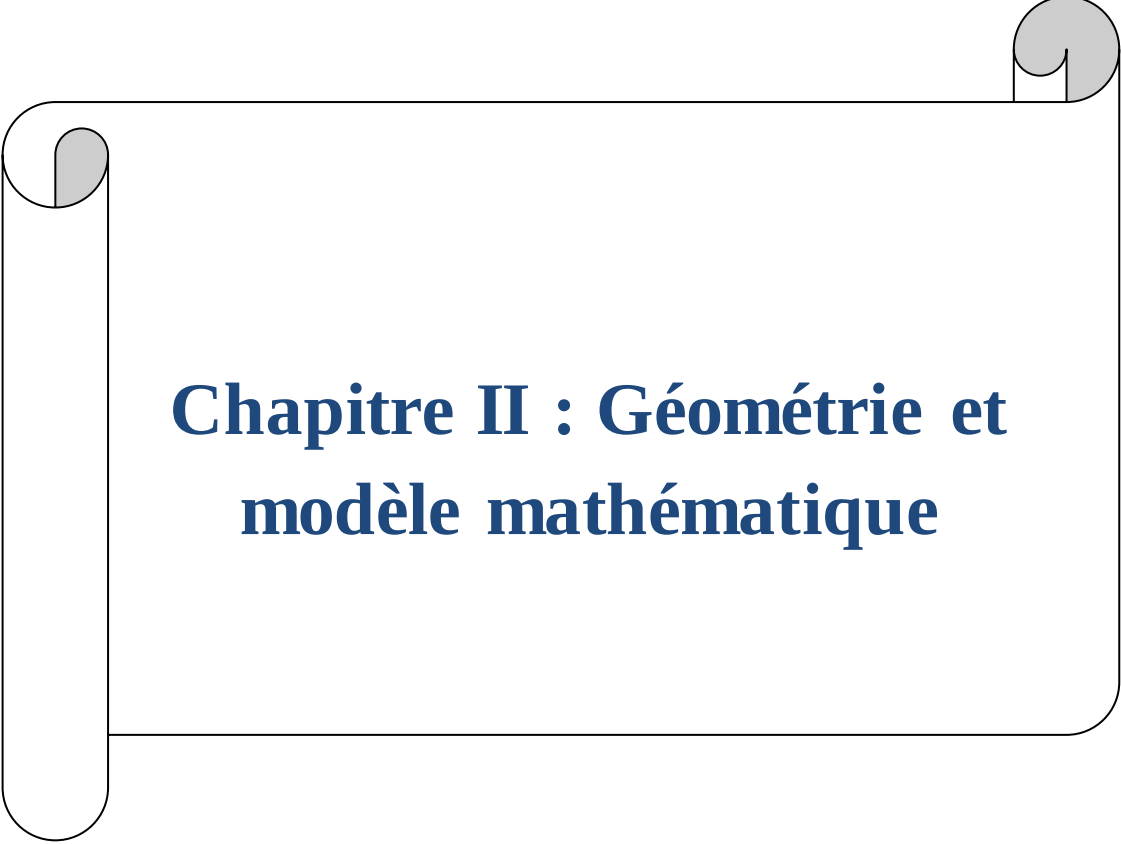
I.4.2.3 Les phonons balistiques transfèrent de la chaleur :

La nature du transport de chaleur dans les nanoparticules est l'un des principaux effets pouvant jouer un rôle dans l'amélioration observée. En effet, l'effet de taille affecte souvent la conduction thermique. Dans les structures de dimensions supérieures à quelques centaines de nanomètres, le transport de chaleur est contrôlé par un processus dit « diffusif » mesurable à l'aide de transformées de Fourier, mais ce n'est pas plus efficace sur de très petites échelles de longueur et de temps.

I.4.2.4 Couche inter-faciale nanoparticule-liquide

Selon des études récentes, un phénomène de surface pourrait contribuer à améliorer la conductivité thermique. Il est reconnu qu'à l'interface entre un liquide et une surface solide, il se forme une couche de liquide qui, contrairement aux molécules libres de ce liquide (qui se lient et se délient $\sim 10^{11}$ fois par seconde entre elles plus précisément), a tendance à s'organiser en couches atomiques plus ou moins ordonnées. Une nanoparticule se voit alors entièrement entourée d'une nano couche compacte de liquide de l'ordre du nanomètre d'épaisseur a priori.

Le nanofluide se révèle être une collection de trois structures : une collection complète solides avec des nanoparticules, semi-solides avec des couches de nanoeau et intacts liquide avec fluide de base. Cette nanocouche agira comme un pont thermique entre les deux particules et liquides, qui peuvent être l'un des facteurs expliquant l'augmentation conductivité thermique générale. La chaleur contenue dans les nanoparticules peut être échangée avec cette nano couche directement par conduction. Comme on peut le voir Auparavant, on pensait qu'il pouvait également être utilisé pour échanger Dans une nanoparticule à travers cette nano coquille directement d'une nanoparticule à l'autre collision.



Chapitre II : Géométrie et modèle mathématique

Chapitre II : Géométrie et modèle mathématique

II.1 Introduction :

Chaque écoulement est décrit par le champ d'écoulement (composantes de la vitesse), le champ thermique, la distribution de pression et les propriétés locales de fluide. Ces variables sont gouvernées par des lois fondamentales sous forme d'équations mathématiques. En général, ces équations sont : l'équation de continuité qui traduit le principe de conservation de masse, les équations de Navier-Stokes qui traduisent le principe de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie qui représente le principe de conservation de l'énergie.

La solution de cet ensemble des équations gouvernantes dépend des valeurs de plusieurs groupes adimensionnels. Parmi ces groupes nous distinguons les nombres : Rayleigh, Richardson, Prandtl, Reynolds, Nusselt et d'autres nombres adimensionnels figurés par plusieurs propriétés physiques dépend de la température.

II.2 Écoulement axisymétrique :

La géométrie de la configuration considérée (Fig.II.1) est une enceinte cylindrique de rayon R et de hauteur H , dont le rapport d'aspect fixe ($\gamma = H/R = 2$). L'enceinte contient de nanofluide (cuivre-eau) (table II.1). Le couvercle (disque inférieur) est en rotation à la vitesse angulaire constante Ω et maintenu à la température T_c , l'autre extrémité (disque supérieur) est fixe et maintenu à la température T_h , ($T_h > T_c$). La paroi latérale rigide est adiabatique. L'ensemble peut être soumis à un champ magnétique B de magnitude constante, uniforme et orienté verticalement vers le haut. Nous avons traité deux cas :

- 1-Les parois de l'enceinte cylindrique sont électriquement isolantes (CI-parois).
- 2-Les parois de l'enceinte cylindrique sont électriquement conductrices (CE-parois).

La figure II.1 montre le schéma d'une enceinte cylindrique de rayons (R) et de hauteur (H), qui possèdent un rapport $H/R=2$. Un nano fluide tourbillonnant électriquement conducteur est avancé par un couvercle inférieur entraîné. Le nano fluide (Cu-eau) exploité dans cette étude est supposé incompressible, newtonien, dans lequel la dissipation visqueuse est négligée et de même pour le transfert de chaleur radiatif. Les particules sphériques solides de cuivre (Cu) ont un équilibre thermique parfait avec le fluide de base (l'eau). Le modèle proposé de nano fluide Tiwari-Das (Aghamajidia et al, 2018) [23] pour la magnétohydrodynamique (MHD) est utilisé dans cette étude.

Les propriétés thermo physiques sont prises constantes, la dépendance de la densité à la température est traitée selon l'approximation de Boussinesq (Tableau.II.1-II.2). L'écoulement de nano fluide tourbillonnant en régime permanent a été analysé en présence d'un gradient thermique vertical et d'un champ magnétique externe B_0 agissant dans la direction axiale. Le couvercle inférieur froid tourne à une vitesse angulaire Ω (constante), tandis que le disque supérieur chaud et la paroi latérale (isolée thermiquement) sont fixes. La dissipation visqueuse et l'échauffement Joule dans l'équation d'énergie sont négligés. Le rapport entre l'induction et la diffusion magnétique est mesuré par le Reynolds magnétique $Re_m = \mu_0 \sigma \Omega R^2$ qui est bien inférieur à l'unité. Dans ce cas, le principal mécanisme responsable de l'amortissement du nano fluide est le champ magnétique appliqué et l'interaction du champ magnétique induit peut-être négligée.

	C_p (J.kg ⁻¹ . k ⁻¹)	K (W.m ⁻¹ . k ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	β (k ⁻¹)	σ (Ω . m) ⁻¹
Cu (Cuivre)	385	401	8933	1.67	5.96×10^7
H ₂ O (eau pure)	4179	0.613	997.1	20×10^{-5}	0.05

Tableau II.1 : Propriétés de l'eau et des nanoparticules de cuivre [Sheikholeslami et al, 2014]

Propriété thermos physique	Relation
Densité	$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p$
Viscosité dynamique	$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}}$
Capacité thermique	$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p$
Coefficient de dilatation	$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p$
Diffusivité	$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho C_p)_{nf}$
Conductivité téthermique	$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_f + 2k_p) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right]$
Conductivité électrique	$\sigma_{nf} = \sigma_f \left[1 + \frac{3(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 1)\phi}{(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} + 2) + \phi(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 1)} \right]$

Tableau II.2 : Propriétés des nano fluides de Sheikholeslami et al. [2014], avec ϕ (fraction volumique), f (fluide) et p (phases solides).

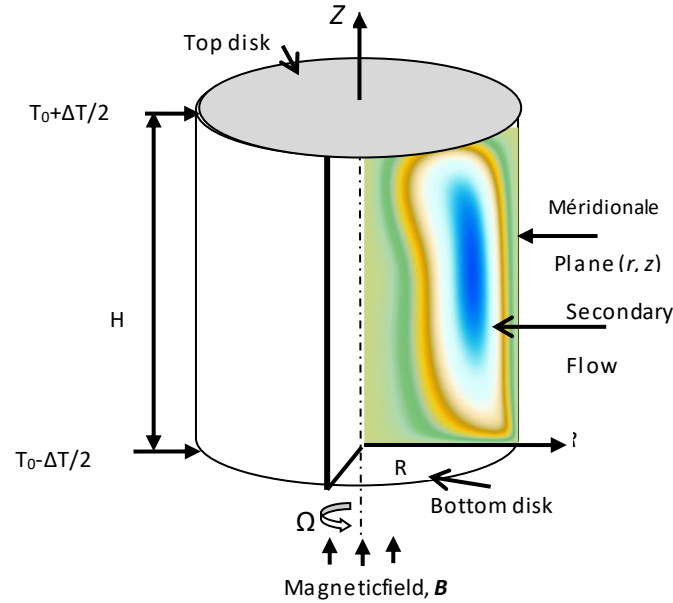


Figure II.1 : Géométrie à l'étude.

