

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mustapha Stambouli MASCARA

**Faculté des Sciences et des Sciences
Appliquées
Département de Génie électrique**
Laboratoire (LPQ3M), Université de Mascara, Algérie



Présenté pour l'obtention du doctorat en **Génie Electrique**
Option : **Electronique**

Thème

**Etude thermo convective d'un hybride dans une cavité avec
génération d'entropie**

Par : BELLAKHDAR Mohammed cherif

Évalue le 08 /06/2024

Par le jury composé :

- | | | |
|-------------------------|--------------|------------------------------|
| • Pr BOUADI Abed | Président | Université de Mascara |
| • Pr LAOUDJ Samir | Examineur | Université de Sidi Bel Abbas |
| • Dr LAIDOUDI Housseem | Examineur | Université d'Oran |
| • Dr KHELLAFI Habib | Examineur | Université de Mascara |
| • Pr AISSA Abderrahmane | Encadreur | Université de Mascara |
| • Pr SAHNOUN Mohammed | Co-Encadreur | Université de Mascara |

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie Allah de m'avoir accordé la volonté et la réussite durant ces travaux de thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, le Professeur AISSA Abderrahmane, pour m'avoir proposé ce sujet de thèse, m'avoir accueilli au sein du laboratoire, et pour son encadrement tout au long de mon apprentissage. Je le remercie également pour sa disponibilité, son indulgence, ainsi que pour ses précieux conseils et son soutien continu, qui ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à mon co-encadreur, Monsieur SAHNOUN Mohammed, pour avoir accepté de faire partie du jury de ma thèse. Je le remercie pour son soutien, ses conseils au début de ma thèse, ainsi que pour sa bienveillance et sa gentillesse.

Mes remerciements chaleureux vont au Professeur BOUADI Abed pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de ma thèse.

J'adresse également mes sincères remerciements aux rapporteurs, le Professeur LAOUDJ Samir de l'Université de Sidi Bel Abbes, le Dr LAIDOUDI Housseem de l'Université d'Oran, et le Dr KHELLAFI Habib de l'Université de Mascara, pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail.

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

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À ma très chère mère qui m'a soutenu et encouragé, que Dieu la protège.

À mon cher père qui m'a soutenu tout au long de ma vie.

À ma chère femme, à ma chère sœur Fatima, et à mon frère Daoud.

À mes petits Haithem, Lina, et Zaid, que Dieu les protège.

RÉSUMÉ

Le transfert de chaleur est l'un des principes fondamentaux de l'ingénierie, utilisé de manière omniprésente dans presque tous les secteurs. Pour ajouter ou éliminer la chaleur d'un système, des fluides caloporteurs sont employés, incluant à la fois des solides et des liquides. Les liquides, grâce à leur adaptabilité et polyvalence, sont largement utilisés. Cependant, les fluides caloporteurs conventionnels utilisés dans l'industrie possèdent des propriétés thermiques médiocres, ce qui limite leur capacité de transfert de chaleur.

Ces dernières années, une nouvelle classe de fluides caloporteurs, appelés nanofluides, a été développée. Ces fluides de conception avancée présentent des propriétés thermiques améliorées, les rendant très efficaces pour le transfert de chaleur. Afin de mieux comprendre l'influence de divers facteurs sur l'écoulement des nanofluides et leur comportement en matière de transfert de chaleur, une analyse détaillée de la convection naturelle des nanofluides a été réalisée à l'intérieur d'un récipient poreux exposé à un champ magnétique.

De plus, des recherches spécifiques ont été menées pour examiner la création d'entropie dans le flux de convection naturelle des nanofluides. Un modèle mathématique décrivant ce phénomène a été développé. Les équations non dimensionnelles résultantes ont été résolues à l'aide de la technique des éléments finis. Dans cette thèse, le flux de chaleur libre incompressible en régime stationnaire des nanofluides dans une cavité a été examiné à l'aide d'un programme de dynamique des fluides numérique.

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

ملخص

يعد نقل الحرارة أحد المبادئ الهندسية الأساسية . يتم استخدام نقل الحرارة بطريقة ما في كل قطاع تقريبًا. لإضافة أو إزالة الحرارة من النظام ، يتم استخدام وسط نقل الحرارة ، بما في ذلك المواد الصلبة والسوائل. نظرًا لأنها قابلة للتكيف ومتعددة الاستخدامات ، يتم استخدام السوائل على نطاق واسع. ومع ذلك ، فإن سوائل نقل الحرارة التقليدية المستخدمة في الصناعة لها خصائص حرارية رديئة وبالتالي ، لديهم قدرة محدودة على نقل الحرارة. في السنوات الأخيرة ، تم تطوير فئة جديدة من سوائل نقل الحرارة تسمى السوائل النانوية. هذه السوائل المصممة هندسيًا تملك خصائص حرارية محسنة مما يجعلها مستقبلاً لسوائل نقل الحرارة . من أجل فهم تأثير العوامل المختلفة على تدفق السوائل النانوية وسلوك نقل الحرارة بشكل أفضل ، تم إجراء تحليل مفصل للحمل الحراري الطبيعي للسوائل النانوية داخل حاوية مسامية معرضة لمجال مغناطيسي. بالإضافة إلى ذلك ، تم إجراء بحث محدد للنظر في كيفية إنشاء الانتروبيا في تدفق الحمل الحراري الطبيعي للسوائل النانوية. تم بناء النموذج الرياضي الذي يشرح هذه الظاهرة في هذه الأطروحة ، تم فحص التدفق الحراري الحر غير القابل للضغط للحالة المستقرة للسوائل النانوية في حاوية باستخدام برنامج ديناميكيات السوائل .

Nomenclature

CP	Capacité thermique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{° C}^{-1}$)
B	Induction magnétique (T)
B ₀	Intensité du champ magnétique (A/m)
Da	Numéro Darcy
d _p	Diamètre moyen des particules ou des fibres (m)
K	Perméabilité (m^2)
k	Conductivité thermique ($\text{Wm}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
k _{eff}	Conductivité thermique effective ($\text{Wm}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Nu	Numéro Nusselt
P.	Pression sans dimension
p	Pression (Pa)
g	Accélération due à la gravité (m/s^2)
h	Coefficient de transfert de chaleur ($\text{W/m}^2/\text{K}$)
Pr	Numéro Prandtl
Râ	Numéro de Rayleigh
Ha	Numéro de Hartmann
T	Température (K)
ΔT	Différence de température (K)
T _w	Température du mur (K)
T _∞	Une température ambiante (K)
q	Flux thermique par convection (W/m^2)
h	Coefficient de transfert de chaleur ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
$\Delta P/L$	Gradient de pression dans le sens de l'écoulement (Pa/m)
v	Composantes de vitesse non dimensionnelles (m/s)
U, V	Magnitude de la vitesse sans dimension

L	Longueur caractéristique (m)
VD	Vitesse darcienne
N	Numéro d'ondulation

Symboles grecs

φ	Fraction volumique solide (nanoparticules)
α	de chaleur ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
β	Coefficient de diffusion thermique (k^{-1})
ε	Porosité
μ	Viscosité dynamique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
μ_{eff}	Viscosité dynamique effective ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
ν	Viscosité cinématique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
ρ	Densité du fluide ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
θ	Température adimensionnelle
σ	Conductivité électrique
λ	Perméabilité du milieu.