Dans ce problème défini par le repère cylindrique (r, θ, z) , ce repère alternatif est sous l'hypothèse d'axisymétrie ($\partial/\partial\theta=0$). La forme sans dimension des équations de convection mixte MHD est implémentée via la variante suivante : Temps $(1/\tau)$, R pour la longueur, (ΩR) pour les vitesses, la pression est obtenue par $\rho n f (\Omega R)^2$, température, $\Theta = (T - T_0) / \Delta T$ et potentiel électrique, $B_0 \Omega R^2$. Cependant, il convient de mentionner que seul le flux permanent est considéré. Avec les hypothèses ci-dessus, les équations simplifiées sans dimension pour l'écoulement tourbillonnant du nano fluide peuvent être écrites comme suit :

Équation de continuité :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Équations de quantité de mouvement (pour r et z) :

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{u^2}{r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{\text{Re}_f} \left(\frac{\mu_{nf} \rho_f}{\mu_f \rho_{nf}} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right) + N_f \left(\frac{\sigma_{nf} \rho_f}{\sigma_f \rho_{nf}} \right) F_{Lr} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}_f} \left(\frac{\mu_{nf} \rho_f}{\mu_f \rho_{nf}} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \text{Ri}_f \left(\frac{(\rho \beta)_{nf}}{\beta_f \rho_{nf}} \right) \cdot \Theta + N_f \left(\frac{\sigma_{nf} \rho_f}{\sigma_f \rho_{nf}} \right) F_{Lz} \quad (3)$$

Équation de tourbillon :

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial r} + v \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{uw}{r} = \frac{1}{\text{Re}_f} \left(\frac{\mu_{nf} \rho_f}{\mu_f \rho_{nf}} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{w}{r^2} \right) + N_f \left(\frac{\sigma_{nf} \rho_f}{\sigma_f \rho_{nf}} \right) F_{L\theta} \quad (4)$$

Équation énergétique :

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \Theta}{\partial r} + v \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}_f \cdot \text{Pr}_f} \left(\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

L'interaction du champ magnétique appliqué avec le flux tourbillonnant du nano fluide induit la densité de courant électrique J , donnée par la loi d'Ohm sous la forme $\mathbf{J} = \sigma_{nf} (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$, où $\mathbf{V}$ est le vecteur vitesse (u, w, v), $\mathbf{E}$ est le champ électrique et le champ magnétique appliqué est $\mathbf{B}(0, 0, \mathbf{B}_0)$. L'écoulement tourbillonnant du nano fluide MHD considéré ici peut être facilement vérifié par la relation $\nabla(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) = 0$; à partir de laquelle, la conservation des charges électriques devient $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$. La loi de Faraday pour le champ magnétique donne $\nabla \times \mathbf{E} = 0$, ce qui signifie que le potentiel électrique est $\mathbf{E} = -\nabla \Phi$. En conséquence, l'équation de Laplace pour le potentiel électrique devient :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{w}{r} + \frac{\partial w}{\partial r} \quad (6)$$

L'hypothèse d'un champ magnétique constant et homogène imposé verticalement au cylindre indique que la force de Lorentz n'est fonction que de r et θ . Elles peuvent être trouvées par : $\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$, les forces de Lorentz sans dimension dans les directions r, z et θ sont respectivement :

$$\begin{cases} F_{Lr} = -u & (\text{radial}) \\ F_{Lz} = 0 & (\text{axial}) \\ F_{L\theta} = \frac{\partial \Phi}{\partial r} - w & (\text{azimuthal}) \end{cases} \quad (7)$$

Le nombre de Reynolds (Ref), le nombre de Richardson (Rif), le nombre de Hartmann Haf et le paramètre d'interaction (Nf) sont les paramètres sans dimension caractérisant cet écoulement nano fluide tourbillonnant, qui s'expriment par :

$$\left\{ \begin{array}{l} Re_f = \frac{\Omega R^2}{\nu_f} \\ Ri_f = \beta_f g \Delta T / \Omega^2 R \\ N_f = \frac{Ha_f^2}{Re_f} \\ Ha_f = BR \sqrt{\sigma_f / \rho_f \nu_f} \end{array} \right. \quad (8)$$

Un autre paramètre qui contrôle la structure de l'écoulement est la conductivité électrique du mur à ce point, il est important de mentionner que deux cas d'isolant et de conducteur électrique sont considérés dans cette étude.

La condition aux limites axisymétrique est spécifiée le long de l'axe $r=0$ de la cavité cylindrique (Tableau.II.3). L'écoulement tourbillonnaire laminaire peut s'étendre d'un régime permanent à un régime périodique instable. Cela justifie le terme transitoire dans les équations (2-5). Le nano fluide est au repos à $\tau = 0$, et la marche temporelle continuera jusqu'à ce que les conditions de convergence soient satisfaites. A noter que les conditions aux limites correspondant au potentiel électrique sont résumées dans le tableau II.4.

Boundary	Radial velocity	Axial velocity	Azimuthal velocity	Temperature	Electric potential
$r=0, 0 \leq z \leq 2$	$u = 0.$	$\partial v / \partial r = 0.$	$w = 0.$	$\partial \theta / \partial r = 0$	Table 4
$r=1, 0 \leq z \leq 2$	$u = 0.$	$v = 0.$	$w = 0.$	$\partial \theta / \partial r = 0$	Table 4
$z=0, 0 \leq r \leq 1$	$u = 0.$	$v = 0.$	$w = r$	$\theta = -0.5$	Table 4
$z=2, 0 \leq r \leq 1$	$u = 0.$	$v = 0.$	$w = 0.$	$\theta = 0.5$	Table 4

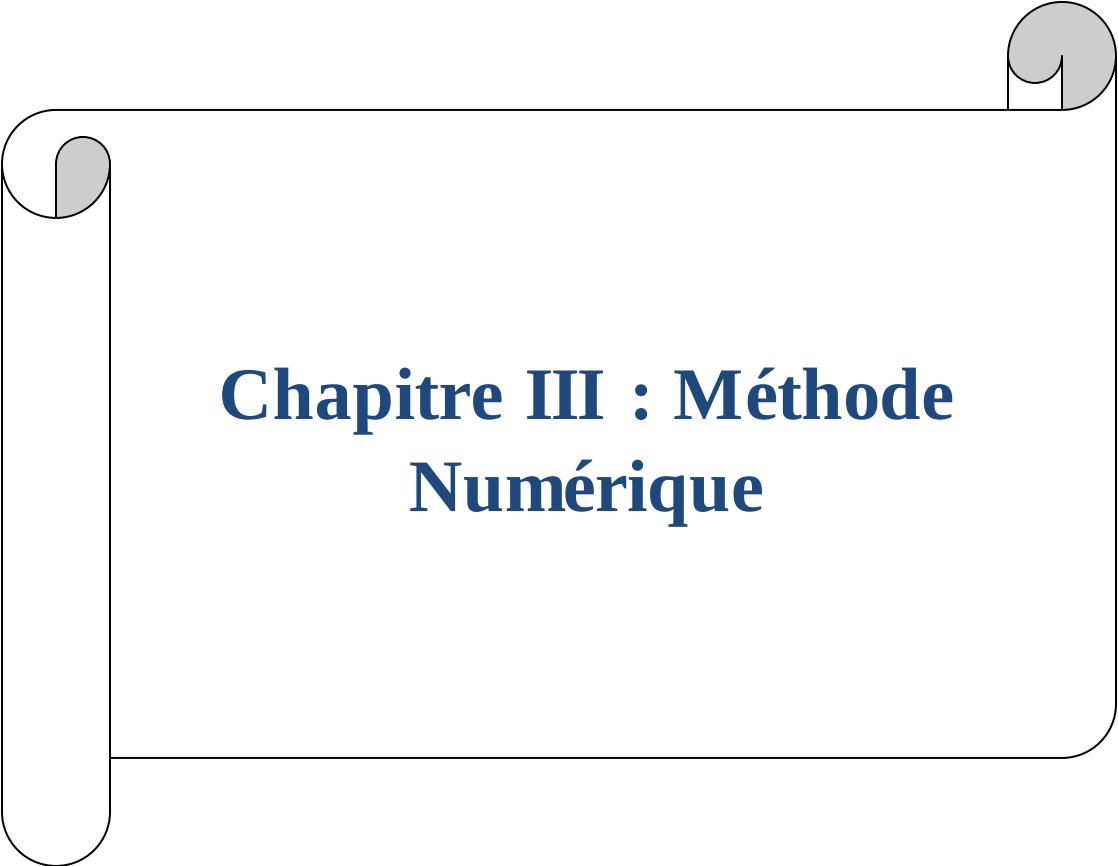
Tableau II.3 : Les conditions aux limites

La dérivée du potentiel électrique le long de la normale (c'est-à-dire $\partial \Phi / \partial n = 0$) est identiquement nulle pour le cas où toutes les parois sont électriquement isolantes. Ainsi, la solution unique de la relation $\nabla^2 \Phi = 0$ est directement $\nabla \Phi = 0$. Il s'ensuit donc que la composante normale du courant électrique à la frontière s'annule partout. Lorsque la paroi est parfaitement conductrice, le courant électrique dans la direction tangentielle est identiquement nul à l'interface entre le fluide et la paroi. Lorsque le couvercle rotatif est électriquement

conducteur, la couche Hartmann est supprimée, un gradient de potentiel se forme également dans la direction radiale qui donne $\Phi = r^2/2$ à la frontière. Par conséquent, le potentiel du disque supérieur et de la paroi latérale est imposé par la valeur $\Phi = 1/2$ [Laouari et al. 2021] [24].

Boundary	EI-Parois	EC-Parois
$r=0, 0 \leq z \leq 2$	$\partial\Phi/\partial r = 0.$	$\partial\Phi/\partial r = 0$
$r=1, 0 \leq z \leq 2$	$\partial\Phi/\partial r = 0.$	$\Phi = 1/2$
$z=0, 0 \leq r \leq 1$	$\partial\Phi/\partial z = 0.$	$\Phi = r^2/2$
$z=2, 0 \leq r \leq 1$	$\partial\Phi/\partial z = 0.$	$\Phi = 1/2$

Tableau II.4 : Les conditions aux limites utilisées pour le potentiel électrique

A decorative frame resembling a scroll, with a light gray background and a dark gray border. The frame has rounded corners and a vertical strip on the left side. The title is centered within the frame.

Chapitre III : Méthode Numérique

Chapitre III : Méthode Numérique

III.1 Introduction :

Certain problème continue peuvent parfois être remplacés par discret dont la solution est connue pour approcher celle du problème continue, ce procédé est appelé discrétisation.

Dans ce chapitre nous allons utiliser la méthode des volumes finis comme méthode de discrétisation cette dernière consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur des volumes entourant chaque point du maillage. La résolution du système d'équation nous permet de déterminer les champs de toutes les variables du problème considère.

Dans le domaine de thermique, de la mécanique des fluides et de la combustion, les phénomènes physiques sont décrits par des équations aux dérivées partielles (EDP) fortement couplées et non linéaires. En général, ces équations n'admettent pas des solutions analytiques sauf dans des cas très simplifiés. Mais, une solution numérique peut être possible en transformant ces équations différentielles en systèmes d'équations algébriques linéaires par une méthode de discrétisation avant de résoudre ce système par des méthodes directes ou par itérations. Il existe plusieurs méthodes de discrétisation sont utilisées actuellement on peut citer à titre d'exemple :

- La méthode des différences finis.
- La méthode des éléments finis.
- La méthode de volume fini.