Indices

c	Froid
eff	Efficace
F	Fluide (fluide de base)
h	Chaud
s	Solide (nanoparticules)
nf	Nanofluide
np	Nanoparticules

Liste des figures

Figure 1 Convection naturelle à l'intérieur d'une pièce (enceinte rectangulaire)	7
Figure 2 Cavité rectangulaire horizontale et verticale	8
Figure 3 Cellules cylindriques oscillantes	9
Figure 4 Cavité rectangulaire horizontale avec $\tau = 180^\circ$	9
Figure 5 Flux cellulaire	10
Figure 6 Milieu poreux naturel : (a) pierre concassée (b) �ponge poreuse [11]	11
Figure 7 Milieux poreux artificiels : (a) mousse d'aluminium, (b) céramiques poreuses [12]	13
Figure 8 Conductivité thermique de certains métaux, fluides non métalliques et fluides de base [115]	21
Figure 9 Nanofluides Fe ₃ O ₄ -Eau préparés à l'aide d'un procédé en deux étapes	23
Figure 10 Variété d'applications des nanofluides	25
Figure 11 Classification des nanofluides	28
Figure 12 Nombre d'articles de recherche publiés sur les nanofluides entre 1995 et 2022 [117]	30
Figure 13 Le domaine de calcul : (a) vue 3D de la chambre, (b) vue 2D de la géométrie et (c) maillage de grille	33
Figure 14 Comparaisons du modèle actuel avec des travaux antérieurs [47]	38
Figure 15 Tracés de surface de la vitesse, de la température et du nombre de Bejan pour différentes valeurs et directions de vitesse de cylindre	43
Figure 16 Surface plots of velocity, temperature, and Bejan number for various Hartmann numbers	45
Figure 17 Tracés de surface de la vitesse, de la température et du nombre de Bejan pour divers nombres d'ondulation	47
Figure 18 Surface plots of the velocity, temperature, and Bejan number for various Darcy number values	49
Figure 19 Impact du nombre de Darcy sur Nu_{avg} et Be_{avg} pour différentes vitesses de rotation des cylindres	51
Figure 20 Impact du nombre de Hartmann sur la moyenne de Nu et la moyenne de Be pour différentes vitesses de rotation des cylindres	53
Figure 21 Influence du nombre d'ondulations sur Nu_{avg} et Be_{moy} pour différentes vitesses de rotation des cylindres	54

Liste des tables

Tableau 1. Propriétés thermophysiques des nanoparticules et des fluides de base [38,39]	33
Tableau 2. Corrélations utilisées pour estimer les propriétés des nanofluides classiques et hybrides [44,45]	36
Tableau 3. Différentes tailles de mailles pour $Ha = 0$, $\Omega = 0$ et $\varphi = 0,02$	37
Tableau 4. Résumé des recherches menées par des moyens numériques et expérimentaux sur la convection naturelle des nanofluides	61

Table des matières

REMERCIEMENTS	III
Dédicace	IV
RÉSUMÉ	V
ملخص.....	VI
Nomenclature	VII
Symboles grecs	VIII
Indices	VIII
Liste des figures	IX
Introduction	2
Chapitre I: Généralités et littératures	3
1. Introduction	4
2. Généralités	4
1.1. Mécanisme de Transfert de Chaleur.....	4
1.2. Magnétohydrodynamique.....	10
1.3. Matériau poreux	10
1.4. Nanofluide.....	14
1.5. Publication de la Littérature	23
3. Conclusion.....	24
Chapitre II :Des recherches menées par des moyens numérique et expérimentaux sur la convection	26
1. Convection des nanofluides dans un environnement poreux	27
2. Convection de nanofluides dans un champ magnétique.....	31

Chapitre III: Model mathématique	49
1. Introduction	50
2. Modèle Mathématique	50
4. Équations de conservation (EC) dans la zone poreuse	51
1.6. Paramètres non dimensionnels :	52
1.7. Conditions aux limites des équations gouvernantes:	52
5. Corrélations pour les Propriétés Thermophysiques Les corrélations suivantes (tableau 2) sont utilisées pour déterminer les propriétés thermophysiques des nanoliquides hybrides :	54
6. Génération de l'Entropie	55
1.8. Entropie due aux effets thermiques <i>Sht</i> :	55
1.9. Entropie due aux effets visqueux <i>Sff</i> :	55
1.10. Entropie due aux effets magnétiques <i>Smf</i>	56
7. Génération d'Entropie sous Forme Non Dimensionnelle	56
8. Entropie thermique non dimensionnelle <i>SHT</i> :	56
9. Entropie visqueuse non dimensionnelle <i>SFF</i> :	56
10. Entropie magnétique non dimensionnelle <i>SMF</i> :	57
1.11. Nombre de Bejan	57
1.12. Les Nombres de Nusselt	57
1.13. Nombre de Nusselt local <i>Nuloc</i>	57
1.14. Nombre de Nusselt moyen <i>Nuavg</i>	57
11. Résolution Numérique	57
12. Validation et Évaluation du Maillage	58
1.15. Validation du Modèle Numérique	58

1.16.	Méthodologie et Validation	59
1.17.	Critère de Convergence	59
Chapitre VI:résultat et discussion		60
13.	Effet de la vitesse et de la direction de rotation	61
14.	Effet du nombre de Hartmann.....	63
15.	Effet du nombre d'ondulations des parois ondulées.....	66
16.	Effet du nombre de Darcy	68
17.	Parcelles détaillées pour l'étude paramétrique	69
1.18.	Impact du nombre de Darcy et de la vitesse/direction de rotation	69
1.19.	Impact du nombre de Hartmann	71
1.20.	Impact du nombre d'ondulations des parois ondulées	72
Conclusion Général et Perspective au Future.....		74
References.....		77

Introduction

Introduction

Au cours des dernières décennies, l'écoulement convectif de fluides dans un milieu poreux a suscité un intérêt considérable parmi les chercheurs. Cela s'explique non seulement par la présence omniprésente des fluides dans la nature, mais aussi par leurs nombreuses applications industrielles. Cependant, l'étude des fluides est complexe et nécessite des connaissances approfondies en mathématiques, physique et chimie. Ces fluides possèdent des propriétés rhéologiques très variées, et notre intérêt se porte sur l'étude thermo-convective d'un hybride dans une cavité.

Récemment, l'application combinée de la magnétohydrodynamique et des milieux poreux a attiré de plus en plus d'attention en raison de la diversité et de l'étendue de ses domaines d'application. Les équations de Darcy, lorsqu'elles sont couplées aux équations de Maxwell et appliquées aux fluides non-newtoniens, posent des problèmes dynamiques complexes et mettent en lumière des interactions peu étudiées dans la littérature.

Dans nos travaux, nous menons une étude numérique et analytique de la convection dans un fluide non-newtonien saturant une cavité soumise à un champ magnétique extérieur, constant et uniforme. Pour la résolution numérique, nous utilisons la méthode des différences finies. Pour l'étude analytique, nous adoptons l'approximation de l'écoulement parallèle.

L'objectif est d'étudier l'influence de l'intensité d'un champ magnétique, caractérisé par le nombre de Hartmann, sur la structure de l'écoulement et le transfert de chaleur dans un milieu poreux saturé par un fluide non-newtonien.

Le premier chapitre est consacré à rappeler les notions fondamentales de la magnétohydrodynamique, ainsi que de la convection naturelle, forcée et mixte dans les milieux poreux. Une étude bibliographique focalisée sur les effets magnétiques sur la convection naturelle est également présentée.

Le deuxième chapitre présente un résumé des recherches menées par des moyens numériques et expérimentaux sur la convection naturelle des nanofluides.

Dans le chapitre 3, nous présentons le modèle mathématique décrivant la convection mixte à l'intérieur d'une cavité triangulaire 3D équipée d'un cylindre rotatif interne et d'une paroi inférieure ondulée, le tout dans un milieu poreux saturé de nanofluides hybrides. Un nanofluide hybride est établi lorsque deux nanoparticules distinctes, Fe_3O_4 et MWCNT, sont en suspension dans de l'eau pure.

Nous montrons dans le chapitre 4 l'effet du champ magnétique et l'impact de divers facteurs, tels que le nombre de Darcy, le nombre de Hartmann, la vitesse du cylindre et le nombre d'ondulations des parois, sur les caractéristiques d'écoulement et de transfert de chaleur. Ces résultats sont représentés à travers des visualisations 3D et des diagrammes de profil 2D, en mettant en lumière les lignes de courant et les isothermes de température.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale qui met en évidence les résultats pertinents et les perspectives de ce travail de recherche.

Chapitre I: Généralités et littératures

1. Introduction

Ce chapitre présente l'essentiel de cette thèse, avec une brève introduction aux matériaux poreux, à la convection naturelle et à la magnétohydrodynamique. Ensuite, nous introduisons les nanofluides en examinant leurs divers aspects, processus de fabrication, utilisation et avantages.

2. Généralités

1.1. Mécanisme de Transfert de Chaleur

Le transfert de chaleur entre deux systèmes se produit en raison de différences de température. L'évaluation de ce taux de transfert d'énergie est cruciale pour comprendre le transfert de chaleur. La chaleur se déplace toujours d'un milieu à une température plus élevée vers un autre à une température plus basse jusqu'à ce que les deux atteignent un équilibre thermique. Trois mécanismes assurent ce transfert : conduction, convection et rayonnement. L'interaction de ces mécanismes détermine la distribution de chaleur dans un système. Une brève description de chaque mode de transfert est fournie ci-dessous (T. L. Bergman, 2011)[1].

1.1.1. Convection

Dans le cadre des études sur le transfert de chaleur, la convection, où la vitesse relative du fluide facilite le transfert de chaleur et de matériaux, a attiré beaucoup d'attention. L'étude de la convection est liée à la dynamique des fluides et au transfert de chaleur, permettant l'évaluation de l'énergie que le fluide transmet dans le système. La convection et la conduction sont étroitement liées dans les fluides, car le mouvement du fluide influence le mécanisme de transport, même si la chaleur circule inévitablement par conduction entre les éléments fluides (D. A. Nield and A. Bejan, 2006).[2]

Le transfert de chaleur par convection présente deux aspects principaux :

1. **Convection naturelle** : se produit lorsque la différence de température engendre spontanément un mouvement de fluide.
2. **Convection forcée** : un mouvement de fluide est provoqué par des forces externes.

L'objet principal de cette thèse est la convection naturelle, où le mouvement du fluide est causé par des forces de gravité et des différences de densité. Ces forces induisent un écoulement de

fluide sans intervention extérieure. La présence d'au moins deux sources, une chaude et une froide, est essentielle, car les changements de température influencent la densité du fluide, provoquant ainsi des forces de flottabilité. Mesurer qualitativement et quantitativement le transfert de chaleur par convection naturelle est extrêmement difficile, car l'intensité des courants de fluide dépend du gradient de température, nécessitant souvent une analyse numérique plutôt que théorique. [3], [4].

Le principe fondamental régissant le transfert de chaleur par convection est la loi de Newton du refroidissement. Le taux de transfert de chaleur par convection est gouverné par cette équation, où la transmission de chaleur est proportionnelle à la différence de température :

$$q = h \times \Delta T \quad (1)$$

où : q est le flux de chaleur par convection, h est le coefficient de transfert de chaleur et ΔT est la différence de température.[5].

Les études sur le transfert de chaleur par convection utilisent principalement deux nombres sans dimension pour caractériser la convection naturelle. Le premier, appelé le nombre de Nusselt (Nu), quantifie la fraction de transfert de chaleur convectif par rapport à la conduction à travers la limite d'un fluide :

$$Nu = \frac{\text{Convective heat transfer}}{\text{Conductive heat transfer}} = \frac{h}{k/L} = \frac{hL}{k} \quad (2)$$

Où : h est le coefficient de transfert de chaleur par convection de l'écoulement, L est la longueur caractéristique et k est la conductivité thermique du fluide.

Le second est le nombre de Rayleigh (Ra), qui est associé à l'écoulement entraîné par la flottabilité. Il définit le régime d'écoulement du fluide, avec des valeurs élevées indiquant un écoulement turbulent et des valeurs basses indiquant un écoulement laminaire. En dessous d'une certaine valeur de Ra, il n'y a pas de mouvement de fluide, et la conduction est utilisée pour le transport de chaleur.

1.1.2. Convection Naturelle dans les Enceintes

1. Enceintes Rectangulaires

Dans une enceinte rectangulaire, comme illustré à la **Figure 1.1**, un dispositif de chauffage à l'intérieur d'une pièce repose sur des courants de convection naturels pour chauffer la pièce.

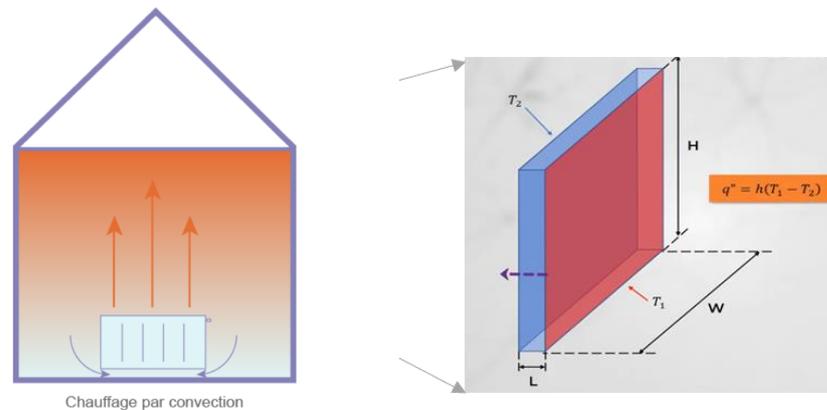


Figure 1.1 : Convection Naturelle à l'intérieur d'une pièce (enceinte rectangulaire)

Considérons une cavité rectangulaire de dimensions L , W et H . Les deux parois opposées ont des températures T_1 et T_2 , telles que $T_1 > T_2$. Les quatre autres parois sont considérées comme adiabatiques. Cette différence de température induit la convection naturelle, et le flux de chaleur total à travers la cavité est donné par la relation (1). Lorsque la cavité est vue de côté, la hauteur de la cavité (H) est à un angle d'inclinaison τ avec le plan horizontal. Lorsque cet angle d'inclinaison est égal à 0 , la cavité est horizontale et la paroi inférieure est chauffée. Lorsque $\tau = 90$ degrés, la cavité est verticale avec la paroi latérale chauffée, comme le montre la **Figure 1.2**.

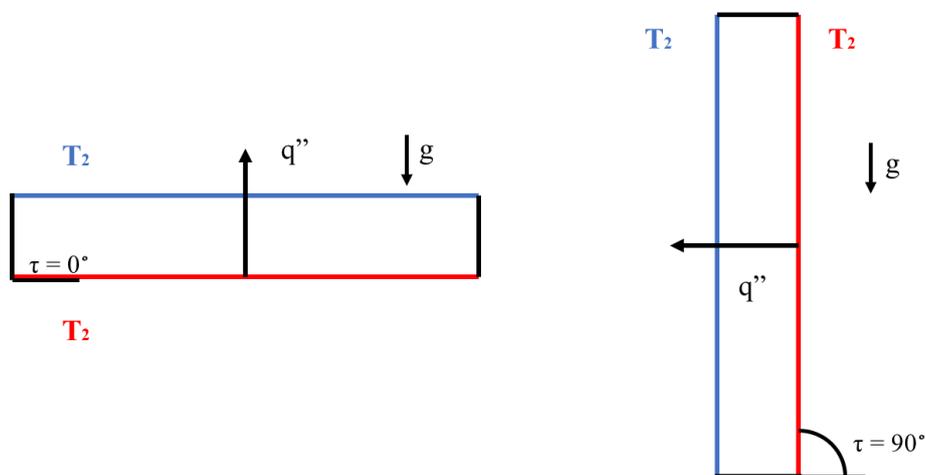
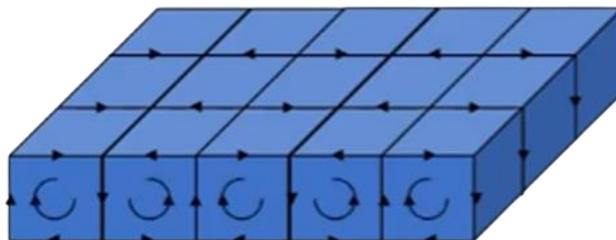


Figure 1.2 : Cavité rectangulaire horizontale et verticale

Le transfert de chaleur d  à la convection naturelle dans une cavité horizontale est très diff rent de celui dans une cavité verticale. En plus de l'angle d'inclinaison, le flux de chaleur global dans ces cavités dépend également des rapports d'aspect de la cavité H/L et W/L.

Le nombre sans dimension de Rayleigh (Ra), qui détermine quand un écoulement passe à la turbulence, définit le comportement de l'écoulement du fluide. Les forces de flottabilité ne sont pas assez fortes pour surmonter la résistance visqueuse du fluide dans les cavités minces où les rapports H/L et W/L sont inférieurs à 1, et où la valeur critique de Rayleigh est inférieure à 1708. Dans ces conditions, il n'y a pas d'advection de fluide, et la conduction et le rayonnement sont les principaux modes de transfert de chaleur à travers la cavité (le cas échéant). Dans ce cas, le nombre de Nusselt est approximativement égal à 1. Comme le nombre de Rayleigh augmente au-delà de la valeur critique de 1708, la force de flottabilité, qui résulte de la différence de densité entre les zones de fluide chaud et froid, peut surpasser la résistance visqueuse du fluide. La convection naturelle augmente le transfert de chaleur global et le fluide commence à circuler à l'intérieur de la cavité. Un schéma d'écoulement intéressant est observé à l'intérieur de la cavité rectangulaire dans les enceintes horizontales pour des nombres de Rayleigh modestes compris entre 1708 et 5×10^4 . Un motif de cellules de rouleaux contrarotatives uniformément espacées dans la cavité est créé par le mouvement du fluide, comme le montre la **Figure 1.3**.   des nombres de Rayleigh plus élevés, ce modèle de mouvement fluide uniforme se transforme en turbulence.