Dans ce chapitre également, des simulations numériques sont effectuées à l'aide du logiciel ANSYS Workbench, qui propose une approche différente de la construction de modèles en réutilisant le code ANSYS d'origine.

Il est particulièrement adapté pour traiter des cas à géométrie complexe (nombreuses parties du corps) et des utilisateurs non déterministes dans le domaine du calcul.

Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur la géométrie, pas sur le modèle lui-même. Par conséquent, la plate-forme est responsable de la traduction des requêtes saisies par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer l'analyse.

III.2 La méthode des volumes finis :

L'application de la méthode des volumes finis pour la résolution d'un problème suit les étapes suivantes :

- Bien définir le domaine d'étude et diviser ce domaine de calcul en un nombre fini et discret de volumes de contrôle dont la somme soit égale exactement au volume du domaine de calcul. On dit qu'on génère un maillage.

- Discrétisation des différentes équations régissant le phénomène. A la fin on obtient un système d'équations algébriques

- Résoudre le système algébrique final par une méthode de résolution (méthode itérative ou directe).

L'avantage de cette méthode par rapport aux autres méthodes numériques est qu'elle est conservative ; bref, tout ce qui sort d'un volume de contrôle entre dans un autre.

Pour expliciter l'application de cette méthode, on considère l'équation générale de transport qui s'écrit 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 :

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

Tel que :

Γ_{Φ} : le coefficient de diffusion.

S_{Φ} : le terme source.

La résolution de l'équation par la méthode des volumes finis, réside essentiellement dans l'intégration de celle-ci 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.3 Etapes de résolution par la méthode des volumes finis :

III.3.1 Maillage :

Le domaine de calcul est divisé en une série de sous domaines appelés volumes de contrôle. Ces volumes de contrôle enveloppent tout le domaine de calcul, de telle façon que la somme de leurs volumes soit égale exactement au volume du domaine de calcul.

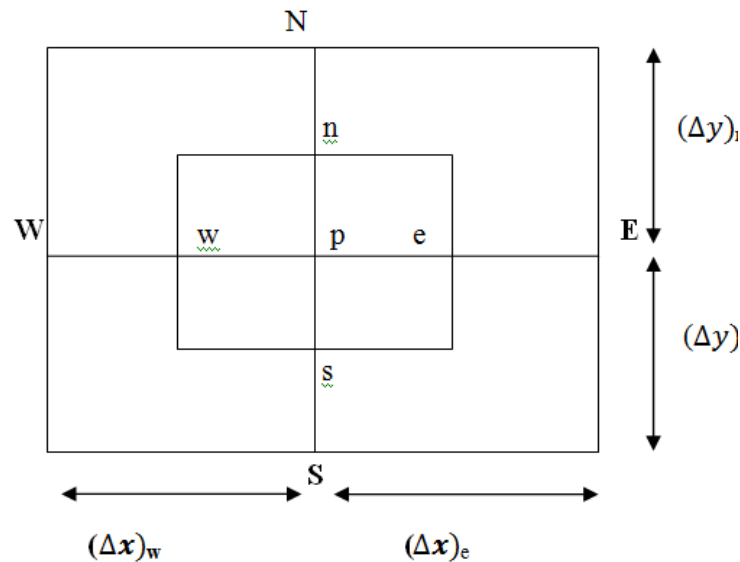


Figure III.1 : Schéma du volume de contrôle dans le cas bidimensionnel.

Les variables dépendantes sont stockées dans des points discrets appelés nœuds (points d'intersection des lignes du maillage) voir figure. (III.1). Les nœuds sont numérotés de 1 à N_i , suivant x le nœud (i, j) est appelé P , il est entouré par les nœuds E (Est), N (Nord), W (West) et S (Sud). À chaque nœud est associé un volume fini (fig. III-1), les faces du volume sont situées au milieu entre les nœuds, la surface de VC consiste en quatre plans, notés par des lettres minuscules correspondant à leur direction e , w , n et s (Exemple : la face w est au milieu entre les nœuds W et P).

Les incréments de distance $\Delta x, \Delta y, \Delta x_e, \Delta y_n, \Delta x_w, \Delta y_s$ sont définis sur la (fig. III.1). Les scalaires ϕ (pression P , température T) sont stockés au nœud central. Les composantes de vitesse u et v sont stockées dans des nœuds décalés. L'emploi de tels maillages entrelacés permet le calcul des gradients de pression dans les équations de quantité de mouvement, sans interpolation des pressions et le calcul des flux convectifs dans les équations sans interpolations des vitesses.

III.3.2 Discrétisation :

Schémas employés dans la partie Fluent :

- **Pression (Schéma standard)**

Les valeurs de la pression sont stockées aux centres des cellules. Pour les valeurs des pressions aux faces, nécessaires pour la résolution de l'équation de continuité, FLUENT propose plusieurs schémas d'interpolations tel que le schéma standard.

L'interpolation s'effectue en utilisant les coefficients de l'équation de la quantité de mouvement, cette procédure fonctionne bien pour des petites variations de la pression entre les centres des cellules.

Devant les problèmes de diffusion numériques, des schémas numériques plus précis ont été testés comme celui-ci qui s'appuie sur les deux mailles amont.

Le principal problème que nous rencontrons dans la discrétisation des termes de convection est le calcul des valeurs de la propriété transportée Φ sur les faces du volume de contrôle et son flux convectif à travers ces limites.

Afin d'obtenir les équations discrétisées pour la diffusion et le terme source nous avons introduit la différentiation centrée. Il semble évident d'essayer d'utiliser cette technique pour les termes convectifs.

Malheureusement, le phénomène de diffusion la distribution de la propagation de la propriété et de ces gradients dans toutes les directions, alors que la convection ne montre son influence que dans le sens de l'écoulement.

- **Couplage pression-vitesse**

Les équations des composantes de quantités de mouvement sont couplées par la pression qui agit par les composantes de son gradient, or nous ne disposons pas d'équation propre à cette variable.

L'idée de Patankar et Spalding consiste à utiliser l'équation de continuité pour obtenir le champ de pression, car si le bon champ de pression est pris en compte dans le traitement des équations des quantités de mouvement, alors les vitesses obtenues vérifient l'équation de continuité. Donc cette dernière apparaît comme une contrainte à vérifier par le champ de pression.

Trois algorithmes sont considérés par FLUENT pour diriger la liaison vitesse-pression :

- SIMPLE : « Semi Implicite Méthode for Pressure Linked Equations » : le plus robuste.
- SIMPLER : « Semi Implicite Méthode for Pressure-Linked Equation Consistent » : il donne une convergence plus rapide pour les problèmes simples.
- PISO : « Pressure Implicite Solution by Split Operator » : il est utile pour des problèmes des écoulements instables.

L'algorithme choisi dans notre étude est l'algorithme SIMPLE. A l'initialisation du calcul, un champ de pression fixé a priori est introduit dans l'équation de bilan de la quantité de mouvement, permettant de calculer un premier champ de vitesse. La combinaison des équations de bilan de masse et de quantité de mouvement permet ensuite de corriger ces premiers champs de pression et de vitesse. Les autres équations de transports sont ensuite résolues et le champ de pression corrigé est utilisé pour initialiser le calcul à l'itération suivante. Cette succession d'opération est répétée jusqu'à ce que les critères de convergences soient atteints.

- **Algorithme SIMPLE**

Discretisation d'une équation de transport diffusion sur un volume de contrôle par la méthode des volumes finis fait intervenir les valeurs des vitesses aux interfaces des volumes (U_e , U_w , U_s , U_n). Il est donc intéressant de calculer ces vitesses directement sur les interfaces (sans avoir à effectuer d'interpolations). D'autre part, la discrétisation de l'équation de continuité et du gradient de pression avec l'utilisation d'une interpolation linéaire peut induire des erreurs importantes du fait qu'une répartition de pression ou de vitesse en "damier" est vue comme un champ uniforme. Pour contourner ces difficultés on préfère utiliser des grilles décalées "staggeredgrid". Une grille principale est construite sur laquelle on calcule la pression, la température et la concentration. Deux grilles décalées vers la droite et vers le haut respectivement sont utilisées pour le calcul des vitesses horizontale et verticale.

L'algorithme SIMPLE, acronyme pour « Semi-Implicite Method for Pressure Linked-Equations » permet de résoudre le système d'équations discrétisées. Cet algorithme stipule l'existence d'une relation entre les vitesses corrigées et les pressions corrigées, en vue de vérifier l'équation de conservation de la masse.

Le schéma représentatif de ce processus itératif est le suivant :

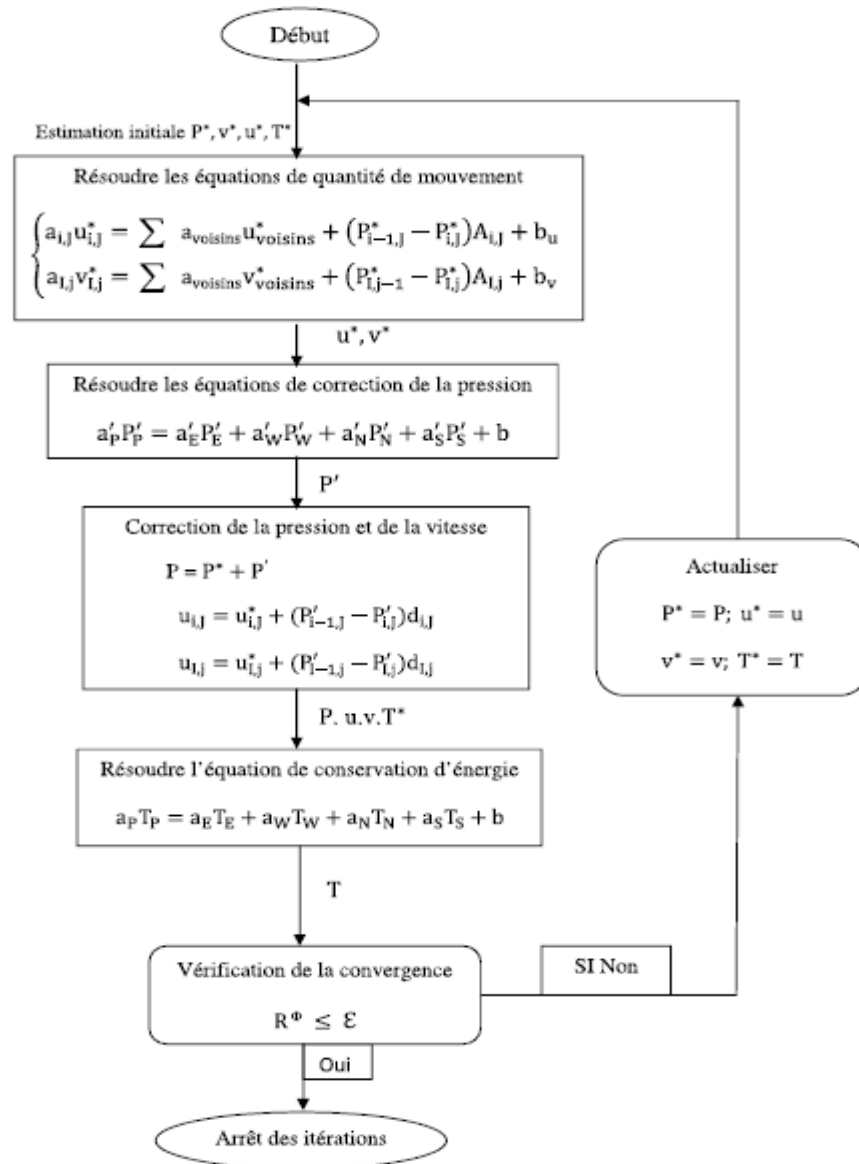


Figure III.2. Organigramme de l'algorithme SIMPLE

U et v sont les deux composantes de vecteurs de vitesse, p représente la pression.