**Figure 1.3 : Cellules cylindriques oscillantes**

Enfin, aucune convection naturelle ne peut exister lorsque la paroi supérieure est à une température plus élevée que la paroi inférieure (voir **Figure 1.4**). Cela implique que les seuls modes de transfert de chaleur à l'intérieur d'une cavité rectangulaire avec un angle d'inclinaison de 180 degrés sont la conduction et le rayonnement (le cas échéant).

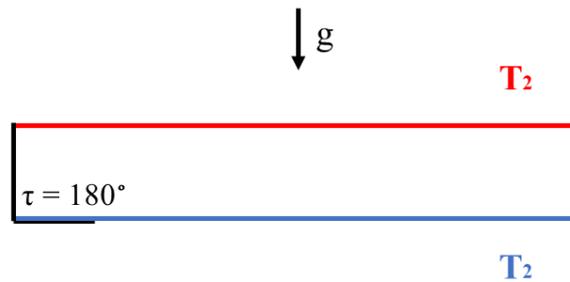


Figure 1.4 : Cavité rectangulaire horizontale avec $\tau=180^\circ$

Dans le cas de cavités rectangulaires verticales ($\tau = 90$ degrés), des observations similaires peuvent être faites. Deux des parois latérales opposées sont maintenues chaudes et froides dans ce cas. Le haut et le bas, ainsi que les quatre autres parois, sont adiabatiques. Jusqu'à un nombre de Rayleigh critique d'environ 10^3 , la force de flottabilité n'est pas assez forte pour vaincre la résistance visqueuse et le nombre de Nusselt est approximativement égal à 1. Comme le montre la **figure 1.5**, lorsque le nombre de Rayleigh augmente au-delà de 10^3 , un écoulement de recirculation est observé à l'intérieur de l'enceinte verticale, ce qui fait que le fluide monte et descend près des parois chaudes et froides, respectivement.

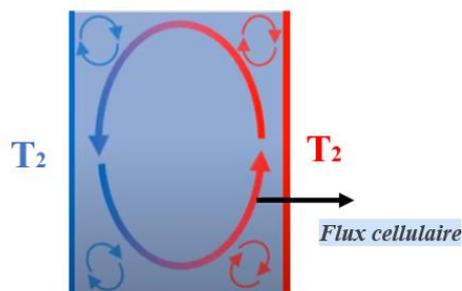


Figure 1.5 : Flux cellulaire

Ce flux cellulaire dans l'enceinte est plus fort près des parois chaudes et froides. Au centre de la cavité, le fluide est presque stagnant. Il est crucial de noter que des cellules supplémentaires peuvent se développer à proximité des coins de l'enceinte. L'écoulement du fluide passe à la turbulence au fur et à mesure que le nombre de Rayleigh augmente.

2. Enceintes Constituées de Cylindres Centrés

Le cylindre intérieur est considéré comme l'élément chauffant dans l'eau de chauffage d'une chaudière cylindrique. Dans cet exemple, le transfert de chaleur avant que l'eau ne commence à bouillir est principalement entraîné par la convection naturelle à l'intérieur d'une enceinte cylindrique concentrique. La chaleur est transférée entre les cylindres intérieur et extérieur à travers l'espace annulaire entre eux, comme le montre la **Figure 1.6**. Le fait que le cylindre intérieur soit plus chaud ou plus froid que le cylindre extérieur détermine la façon dont le fluide circule dans cet espace.

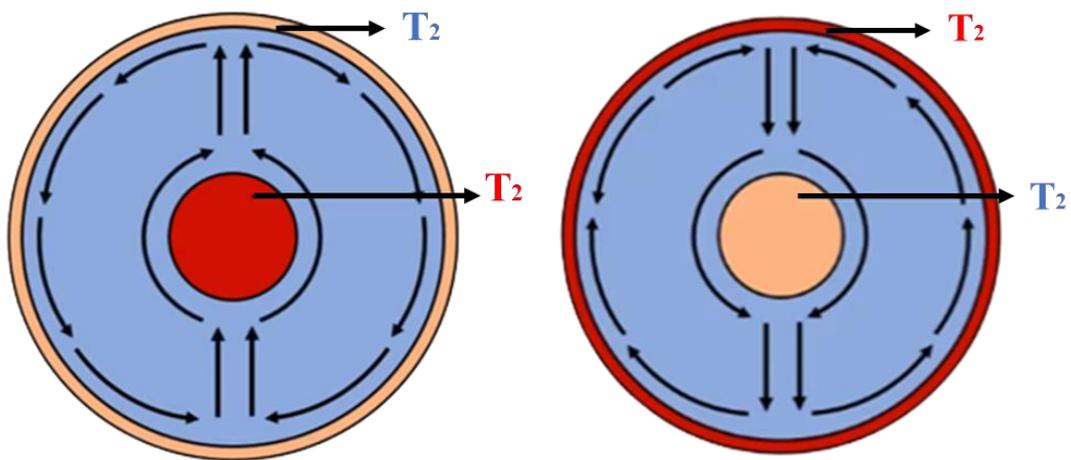


Figure 1.6 : Écoulement de convection à l'intérieur de l'enceinte annulaire

Lorsque le cylindre intérieur est plus chaud par rapport au cylindre extérieur ($T_2 > T_1$), le fluide se déplace dans la cavité de telle sorte qu'il monte le long de la paroi intérieure du cylindre et descend le long de la paroi extérieure du cylindre. Ce mouvement crée une région de recirculation à l'intérieur de l'espace annulaire entre ces cylindres, comme le montre le côté

gauche de la **Figure 1.6**. Ce mouvement est inversé si le cylindre extérieur est plus chaud que l'intérieur (côté droit de la Figure 16).

1.2. Magnétohydrodynamique

La magnétohydrodynamique (MHD), également connue sous le nom de dynamique magnétofluide ou hydromagnétique, est l'étude du comportement des fluides conducteurs d'électricité. Ces fluides comprennent des liquides métalliques, des électrolytes, de l'eau salée et des plasmas. Le terme « magnétohydrodynamique » fait référence au mouvement des fluides sous l'influence des champs magnétiques. Le domaine de la MHD a été fondé par Hannes Alfvén, qui a remporté le prix Nobel de physique en 1970[6]. Le principe fondamental de la MHD est que les champs magnétiques peuvent créer des courants dans des fluides conducteurs en mouvement, ce qui entraîne des forces sur le fluide et modifie le champ magnétique. Les équations de Navier-Stokes en dynamique des fluides et les équations électromagnétiques de Maxwell constituent l'ensemble des équations régissant la MHD. Il est nécessaire de résoudre simultanément, numériquement ou analytiquement, ces équations différentielles.

Le modèle MHD est basé sur la loi de force de Lorentz. Selon l'équation de force de Lorentz, une force est exercée sur une particule chargée voyageant dans un champ électromagnétique (P. A. Davidson, 2002)[7] :

$$\vec{F} = Q(\vec{u} \times \vec{B}) \quad (3)$$

Où:

\vec{F} : est la force agissant sur une particule chargée,

Q : est la charge de la particule,

\vec{u} : est la vitesse de la particule,

\vec{B} : est l'induction magnétique.

1.3. Matériau poreux

L'utilisation de milieux poreux est une stratégie intrigante pour l'amélioration du transfert de chaleur dans les systèmes industriels, par exemple, l'utilisation de matériaux poreux à base de métaux tels que les mousses de cuivre dans les tuyaux des échangeurs de chaleur.[8]

Les milieux poreux sont des solides, pénétrés par un réseau de pores à travers lequel le fluide peut se déplacer. Dans la nature et l'industrie, les matériaux poreux sont courants. Des exemples incluent le calcaire poreux, le grès, le bois, le pain de seigle et le poumon humain. Les mousses métalliques et non métalliques, les lits garnis et les céramiques poreuses sont des exemples de milieux poreux artificiels souvent utilisés dans des applications industrielles [9], [10]., tels que les échangeurs de chaleur. Les **Figures 1.7** et **1.8** montrent des exemples de milieux poreux naturels et artificiels respectivement.



Figure 1.7 : Milieu poreux Naturel : (a) pierre concassée (b) Ponge poreux [11]

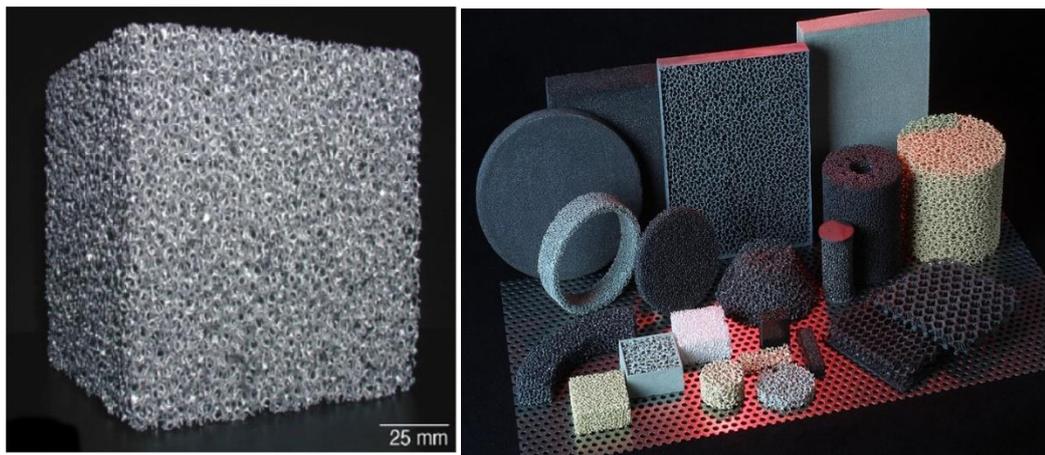


Figure 1 : Milieux poreux artificiels : a) mousse d'aluminium, b) céramiques poreuses
Écoulement de fluide dans un milieu poreux

L'écoulement des fluides à travers un milieu poreux est présent dans divers domaines des sciences et du génie, tels que la filtration, la séparation, la purification, la mécanique, la science des matériaux, la biologie, les géosciences biophysiques et l'ingénierie. L'écoulement dans les matériaux poreux est complexe en raison de la structure complexe des milieux poreux et des interactions entre les phases fluide et solide. Les évaluations locales de la dynamique des fluides au niveau des pores sont difficiles à réaliser en raison de la géométrie complexe des voies d'écoulement. [13] - [15] [12]

1.3.1. Loi de Darcy

Darcy a établi un lien linéaire entre la perte de charge et le débit dans le fluide s'écoulant à travers le sable tassé (un milieu poreux). En ajoutant la viscosité du fluide, la relation, connue sous le nom de Loi de Darcy, s'exprime comme suit [2] :

$$V_D = -\frac{K \Delta P}{\mu L} \quad (4)$$

Où:

V_D : est la vitesse darcienne,

μ : est la viscosité du fluide,

K : est la perméabilité du milieu poreux,

$\Delta P/L$: est le gradient de pression dans la direction de l'écoulement.

La vitesse darcienne est le débit volumique divisé par toute la section transversale du milieu poreux. La force visqueuse prédomine dans l'écoulement de Darcy dans un milieu poreux. La loi de Darcy ne s'applique que lorsqu'un fluide monophasé s'écoule à une vitesse suffisamment lente à travers un milieu poreux. La loi de Darcy, l'équation de Darcy étendue de Forchheimer et l'équation d'Ergun sont les fonctions les plus connues décrivant le lien entre la perte de charge et la vitesse dans les milieux poreux. [17], [18].

1.3.2. Effets des facteurs de fluide et de structure sur l'écoulement poreux

Les propriétés structurelles du milieu poreux ont un impact significatif sur la perte de charge, la distribution du champ de vitesse et le nombre de régimes de Reynolds. La littérature étudie de

manière approfondie les effets de la porosité, de la taille des particules, de la forme des pores et des propriétés d'écoulement sur la dynamique d'écoulement du fluide dans une structure poreuse. [19] , [21].

1. Porosité

La porosité d'un matériau poreux est le pourcentage du volume total du milieu occupé par des espaces vides. Plus il y a de pores et moins de restrictions solides dans la structure, plus le fluide peut s'écouler facilement. La porosité est l'un des facteurs les plus importants qui affectent le comportement de l'écoulement poreux[22]. La porosité peut être définie comme suit si le volume entier du milieu et le volume solide sont connus :

$$\epsilon = \frac{V_s}{V_t} \quad (5)$$

Où :

ϵ : est la porosité,

V_s : est le volume de la phase solide,

V_t : est le volume total du milieu.

2. Perméabilité

La perméabilité d'un milieu poreux mesure la facilité avec laquelle un fluide s'écoule à travers lui. Plus la perméabilité est grande, plus le débit pour une différence de pression donnée est élevé. Comme indiqué ci-dessous[23], la perméabilité peut être calculée en utilisant la théorie de CarmanKozeny:

$$K = \frac{\epsilon^3 d_p^2}{180(1-\epsilon)^2} \quad (6)$$

Où d_p est le diamètre moyen des particules ou des fibres.

1.4. Nanofluide

1.4.1. Introduction

Plusieurs technologies, telles que les microprocesseurs à grande vitesse, les équipements d'application laser, les aimants supraconducteurs et les échangeurs de chaleur, nécessitent des systèmes de refroidissement à transfert de chaleur élevé. En raison des taux de transfert de chaleur croissants requis par les systèmes d'échange de chaleur actuels, les fluides thermiques existants avec de faibles conductivités thermiques ne peuvent plus répondre aux exigences de transmission de chaleur à haute intensité [27]-[28]. Les faibles propriétés thermiques des fluides caloporteurs limitent principalement la création d'échangeurs de chaleur très compacts et efficaces. De nombreuses techniques pour améliorer la transmission de chaleur dans ce type d'équipement ont été proposées. Une méthode efficace pour augmenter la conductivité thermique de certains fluides est la suspension de minuscules particules solides dans le fluide. Historiquement, les liquides thermiques étaient mélangés à des particules solides de taille millimétrique ou micrométrique[29]. Cependant, ces particules se déposent rapidement, obstruent les canaux d'écoulement, dégradent les pipelines et entraînent des baisses de pression, ce qui rend les additifs solides peu utiles malgré leur capacité à augmenter le coefficient de transfert de chaleur.[30]

En 1995, des chercheurs du Laboratoire national d'Argonne ont décrit une nouvelle classe de fluides caloporteurs potentiels appelés nanofluides. Ils sont produits en suspendant des particules nanométriques de métal ou de non-métal dans un fluide de base.[31] Au cours des dix dernières années, les nanosciences et les nanotechnologies ont apporté une nouvelle approche au problème de l'amélioration des performances des fluides caloporteurs, en particulier dans les applications de haute technologie, en développant des nanofluides (NF). Plusieurs résultats expérimentaux montrent que les nanofluides ont des conductivités thermiques nettement supérieures à celles des fluides purs traditionnels, ce qui ouvre la voie à une amélioration de la transmission de la chaleur. Parce que les nanoparticules sont si petites (généralement moins de 100 nm), qu'elles se comportent comme des fluides purs et qu'elles subissent peu ou pas de perte de charge, les nanofluides sont mieux adaptés à des applications pratiques que les techniques existantes pour améliorer le transfert de chaleur telles que l'ajout de particules millimétriques et/ou micrométriques dans les fluides. De plus, les nanoparticules sont moins susceptibles de causer de l'usure en raison de leurs minuscules diamètres. Les NF sont plus stables que les fluides contenant des particules de taille micrométrique ou millimétrique et ils transfèrent plus de

Chaleur que leurs fluides de base. Ces fonctionnalités ont un impact significatif sur un large éventail d'applications dans divers secteurs. En termes de coût, de conception globale, de fiabilité et de performance, les améliorations de la gestion thermique rendues possibles par les nanofluides augmenteront considérablement la génération future de diverses applications d'ingénierie. [33]-[34]

Facteurs Contribuant à l'Amélioration de l'Efficacité du Transfert de Chaleur par les Nanofluides

Les principaux facteurs qui ont contribué à l'amélioration de l'efficacité du transfert de chaleur par les nanofluides sont les suivants :

- **Turbulence et Fluctuations du Mélange Améliorées** : Les nanoparticules augmentent la turbulence microscopique, améliorant ainsi le mélange du fluide et l'homogénéité de la température.
- **Gradient de Température Transversal Réduit** : La dispersion homogène des nanoparticules aide à réduire le gradient de température transversale, augmentant l'efficacité de la dissipation thermique.
- **Capacité Thermique Accrue** : Les nanoparticules augmentent la capacité thermique du fluide, permettant une meilleure absorption de la chaleur.
- **Conductivité Thermique Améliorée** : La conductivité thermique accrue des nanoparticules améliore directement celle du fluide de base.
- **Interactions et Collisions Améliorées** : Les nanoparticules en suspension favorisent des interactions et des collisions plus fréquentes avec le fluide et les surfaces d'écoulement, améliorant le transfert de chaleur.