Φ^* est définit par $\Phi = \Phi^* + \Phi'$ est une correction.

III.4 Détails numériques utilisés dans ce travail :

III.4.1 Choix de maillage :

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

- Le nombre de mailles.

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

Dans notre étude on choisit le maillage de (80*160) pour réaliser notre travail.

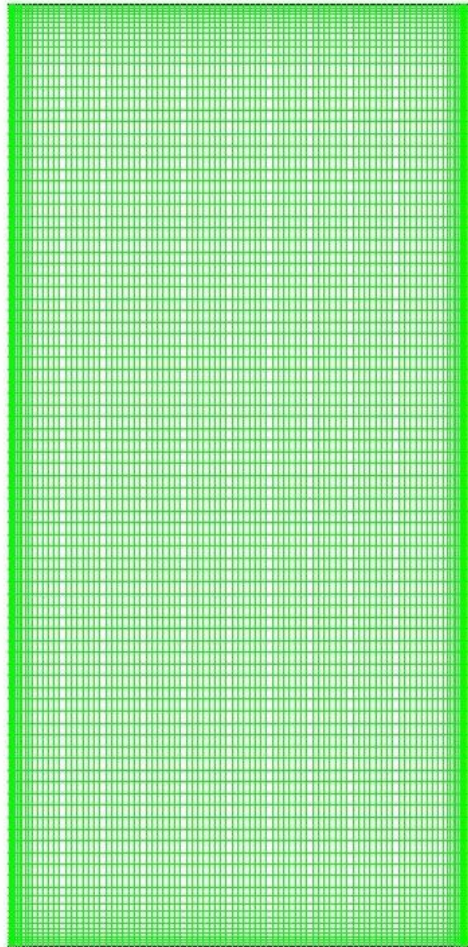


Figure III.3. Maillage (80*160)

III.4.2Fluent :

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

Les schémas de discrétisation des différentes variables sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Variable	Schéma
Pression	Standard
Quantité de mouvement	Décentré amont 2 ^{eme} ordre
Energie	Décentré amont 2 ^{eme} ordre
Couplage pression-vitesse	Simple

Tableau III.1 : schéma de discrétisation.

Sous relaxation :

Les sous relaxations sont régulièrement utilisés dans les problèmes non linéaires pour éviter que le processus itératif ne diverge. Elle consiste à diminuer la rapidité des changements d'une variable, d'une itération à l'autre, par l'introduction d'un coefficient de sous relaxation.

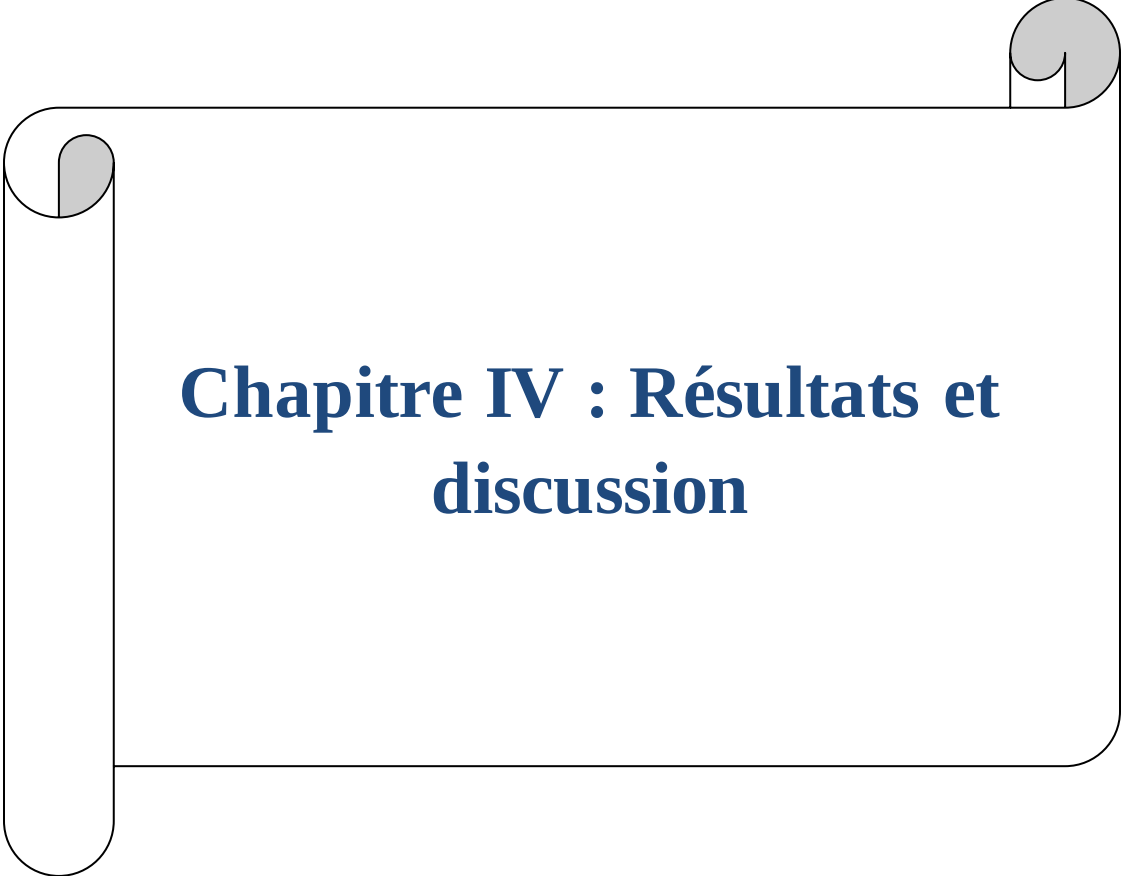
Dans notre cas, les valeurs de sous relaxation sont données dans le tableau suivant :

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

Tableau III.2 : les valeurs de sous relaxation.

III.5 Conclusion :

À travers ce chapitre, nous avons présenté brièvement le code de calcul FLUENT, la méthode de volume fini, également le choix de différents modèles d'interpolations puis les principaux étapes à suivre sur fluent pour ce travail. La résolution qui est effectuée par le logiciel FLUENT donne des résultats présentés dans le chapitre suivant.



Chapitre IV : Résultats et discussion

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 Introduction :

Le performance du champ magnétique et les conductivités électriques des parois a des effets sur la chaleur et masse des écoulements tourbillonnants de nano fluides qui sont étudiés pour un choix de nanoparticules (Cu) avec fraction volumique solide ($\phi=0.1$). Pour toutes les simulations, le nombre de Reynolds est fixé à $Re=1000$, et l'eau pure est considérée comme le fluide de base avec $Pr = 6,2$ remplis dans un cylindre avec hauteur/rayon ($H/R = 2$). Les calculs ont été effectués pour les différents nombre de Hartmann ($0 \leq Ha \leq 60$) et présentés pour une gamme de nombre de Richardson ($0 \leq Ri \leq 2,0$).

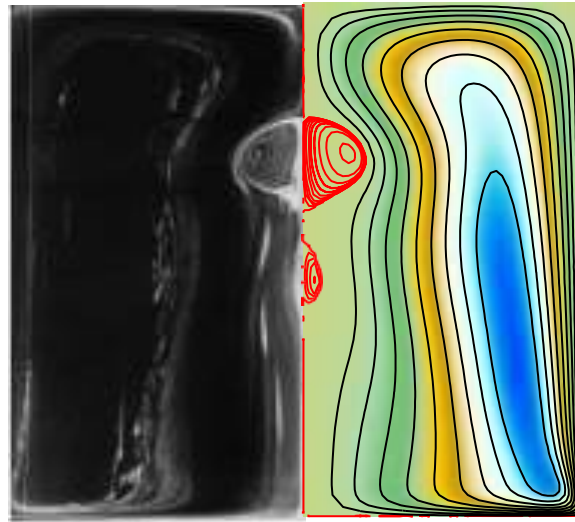
Deux cas sont considérés dans cette étude :

- Isolation électrique de toutes les parois (EI-parois).
- Conduction électrique de toutes les parois (EC- parois).

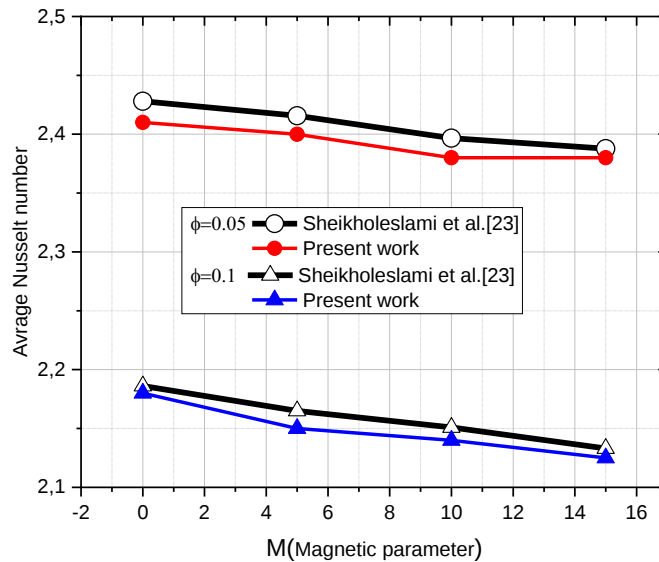
Sans champ magnétique, le code actuel est en bon accord avec les visualisations expérimentales précédentes **d'Escudier** [25], et travaux numériques de **Sheikholeslami et al.** [26]. La procédure de fluorescence induite par laser a été utilisée par Escudier pour découvrir la nouvelle structure produite dans le flux tourbillonnant généré par le disque inférieur du cylindrique récipient. Le cas particulièrement compliqué d'une double défaillance à $Re=1854$ est présenté par des diagrammes de lignes de courant sur la figure IV.1(a). Notez que la simulation actuelle côte à côte à droite de la figure IV.1(a).