1.4.2. Composés Utilisés dans les Nanofluides

Selon la littérature, les nanoparticules (NP) peuvent inclure des composés métalliques/intermétalliques (tels que Cu, Ag, Fe, Ni, etc.) et des composés céramiques comme les sulfures, les oxydes et les carbures. Les substances à base de carbone telles que les nanotubes de carbone, le graphite, le graphène et d'autres peuvent également être utilisées pour créer des matériaux nanostructurés. Les liquides de base comprennent l'eau, l'éthylène glycol (EG), l'eau et l'éthylène glycol mélangés (W/EG), l'huile de noix de coco, le kérosène, le diéthylène glycol (DEG), la paraffine, le polyéthylène glycol, l'huile pour engrenages, l'huile végétale, l'huile de pompe, etc. [35] et [36]

1.4.3. Conductivité Thermique

La figure ci-dessous montre les conductivités thermiques de divers métaux et fluides. L'ajout de métaux aux fluides traditionnels, qui ont des conductivités thermiques supérieures à ces fluides, peut entraîner une augmentation du coefficient de transfert de chaleur total.

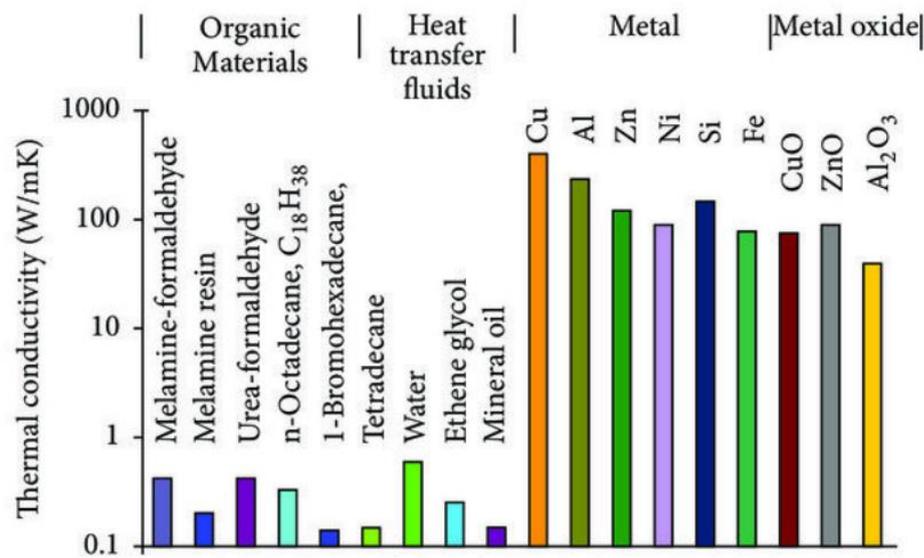


Figure 1.9 : Comparaison de la conductivité thermique de certains métaux, fluides non métalliques et fluides de base.[42]

La conductivité thermique des métaux est généralement beaucoup plus élevée que celle des fluides non métalliques et des fluides de base courants. Par exemple, le cuivre (Cu) et l'argent (Ag) présentent des conductivités thermiques extrêmement élevées, respectivement environ 400 W/m·K et 429 W/m·K. En revanche, la conductivité thermique des fluides de base, tels que l'eau (0,6 W/m·K) et l'éthylène glycol (0,25 W/m·K), est relativement faible. Cette différence significative explique l'intérêt pour les nanofluides contenant des nanoparticules métalliques pour améliorer les propriétés thermiques des fluides de base.

1.4.4. Les Nanofluides et leurs Applications

Le potentiel des nanofluides (NF) dans divers domaines a suscité un intérêt croissant depuis l'introduction de cette idée il y a plus de dix ans. Les nanofluides peuvent être utilisés dans de nombreux systèmes thermiques pour augmenter l'efficacité énergétique et le transfert de chaleur. La majorité des recherches sur les nanofluides sont menées dans des laboratoires nationaux et

des institutions académiques, dépassant le stade de la recherche axée sur la découverte. À mesure que leur potentiel est reconnu, de plus en plus d'entreprises participent activement au développement de la technologie des nanofluides pour certaines applications industrielles. [26], [37], [38]

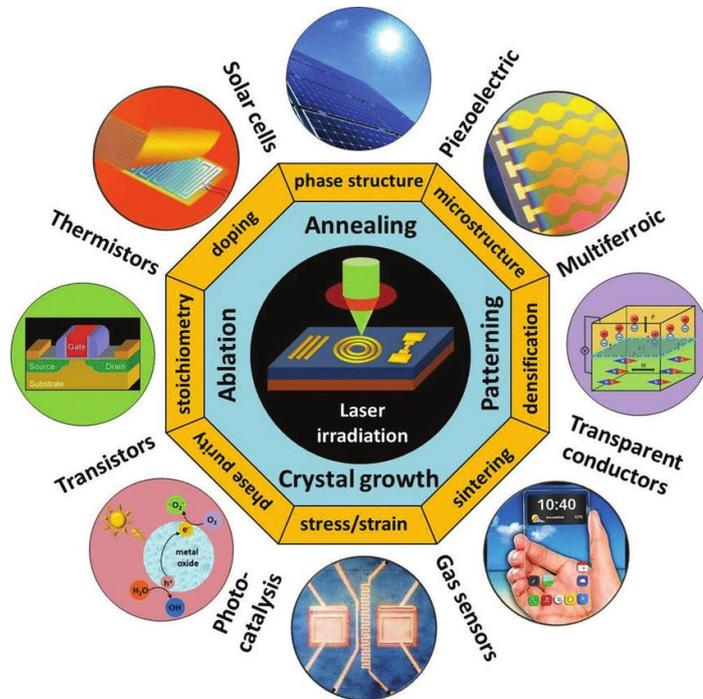


Figure 1.10 : Variété d'applications des nanofluides.

Parmi toutes les applications de transfert de chaleur, le potentiel des nanofluides a suscité le plus grand intérêt. L'éthylène glycol mélangé à l'eau, un liquide de refroidissement omniprésent pour les véhicules dans le secteur des transports, fonctionne aussi mal que l'eau seule comme fluide caloporteur. En ajoutant des nanoparticules au liquide de refroidissement traditionnel des moteurs, il est possible d'augmenter les vitesses de refroidissement des moteurs automobiles et des véhicules lourds. Cette modification peut permettre de dissiper la chaleur du moteur via un système de refroidissement plus petit. Dans le domaine de l'électronique, les densités de puissance des microprocesseurs et des circuits intégrés ont récemment augmenté de manière significative et devraient continuer à croître. Les nanofluides peuvent remplacer les méthodes de refroidissement par air et liquide actuelles pour évacuer cette chaleur, qui atteint récemment ses limites.