La deuxième comparaison a été faite avec les résultats de Sheikholeslami *et al.*, comme le montre la figure IV.1(b). Cette comparaison montre les effets du paramètre magnétique et paramètre de fraction volumique des nanoparticules sur le nombre de Nusselt (Nu). Dans cette étude, l'écoulement de nano fluide et le transfert de chaleur dans un système en rotation à l'intérieur de deux plaques horizontales sont analysés.

La comparaison est faite lorsque la feuille d'étirement est une plaque inférieure et un solide perméable est une plaque supérieure, avec le nombre de Reynolds ($Re = 1$), le paramètre d'injection ($\lambda = 1$), le paramètre de rotation ($Kr = 1$) et le paramètre de fraction volumique des nanoparticules ($\phi = 0,05$ et $0,1$). Il est remarqué que cette comparaison montre un excellent accord.



(a)



(b)

Figure IV.1. Comparaison avec (a) expérimental d'Escudier [25],
(b) résultats numériques de Sheikholeslami *et al.* [26].

IV.2 Les effets de nanoparticules dans l'eau sans champ magnétique :

Dans cette partie d'étude, le flux de nano fluide tourbillonnant pour $Re = 1000$ est comparé au flux d'eau pure tourbillonnante pour $Ri = 0.01$ à 1.0 , et sans champ magnétique.

La figure IV.2 illustre les effets du nombre de Richardson sur les lignes de courant (cadre supérieur) et les isothermes (cadre inférieur) qui comparent l'eau pure (indices f) au nano fluide (indices nf). Sur cette figure, la forme de nanofluide (lignes pointillées) est

juxtaposée à la forme de l'eau pure (lignes solides) pour distinguer la différence entre eux. Le débit d'eau pure montre qu'une concentration vortex est en train de se décomposer, ce petit vortex est attaché à l'axe du cylindre, comme indiqué pour $Ri = 0,01$.

Au contraire, le flux de nano fluide est produit dans des conditions où la décomposition du vortex ne se produit pas. Là, $\Psi^{nf} \max \leq \Psi^f \max$, où il est clair que l'ajout de nanoparticules à l'eau pure augmente le poids, et donc réduit la force du champ d'écoulement. Le maximum de la fonction de flux pour l'eau pure et le nano fluide augmente avec Ri croissant. Les lignes de courant lorsque $Ri = 0,05$ montrent une contre-rotation de la cellule circulante occupant toute la section supérieure du cylindre, qui présente un double lobe structuré.

Par conséquent, une augmentation de plus de Ri à 0,5 le débit d'eau pure a les trois structures cellulaires (trois couches), mais deux couches existent toujours pour l'écoulement des nano fluides. Le cas de $Ri = 1.0$ compare les couches d'augmentation du fluide dans un cas d'écoulement d'eau pure à un cas d'écoulement nanofluide. Pour l'eau pure six couches ont été formées pour $Ri=1.0$, en retour cinq couches ont été observées pour l'écoulement de nano fluide.

Il semble que le principal effet de flottabilité exigé sur le schéma d'écoulement est d'induire en recirculation méridienne une structure en couches verticales. Les isothermes ont également des formes distinctes entre l'eau pure et le nano fluide à chaque Ri , cependant, ils affichent des comportements différents selon que Ri augmente. Pour les cas de $Ri = 0.01$ et $Ri = 0,05$, là où la convection domine le régime d'écoulement, les isothermes affichent des couches limites plus élégantes. Lorsque $Ri = 1,0$, les isothermes sont réparties près du disque chaud et ont tendance à être parallèles à ce mur, ce qui indique que la conduction domine le régime de flux.

Les couches stratifiées croissent avec l'augmentation de Ri dans les deux cas (l'eau pure et nano fluide). Ces couches agissent pour isoler la partie chaude du cylindre, ce qui réduit le transfert de chaleur. Les présentes observations montrent que la structure en couches est réduite par la présence de nanoparticules. La diminution du nombre de couches induit une augmentation de nombre de Nusselt moyen, qui reflète l'amélioration du transfert de chaleur. Elle est probablement également due à la diminution de l'épaisseur de la couche limite sur un disque en rotation en ajoutant du cuivre (**Bachok et al.**) [27].

La variation du nombre de Nusselt moyen avec l'augmentation de Ri est tracée dans Fig.IV.3, où l'eau pure et le nano fluide sont comparés sans champ magnétique, on peut voir que $\overline{Nu}$ diminue de manière monotone avec l'augmentation de Ri et se rapproche de la limite

de conduction. On constate également que la valeur extrême de $\overline{Nu}$ pour l'eau pure est atteinte à $Ri = 0$, soit 7.99.

De même, le nombre moyen de Nusselt dans un écoulement de nano fluide prend des valeurs extrêmes lorsque $Ri = 0$ et vaut 10.66, dans lequel l'écoulement méridien est caractérisé par une seule couche de fluide. Par conséquent, à nombre de Richardson fixe, les valeurs de $\overline{Nu}$ pour le nanofluide sont supérieures que celles obtenues dans le cas de l'eau pure. Dans la condition de stratification thermique, les couches fluides obstruent le flux ascendant, et donc le transport net par advection s'affaiblit. En plus de ces derniers, l'isolation de la zone chaude par les couches stratifiées diminue le transfert de chaleur totale. On peut conclure que l'addition de nanoparticules à l'eau pure contrôle la performance du transfert de chaleur en réduisant le nombre de couches de fluide.

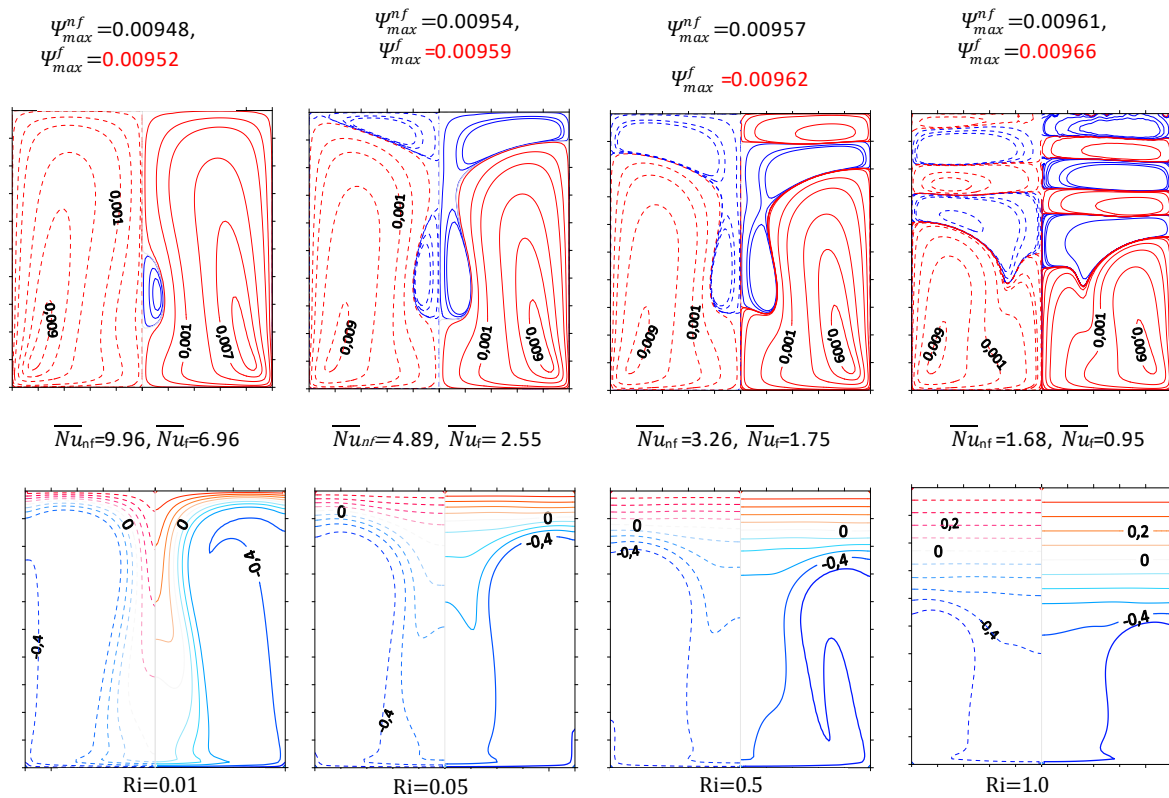


Figure IV.2 Fonction de courant (en haut) et les isothermes (au-dessous de) avec Nano fluide Cu-eau (ligne pointillée) par rapport l'eau pur (ligne continue) à différent nombres de Richardson

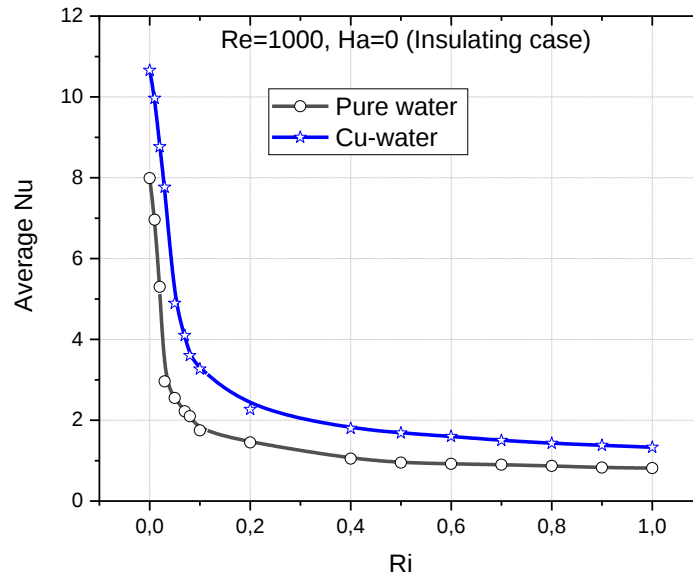


Figure IV.3. Effet de nombre de Richardson sur le nombre de Nusselt moyen.

IV.3 Isolation électrique de toutes les parois (EI-parois) :

Dans une telle situation, le nano fluide est encerclé par des parois isolantes et les lignes du courant électrique sont bloquées dans le fluide. La force de Lorentz produite ici a une faible rupture, par rapport à d'autres cas où une ou plusieurs parois sont conductrices. Dans ce cas, la couche Hartmann sous le disque a une solution de similarité comme dans le cas de la couche d'Ekman classique. L'ordre de grandeur de la vitesse axiale est $v \sim Re/Ha^3$. L'écoulement sans effet de flottabilité est marqué par deux zones distinctes, la zone principale qui est caractérisée par des forces visqueuses plus faibles, et la zone des couches de Hartmann. Ces couches assuraient l'équilibre azimutal via un équilibre entre les forces visqueuses et la force électromagnétique. Les couches de Hartmann sont concentrées sous le disque supérieur et au-dessus du disque inférieur.