Selon la littérature, les nanofluides ont été utilisés dans une variété d'applications biomédicales et nanomédicales, y compris l'administration de nanomédicaments, les traitements contre le cancer, la détection et l'imagerie, ainsi que la nanocryochirurgie. Certains nanofluides ont été développés et utilisés efficacement dans le processus de récupération assistée du pétrole (RAH), les revêtements anticorrosifs, la modification de la mouillabilité et la technologie de forage, entre autres industries d'énergie non renouvelable comme l'industrie pétrolière. De nombreux articles présentent également le potentiel incroyable des nanofluides pour une utilisation dans les revêtements de surface, l'assainissement de l'environnement, la lubrification, l'impression à jet d'encre, le traitement des métaux et les additifs pour carburant. Certaines études dans la littérature rapportent également la capacité des nanofluides à améliorer la propriété d'absorption des fluides de travail traditionnels dans les capteurs solaires, lorsqu'ils sont utilisés dans la fabrication de matériaux avancés à changement de phase (PCM) pour le stockage de l'énergie thermique et l'absorption solaire.

1.4.5. Méthodes pour Préparer les Nanofluides

La fabrication de nanofluides implique bien plus que simplement mélanger et disperser des ingrédients solides dans un liquide de base. Le processus de synthèse est l'étape la plus cruciale pour utiliser des nanoparticules ou tout autre matériau nanostructuré afin d'améliorer les propriétés thermiques des fluides caloporteurs traditionnels. Une mauvaise préparation des nanofluides peut entraîner l'agglomération de particules solides dans les fluides de base, ce qui peut nuire aux propriétés thermophysiques des nanofluides. Une variété de méthodes ont été utilisées pour créer des suspensions de nanofluides, classées en deux principales catégories : la préparation en une étape et la préparation en deux étapes.

a. Méthode en Deux Étapes

La méthode la plus couramment utilisée, le processus en deux étapes, commence par la synthèse physique ou chimique des nanoparticules sous forme de particules sèches. Ensuite, des ultrasons sont utilisés pour disperser les nanopoudres sèches produites dans des liquides de base, comme le montre la figure ci-dessous.

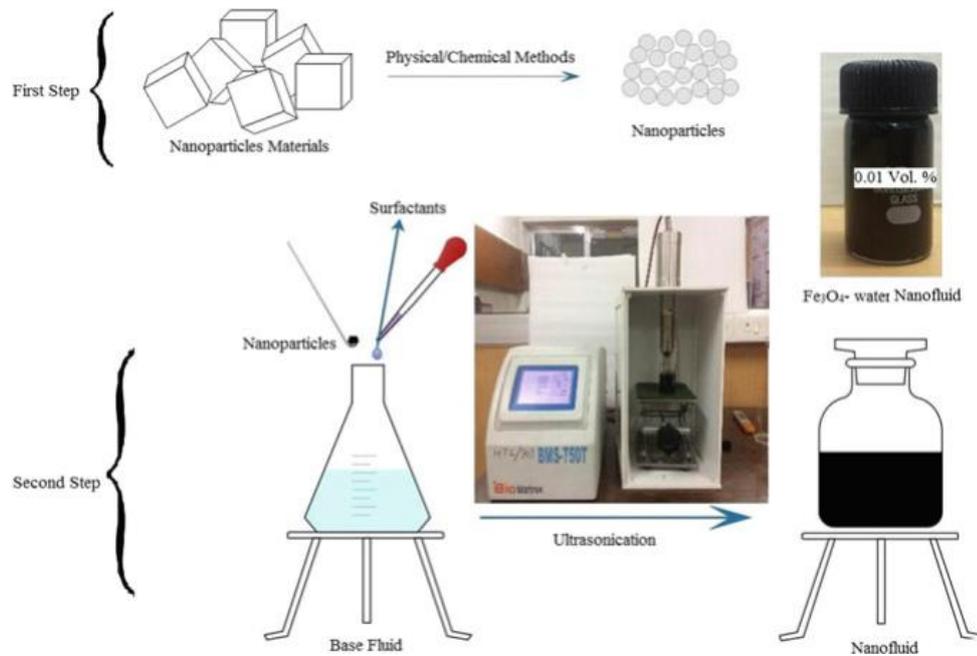


Figure 1.11 : Nanofluides Fe₃O₄-Eau préparés à l'aide d'un procédé en deux étapes.

Puisque les nanoparticules solides et les nanostructures sont déjà fabriquées en quantités commerciales, cette méthode est la meilleure option pour produire des nanofluides à grande échelle. Cependant, en raison de la forte activité de surface des nanoparticules, l'agglomération ou l'agrégation des nanoparticules est inévitable. Par conséquent, cette méthode tient compte de la possibilité que les nanoparticules sédimentent, ce qui a un effet négatif sur les qualités des nanofluides.[44]

b. Méthode en Une Étape

Dans la préparation en une étape, les nanoparticules sont créées et dissoutes instantanément dans le fluide de base. Il est possible d'utiliser une méthode chimique liquide ou un dépôt physique en phase vapeur pour y parvenir. Le dépôt physique en phase vapeur implique la vaporisation d'un métal solide et la condensation de la vapeur métallique en liquide à basse pression de vapeur. Dans une méthode chimique liquide, des nanoparticules sont directement créées dans le fluide de base grâce à une réaction chimique. La réduction de l'agrégation sèche des nanoparticules est un avantage courant de la création de nanofluides via un processus de préparation en une étape.[45]

1.4.6. Les Caractéristiques Thermophysiques des Nanofluides

Les caractéristiques thermophysiques des nanofluides (NF), telles que la conductivité thermique, la viscosité, la densité, la chaleur spécifique et le régime d'écoulement du fluide, doivent être prises en compte pour évaluer leur efficacité dans les applications de transfert de chaleur. Les

systèmes de nanofluides sont des suspensions complexes, et plusieurs facteurs peuvent influencer leurs propriétés thermophysiques et de transport, notamment la conductivité thermique, la viscosité et le coefficient de transfert de chaleur (HTC).[46]

a. Conductivité Thermique des Nanofluides

La caractéristique thermophysique la plus importante des nanofluides est la conductivité thermique, qui doit être étudiée pour déterminer la compétence de ces suspensions innovantes pour les applications de gestion thermique. La conductivité thermique affecte les nombres de Nusselt et de Prandtl, car ces deux paramètres influencent les propriétés de transport de chaleur d'un écoulement liquide. Pour que les nanofluides soient efficaces dans les applications de gestion thermique, une conductivité thermique plus élevée est nécessaire.[47]

b. Viscosité des Nanofluides

Il est crucial de noter qu'une conductivité thermique élevée ne suffit pas à elle seule pour qu'un nanofluide soit utilisé comme fluide caloporteur efficace. La conductivité thermique et la viscosité doivent être examinées pour choisir le nanofluide le plus efficace avec les meilleures propriétés pour les applications de refroidissement. Dans toutes les applications thermiques impliquant des fluides en écoulement, la viscosité se caractérise par la résistance interne d'un fluide à l'écoulement. La viscosité des nanofluides devrait être supérieure à celle de leurs liquides de base après l'ajout de nanoparticules ; cependant, cette augmentation peut avoir un effet négatif sur la puissance de pompage et le HTC.[48]

1.4.7. Les Bénéfices des Nanofluides

Les nanofluides améliorent considérablement le transfert de chaleur dans de nombreuses applications. La suspension de nanoparticules dans des fluides de base standard présente plusieurs avantages :

- **Augmentation de la Conductivité Thermique** : La conductivité thermique réelle du fluide augmentera considérablement.
- **Compatibilité avec les Systèmes Existants** : Très pertinent pour les systèmes actuels sans aucun changement significatif.
- **Propriétés Modifiables** : Les caractéristiques thermophysiques peuvent être ajustées pour répondre aux exigences de différentes applications.
- **Stabilité Améliorée** : Amélioration de la stabilité du fluide.
- **Mobilité des Nanoparticules** : La mobilité des nanoparticules augmente le transfert de chaleur.

- **Rapport Surface/Volume** : La transmission de la chaleur est améliorée lorsque le rapport surface/volume des particules est augmenté à l'échelle nanométrique.
- **Réduction de l'Agglomération** : Les nanoparticules agglomèrent moins et bloquent moins les circuits d'écoulement.