La figure IV.4 précise l'acte de flottabilité sur le nano fluide lorsque $Ha = 10$ et pour différents Ri . Lorsque $Ri = 0,02$, les lignes de courant montrent une seule recirculation principale dans le plan méridien, ce qui correspond à la domination de la convection forcée. Les lignes de courant hydrodynamique dans le cas de $Ri = 0,1$ montrent une double couche, dans laquelle la couche supérieure a une recirculation à contre-courant avec une structure à double lobe. Les lignes de courant lorsque $Ri = 1.0$ montrent une nouvelle région de recirculation du flux près du disque supérieur du cylindre, qui a une petite taille. Par conséquent, une augmentation plus importante entraîne une structure de flux stratifiée, jusqu'à

trois zones de recirculation en couches apparaissant pour $Ri = 1$ et quatre couches pour $Ri = 2$, respectivement. De plus, la fonction de flux maximum diminue avec l'augmentation de Ri . L'effet principal de la force de flottabilité sur le modèle d'écoulement est d'induire dans la recirculation méridienne une structure stratifiée verticale, qui est montré dans Fig. IV.4.

Pour étudier les effets de l'augmentation du champ magnétique sur la structure de flux de nano fluide dans le boîtier isolant, en prenant par exemple le cas de $Ri = 0,2$ à différentes magnitudes du nombre d'Hartmann (Fig. IV.5). Les tracés des lignes de courant hydrodynamiques dans le cas d' $Ha = 10$ montrent trois couches, dont la couche médiane a une recirculation à contre-courant. Comme clairement indiqué à $Ha = 20$ et $Ha = 30$, la recirculation moyenne à contre-courant diminue en taille, au contraire, on voit que la zone de recirculation inférieure s'agrandit. Pour $Ha = 60$, la zone de recirculation prend toute la section du cylindre, au contraire, la cellule de recirculation à contre-courant diminue de taille et se concentre au centre du récipient. De plus, la valeur maximale ψ_{Max} augmente avec l'augmentation.

La figure IV.6a compare le profil du nombre de Nusselt local pour trois nombres de Hartmann ($Ha = 0, 30$ et 60) au niveau du disque supérieur (ligne pointillée) et du disque inférieur (ligne continue) lorsque $Ri = 0,04$. Sans champ magnétique ($Ha = 0$), le nombre de Nusselt local sur le disque inférieur atteint un maximum local à $r = 0$, diminuant ensuite à mesure que r augmente vers le flanc. Le nombre de Nusselt sur le disque supérieur atteint sa valeur extrême à environ $r = 0,86$. On peut voir que le taux de transfert de chaleur augmente en augmentant Ha à 30 que le taux de transfert de chaleur augmente en augmentant Ha à 30 (courbe bleue. Lorsque $Ha = 60$, en raison de l'amortissement du champ magnétique, le taux de transfert de chaleur diminue par rapport aux deux cas ($Ha = 0$ et $Ha = 30$)).

L'impact de Ha et Ri sur le nombre de Nusselt moyen dans le cas isolant est présenté dans Figure IV.6b. Il s'avère que le nombre moyen de Nusselt diminue avec une hausse de Ri pour la valeur fixe de Ha . La valeur maximale de $\overline{Nu}$ est atteinte lorsqu'une seule cellule de recirculation est créée ($Ri = 0$ et $Ha = 0$). Sous la condition de stratification thermique ($Ri = 2,0$), $\overline{Nu}$ présente une courbe presque plate où les isothermes de l'écoulement forment une couche stratifiée (Fig. IV.4a), qui agit pour isoler le disque chaud. L'effet de Ha sur $\overline{Nu}$ est beaucoup plus clair dans l'intervalle ($0,04 \leq Ri \leq 1,0$). On constate que l'augmentation de Ha entraîne une amélioration moindre du transfert de chaleur et il semble que $\overline{Nu}$ atteigne une valeur extrême à $Ha = 30,0$.

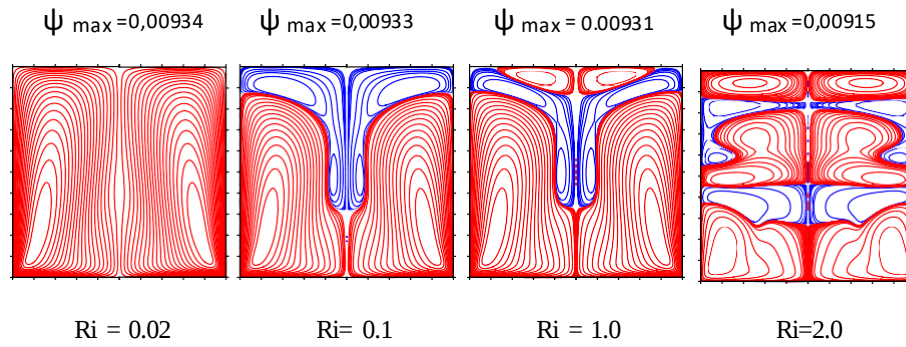


Figure IV.4. Fonction de courant pour le cas de (EI- Parois) lorsque $Ha=10$ et différent Ri .

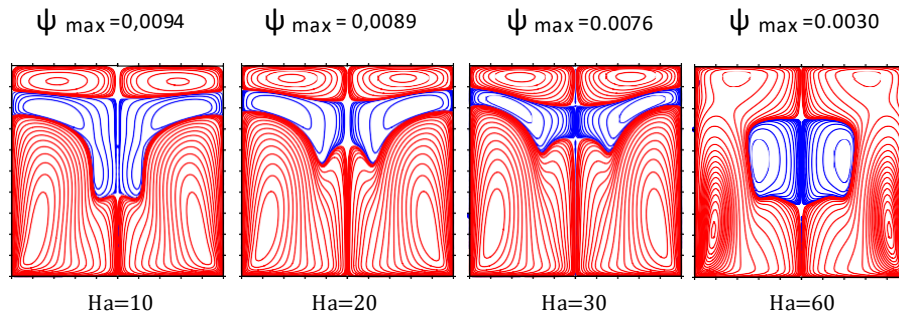


Figure IV.5. Fonction de courant pour le cas de (EI- Parois) lorsque $Ri=0.2$ et différent Ha .

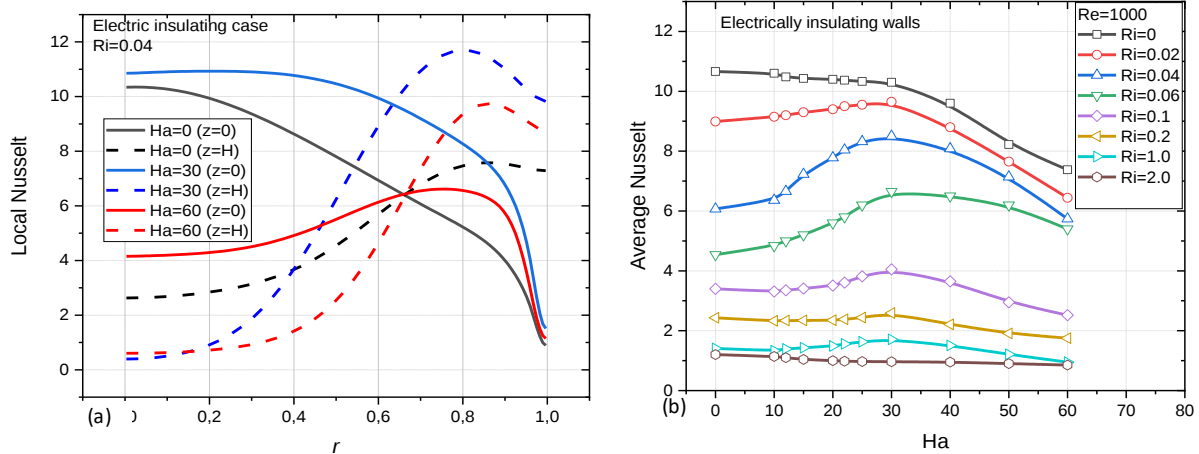


Figure IV.6. Effet de nombre de Hartmann sur (a) le nombre de Nusselt local et (b) nombre de Nusselt moyen.

IV.4 Conductivité électrique de toutes les parois (EC-parois) :

Dans ce cas, toutes les parois cylindriques sont parfaitement conductrices de l'électricité. La composante tangentielle du courant électrique à l'interface entre le fluide et les parois doit être zéro. Par conséquent, la couche Hartmann disparaît avec le disque en rotation

et crée un gradient du potentiel dans la direction radiale et communique aux deux autres parois, leur valeur est particulièrement ressentie à son extrémité située en $r = 1$.

La figure IV.7 présente les lignes de courant de l'écoulement du nano fluide dans le plan méridien pour augmenter progressivement les nombres de Richardson lorsque $Ha = 10$. Les résultats de ce cas montrent une cellule à flux unique lorsque le nombre de Richardson $Ri=0,02$. Les lignes de courant pour $Ri = 0,1$ affichent des tourbillons symétriques attachés à l'axe de rotation et centrés en $z = 1,34$. Lorsque $Ri=1$ trois couches sont développées dont la couche médiane a une recirculation à contre-courant. Pour $Ri = 2,0$, jusqu'à trois couches apparaissent, et la déformation est causée par la croissance progressive de la zone de recirculation d'angle près du disque supérieur. Nous voyons que le débit maximal diminue de façon monotone en augmentant Ri .

Figure IV.8 montre que des bulles de séparation se produisent près du disque supérieur à $Ha = 10$, ce qui rétrécit en taille pour $Ha = 20$ et se déplace vers le centre à $Ha = 30$, et finalement disparaît à $Ha = 60$. $\Psi_{\max}$ augmente avec l'augmentation de Ha et vaut 0,016 et 0,026 pour $Ha=10$ et $Ha = 60$, respectivement.

En comparant les tracés du nombre de Nusselt local sur la Fig. IV.9(a) pour $Ri=0,04$ et $Ha=0, 20$, et 60 , respectivement, nous observons de manière surprenante une amélioration du transfert de chaleur. Lorsque Ha est d'environ 20, le taux de transfert de chaleur augmente (courbe bleue) et atteint sa valeur extrême sur le disque inférieur à environ $r = 0,16$ et vaut 26,68. La valeur maximale du nombre de Nusselt local sur le disque supérieur est 24,35 à $r = 0,75$ (courbe bleue en pointillés). Quand $Ha= 60$ (courbe rouge), les valeurs du nombre de Nusselt local diminuent par rapport à $Ha=20$, mais c'est quand même mieux que ($Ha=0$).

Le nombre de Nusselt moyen est ensuite tracé en fonction de Ha pour différents Ri dans la Figure IV.9(b). Lorsque Ri augmente pour la valeur fixe de Ha , le nombre moyen de Nusselt diminue et il devient plus clair lorsque le mode de conduction domine le transfert de chaleur, en particulier dans la région supérieure pour $Ri = 1$ et 2 , respectivement. En l'absence de champ magnétique, le nombre de Nusselt moyen est le même que celui du boîtier isolant. Lorsque le nombre de Hartmann augmente et est supérieur à 5, le $\overline{Nu}$ augmente et atteint une valeur maximale de $Ha \approx 18$ pour $0 \leq Ri \leq 0,2$ et $Ha=30$ pour $Ri = 1$ et 2 . Les comportements des $\overline{Nu}$ sont justes inversés lorsque le Ha augmente, qui chute lentement jusqu'à atteindre l'équilibre entre l'électromagnétique et force visqueuse. Notez que lorsque le disque rotatif inférieur est électriquement conducteur, La couche Hartmann disparaît et de ce fait, la

recirculation du fluide est la plus élevée. C'est aussi la raison des valeurs les plus élevées du nombre de Nusselt observées pour ce cas (Fig.IV.9).

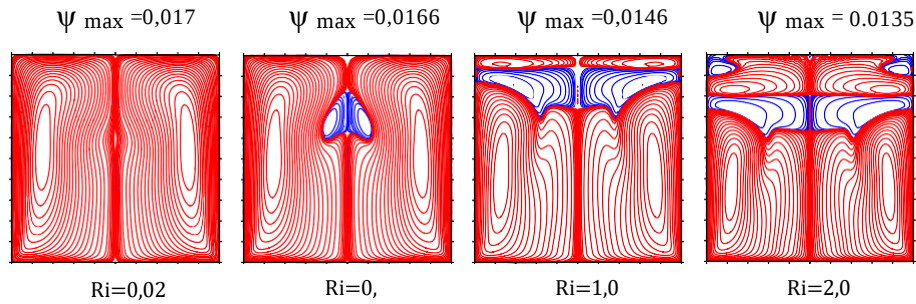


Figure IV.7. Fonction de courant pour le cas de (EC- Parois) lorsque $Ha=10$ et différent Ri .

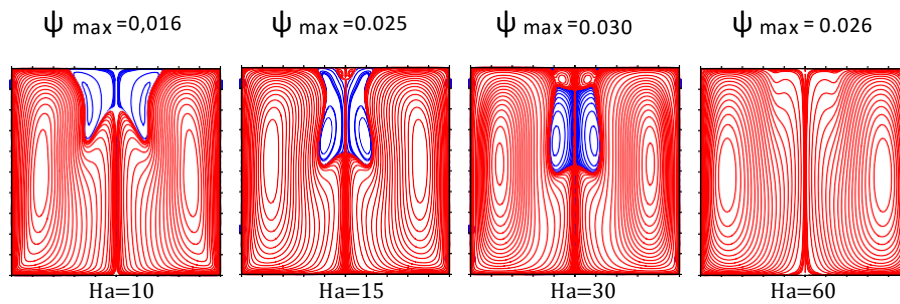


Figure IV.8. Fonction de courant pour le cas de (EC- Parois) lorsque $Ri=0.2$ et différent Ha .

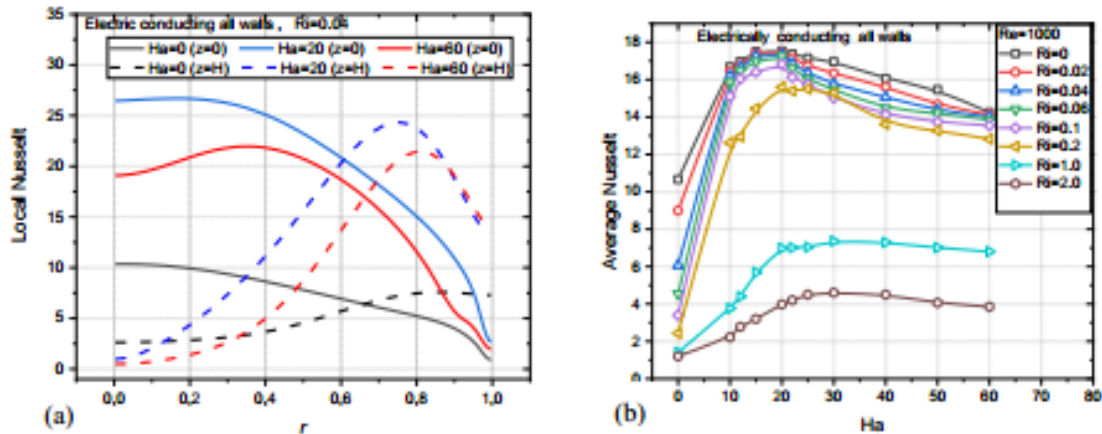


Figure IV.9. Effet de nombre de Hartmann sur le (a) nombre de Nusselt local et (b) nombre de Nusselt moyen

IV.5 Comparaison :

Dans la sous-section suivante, la comparaison du nombre de Nusselt moyen, du maximum de la fonction de courant, des lignes de courant et des isothermes pour le cas de $Ri= 0,02$ est présentée à la Fig.IV.10. Lorsque $Ri = 0,02$ (Fig. IV.10), c'est-à-dire sous la

condition que la stratification en température soit plus faible, bien que la couche de Hartmann disparaisse lorsque le disque rotatif inférieur est électriquement conducteur. C'est la raison pour laquelle la recirculation de fluide est la plus élevée pour les deux cas : (EC-Bottom) et (EC- parois), ceci peut être vu sur la Fig. IV.10, et aussi la raison des valeurs les plus élevées du nombre de Nusselt observées pour ce cas (Fig.IV.10a). En se référant à Fig.IV.10(c, d), qui comparent les lignes de courant et les isothermes lorsque seul le couvercle inférieur est électriquement conducteur avec celles obtenues dans le cas (EC-Top) pour $Ha=20$ et 60 , respectivement. Comme on peut le voir sur la figure IV.10(c), la fonction de flux maximum est fortement augmentée lorsque l'on passe de (EC-Top) à (EC-Bottom) pour $Ha=20$. Pour $Ha=60$ les lignes de courant confirment qu'une bulle de séparation est située dans la partie supérieure du cylindre lorsque seul le fond est conducteur (Fig.IV.10c). Ce comportement contraste avec le cas (EC-Top) où la bulle de séparation se produit à la partie inférieure d'un cylindre. Au fur et à mesure que le flux décélère le long de la partie supérieure, le transfert de chaleur diminue pour atteindre des valeurs minimales.

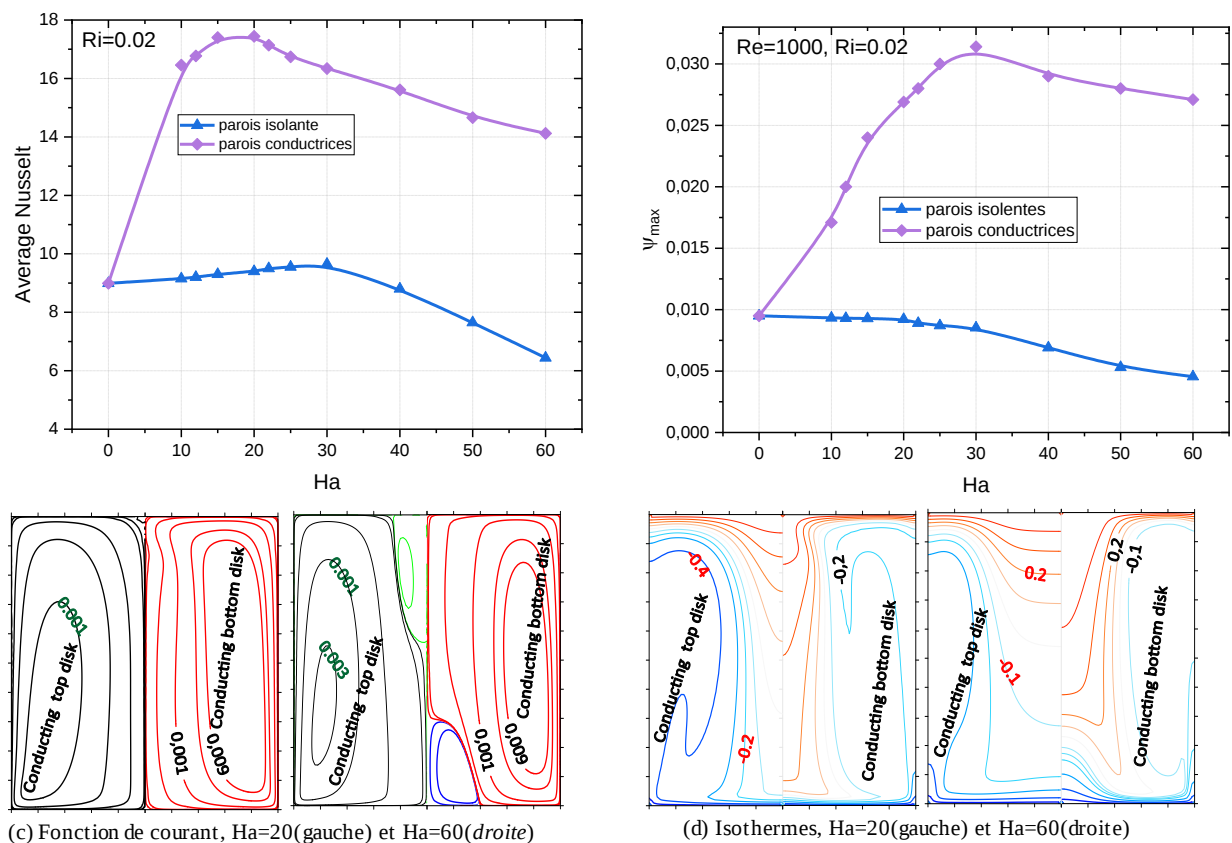


Figure IV.10. Cas de $Ri=0,02$ (a) nombre de Nusselt moyen ; (b) ψ_{max} ; (c) lignes de courant et (d) isothermes.

En comparant les tracés de Nusselt principal de la Fig. IV.11a pour $Ri = 0,2$, les valeurs de $\overline{Nu}$ sont presque identiques pour trois cas où le disque inférieur n'est pas conducteur. De plus, ils ont une valeur plus faible par rapport au cas (EC-Bottom). Ainsi, la force de flottabilité a bloqué le mouvement vertical et l'aspiration d'Ekman affaiblie a entraîné des structures en couches verticales. Par conséquent, les valeurs maximales de la fonction de flux prennent des valeurs très proches pour (EC-Bottom) (voir, Fig. IV.11b). Notez que la distribution de la température pour (EC-Top) et à $Ha = 20$ (Fig. IV.11d) a tendance à être parallèle au disque supérieur du cylindre où le flux de nano fluide forme trois couches stratifiées (Fig. IV.11c). Au contraire, une seule recirculation principale est créée dans le plan méridien pour (EC-Bottom). À $Ha = 60$, les lignes de courant montrent qu'une bulle de séparation se produit à la partie inférieure d'un cylindre lorsque le couvercle inférieur n'est pas conducteur, ce qui ralentit le mouvement et diminue le transfert de chaleur. En effet, le mode dominant de transfert de chaleur dans la région supérieure est la conduction.

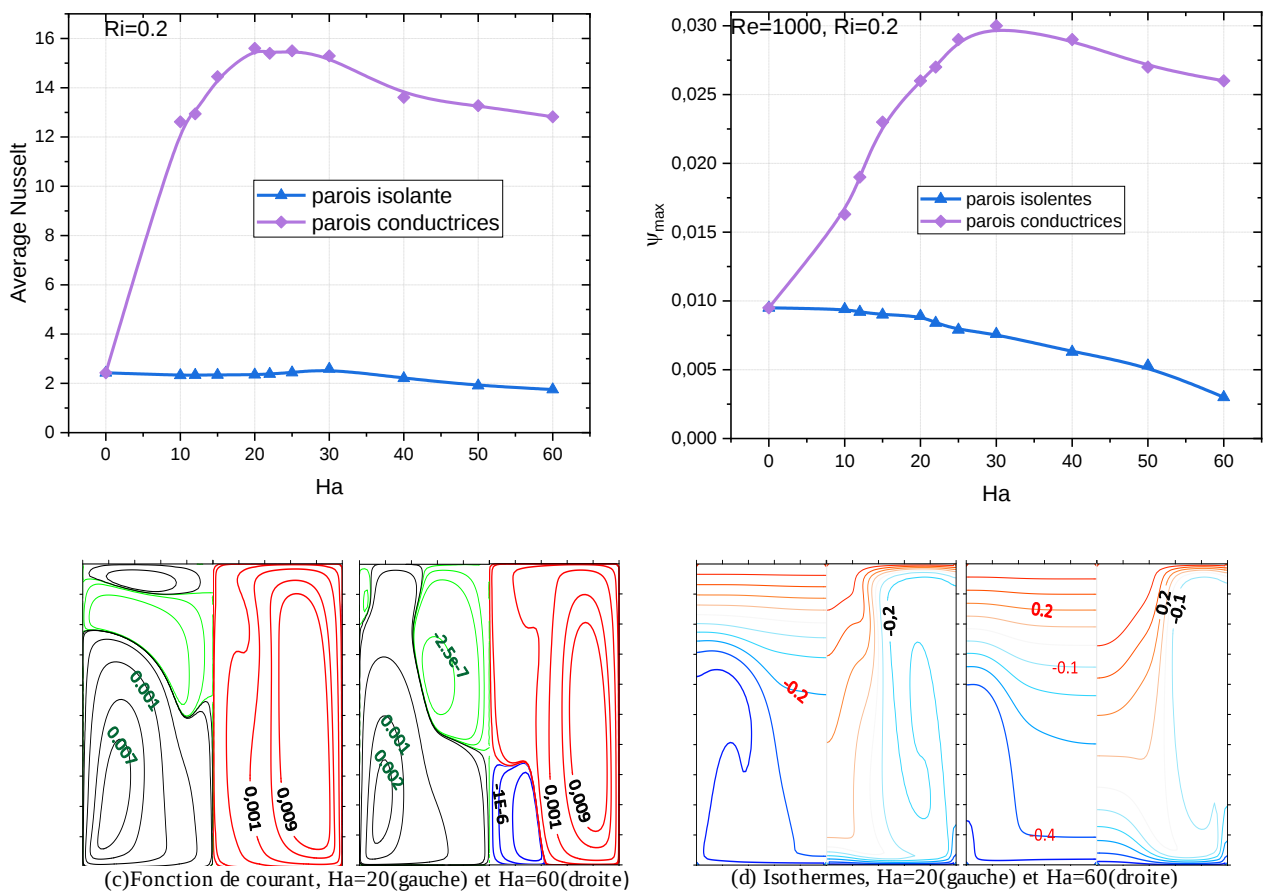


Figure IV.11. Cas de $Ri=0,2$ (a) nombre de Nusselt moyen ; (b) ψ_{max} ; (c) Fonction de courant et (d) isothermes

Conclusion générale

L'effet des parois cylindriques électriquement conductrices sur le flux tourbillonnant de nanofluide a été étudié en présence d'un champ magnétique axial et d'un gradient thermique. La méthode des volumes finis a été utilisée pour résoudre numériquement les équations de transport. Les procédures numériques sont examinées pour un nombre de Reynolds fixe, $Re=1000$, un rapport d'aspect, $H/R=2$, fraction volumique de nanoparticule ($\phi = 0,1$), et les deux paramètres actifs à savoir nombre d'Hartmann (Ha), nombre de Richardson (Ri). Différents cas de parois électriquement isolantes ou parfaitement conductrices sont étudiés. Les remarques finales importantes sont présentées ci-dessous.

➤ Sans champ magnétique :

- L'ajout de nanoparticules (Cu) à l'eau pure en écoulement tourbillonnant a amélioré les performances de transfert de chaleur en diminuant le nombre de couches de fluide et l'épaisseur de la couche limite.
- Les couches de stratification augmentent avec l'augmentation de Ri , de sorte que la structure en couches agit pour isoler la région chaude, ce qui réduit le transfert de chaleur.

➤ Avec champ magnétique :

- Les valeurs les plus élevées sont obtenues pour (EC-Parois), dans la gamme de $15 \leq Ha \leq 20$. De plus, on peut constater que $\overline{Nu}$ est presque doublé par rapport au fluide de base.
- Le nombre moyen de Nusselt, affecté par le champ magnétique est une fonction monotone croissante, ce phénomène s'inverse lorsque Ha dépasse une valeur critique.
- L'augmentation des valeurs du nombre de Nusselt est corrélée à l'augmentation de la recirculation de fluide sous effet magnétique.
- La conductivité électrique du mur est une condition essentielle au maintien d'un transfert de chaleur élevée en flux tourbillonnant de nano fluide.

.

Bibliographique

- [1] João-Paulo RIBEIRO, Jean-Antoine GRÜSS, Nanofluides pour les applications thermiques, techniques ingénieur (2009)
- [2] Mahfoud, Brahim. "Simulation of Magnetic Field Effect on Heat Transfer Enhancement of Swirling Nanofluid" International Journal of Computational Materials Science and Engineering, 2250007 (24 pages) DOI: 10.1142/S2047684122500075.
- [3] S.U.S Choi. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Developments and applications of Non-Newtonian Flows. D.A. Siginer and H.P. Wang (eds), FED vol.231/MD-vol .66, ASME, NEW York, 99 -105, 1995
- [4] N.B. Cheikh, B.B. Beya, T. Lili, Influence of thermal boundary conditions on natural convection in a square enclosure partially heated from below, Int. Comm. Heat Mass Transf. Vol.34, pp. 369 - 379, 2007.
- [5] Mahfoud, Brahim., Bendjaghli, Ali., Natural convection of a nanofluid in a conical container, Journal of Thermal Engineering 4(1), 2018, 1713-1723. [DOI:10.18186/journal-of-thermal-engineering.367407](https://doi.org/10.18186/journal-of-thermal-engineering.367407)
- [6] R. L. Hamilton et O. K. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two – component system. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 1, N°3, pp. 187- 191, 1962.
- [7] J. A. Eastman, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, et P. Keblinski, Thermal transport in Nanofluids. Annual Reviews Materials Research, Vol. 34, pp. 219 - 246, 2004
- [8] S. E. Maïga, C. T. Nguyen, N. Galanis, et G. Roy, Heat transfer enhancement in forced convection laminar tube flow by using nanofluids. ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, G. de Vahl Davis and E. Leonardi (Eds.) CDROM Proceedings, ISBN 1-5670-174-2, Begell House, New York, April 2004.
- [9] X. Q Wang, A. S. Mujumdar et C. Yap, Thermal characteristics of tree-shaped microchannel nets for cooling of a rectangular heat sink. International Journal of Thermal
- [10] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two-dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.46, pp. 3639 - 3653, 2003.
- [11] R.Y. Jou, S.C. Tzeng, Numerical Research of Nature Convective Heat Transfer Enhancement Filled with Nanofluids in Rectangular Enclosures, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 6, pp.727-736, 2006.
- [12] H.F. Oztop, E. Abu-Nada, Numerical Study of Natural Convection in Partially Heated Rectangular Enclosure Filled with Nanofluids, Int. J. Heat Fluid Flow, Vol.29, pp.1326 -1336, 2008.

- [13] D. Wen et Y. Ding, Experimental Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region under Laminar Flow Conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, N° 24, pp. 5181 - 5188, 2004.
- [14] S.Z. Heris, S.G. Etemadet M.N. Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 529 - 535, 2006.
- [15] A. Behzadmehr, M. Saffar-Avval et N. Galanis, Prediction of Turbulent Forced Convection of Nanofluid in a Tube with Uniform Heat Flux Using a Two Phase, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, N°2, pp. 211 -219, 2007.
- [16] K.S. Apurba, S. Swarnendu et C. Niladri, Study of Heat Transfer due to Laminar Flow of Copper–Water Nanofluid Through Two Isothermally Heated Parallel Plates, *International Journal of Thermal Sciences* 48, N°2, pp. 391- 400, 2009.
- [17] H.F. Oztop et E. Abu-Nada, Numerical Study of Natural Convection in Partially Heated Rectangular Enclosures Filled with Nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, N°5, pp. 1326 - 1336, 2008.
- [18] Xuan Y. et Li Q. (2000), Heat Transfer Enhancement of Nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21: 58-64.
- [19] Bhattad A., Sarkar J. et Ghosh P. (2017), Improving the Performance of Refrigeration Systems by Using Nanofluids: A Comprehensive Review, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 82: 3656-3669.
- [20] D. David, “Nanofluides, l’efficacité à la hausse,” www.cooling-masters.com, 2008.
- [21] RIBIERO João-Paulo, Dossier Technique de l’ingénieur, nm5115, Nanofluides pour les applications thermiques, 2009
- [22] Thèse de Master intitulé : Développement thermique de l’écoulement d’un nanofluide entre deux plaques parallèles soutenu en 2021 par Bouafia Okba, Université de Biskra.
- [23] Aghamajidia, M., Yazdi, M.E., Dinarvand, S., Pop, I., “Tiwari-Das Nanofluid model for magnétohydrodynamiques (MHD) naturel-convective flow of a Nanofluid adjacent to a spinning down-pointing vertical cône,” *Propulsion and Power Research*, Vol. 7, pp.78-90, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2018.02.002>
- [24] Laouari, A., Mahfoud, B., Bessaïh, R., Hadjadj, A., “Hydrodynamic instabilities in swirling flow under axial magnetic field,” *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol.85,pp.2021./ 245–260. [10.1016/j.euromechflu.2020.08.006](https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2020.08.006)
- [25] Escudier, M., [1984] « Observations de l’écoulement produit dans un récipient cylindrique par un Mur d’extrémité. Expériences dans fluides », *Expériences dans les fluides* (2), 189-96. Doi: [10.1007/BF00571864](https://doi.org/10.1007/BF00571864)
- [26] Sheikholeslami, M., Hatami, M., Ganji DD, [2014] "Nanofluid flow and heat transfer in a rotate système dans la présence d’un magnétique domaine", *JMol.Liquide*. (190) ,112–120 <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2013.11.002>

[27] Bachok, N., Ishak, A., Ioan P., [2011] “Flow and heat transfer over a rotating porous disk in a nanofluid, *Physica B: Condensed Matter* 9(406),1767-1772. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.02.024>

[28] **Mahfoud, B.**, “Enhancement Heat Transfer of Swirling Nanofluid Using an Electrical Conducting Lid”, **Journal of Thermo physics and Heat Transfer**, [DOI: 10.2514/1. T6550](https://doi.org/10.2514/1.16550)