1.4.8. Les Différents Types de Nanofluides

Les nanofluides peuvent être regroupés de diverses manières. La figure ci-dessous illustre une approche générale pour classifier les types de nanofluides :

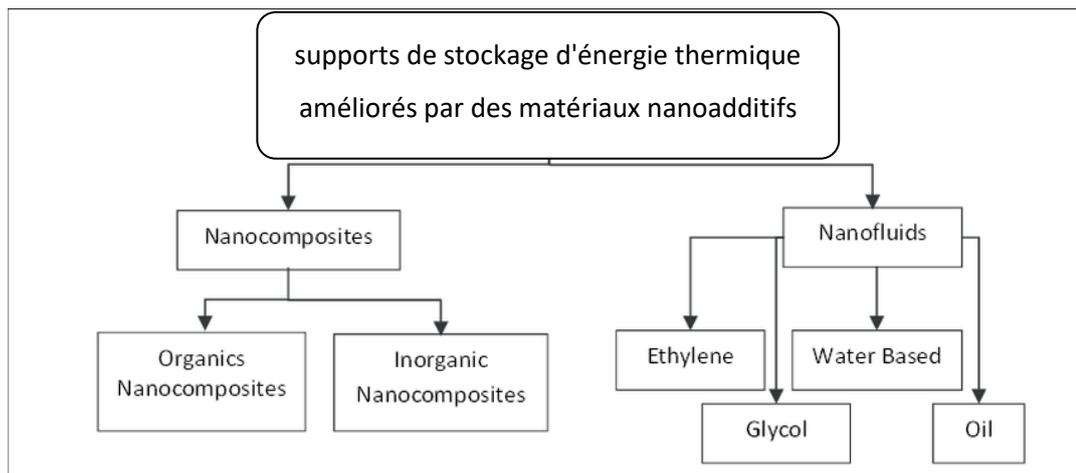


Figure 1.12 : Classification générale des types de nanofluides.

Les types de nanofluides peuvent être classés selon divers critères, tels que les matériaux des nanoparticules (métalliques, oxydes, carbures, etc.), les fluides de base (eau, éthylène glycol, huiles, etc.), et les méthodes de préparation (une étape, deux étapes). Ces classifications permettent de sélectionner et de développer des nanofluides spécifiques pour des applications précises en fonction des besoins de conductivité thermique, de viscosité, de stabilité et de compatibilité avec les systèmes existants.

1.4.9. Les Différents Types de Nanofluides

Les nanofluides peuvent être classés de différentes manières en fonction de divers critères, comme indiqué ci-dessous :

a. Sur la base des fluides :

Les nanoparticules sont dissoutes dans des fluides de base pour améliorer leurs caractéristiques thermophysiques. De nombreux fluides de base sont disponibles pour disperser de telles

nanoparticules. L'eau est largement utilisée dans les études sur les nanofluides en raison de ses propriétés favorables et de sa disponibilité.

b. En fonction de la nature des nanoparticules :

Les nanoparticules peuvent être fabriquées à partir d'oxydes métalliques (comme CuO, Al₂O₃, ZnO, Fe₂O₃, etc.), de métaux (comme l'or, le cuivre, l'argent, l'aluminium, etc.), et de matériaux à base de carbone. De nombreuses études ont examiné comment divers types de nanoparticules affectent la fonctionnalité et les caractéristiques thermophysiques des fluides de base traditionnels.

c. En fonction de la composition du nanofluide :

Les nanomatériaux dispersés dans un fluide peuvent être constitués d'un seul composant, d'un mélange ou d'une combinaison de deux ou plusieurs éléments. La quantité de chaleur transférée par le nanofluide dépend des nanoparticules dispersées, qui à leur tour dépendent de leurs caractéristiques fondamentales à l'échelle nanométrique. Une combinaison de deux composants ou plus, dont l'un est à l'échelle nanométrique, est appelée nanocomposite. Pour atteindre le résultat souhaité, il est essentiel que le matériau nanocomposite soit correctement choisi et synthétisé. Les nanofluides peuvent être classés en types standard et hybrides en fonction de la composition du nanomatériau dispersé.

d. Nanofluides standards ou mono-nanofluides :

Les nanofluides tels qu'ils ont été établis pour la première fois, généralement constitués d'un seul composant de nanomatériaux réparti dans toute la phase fluide, sont connus sous le nom de mono-nanofluides. Ce liquide peut contenir n'importe lequel des nanomatériaux mentionnés ci-dessus, à des concentrations et des tailles différentes. La nature ou le comportement des nanomatériaux est limitée au seul élément présent en raison de la simplicité impliquée.

e. Nanofluides hybrides :

Le besoin croissant de nanofluides aux caractéristiques améliorées a conduit au développement de nanofluides hybrides, qui utilisent deux composants ou plus présents individuellement dans le nanofluide ou liés les uns aux autres. L'agglomération dans les nanofluides à base de métaux purs et un transport thermique plus faible dans les nanofluides à base d'oxydes métalliques sont d'autres raisons pour le développement du concept de nanofluides hybrides.

f. Nanofluides magnétiques (ferrofluides) :

Les nanofluides magnétiques, ou ferrofluides, sont une suspension colloïdale de nanomatériaux ferromagnétiques. Ils ont fait l'objet de recherches approfondies et offrent un large éventail

d'applications, non seulement dans le domaine du transfert de chaleur, mais aussi dans les sciences médicales, biologiques, aérospatiales, électroniques et solaires, en raison de leurs propriétés uniques et fascinantes.

1.5. Publication de la Littérature

De nombreuses études expérimentales et numériques ont été menées sur les caractéristiques et les performances thermiques des nanofluides. La figure ci-dessous montre une croissance rapide du nombre de publications sur les nanofluides de 1995 à 2022. Pendant cette période, 30551 articles ont été publiés sur les nanofluides.

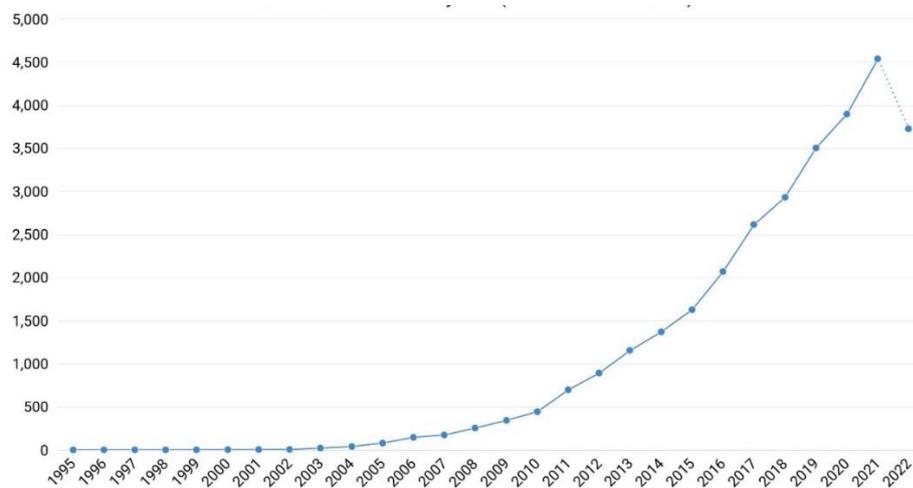


Figure 1.13 : Nombre d'articles de recherche publiés sur les nanofluides entre 1995 et 2022.[115]

Les équipes de recherche ont examiné une variété de tailles, de formes et de fractions volumiques de nanoparticules. La plupart des études informatiques se sont concentrées sur les performances thermiques des nanofluides dans diverses applications, tandis que la plupart des études expérimentales se sont concentrées sur l'amélioration de la conductivité thermique et de la stabilité des nanofluides. En raison de leurs nombreux avantages et de leur relative nouveauté, les nanofluides font encore l'objet de nombreuses recherches. Les sources pertinentes pour les enquêtes en cours sont discutées dans les paragraphes suivants.

Trois sujets distincts sont abordés dans cette revue de la littérature sur la convection naturelle des nanofluides : le flux et la transmission de chaleur des nanofluides dans les milieux poreux ; le comportement des nanofluides magnétiques sous divers paramètres de champ magnétique ; et

l'impact de divers paramètres géométriques sur la performance thermique d'un nanofluide dans une cavité.

3. Conclusion

Ce chapitre aborde en détail le transfert de chaleur par convection, la magnétohydrodynamique, les milieux poreux et les nanofluides. Pour clarifier et comprendre les caractéristiques de l'écoulement, le transfert de chaleur et les problèmes liés à l'évacuation de la chaleur par convection naturelle, une synthèse des différents travaux relatifs aux sujets a été réalisée. Il a été démontré que la recherche sur le transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité remplie de différents nanofluides est en plein essor. C'est dans ce contexte que nous avons consacré ce travail à l'étude numérique de ce transfert de chaleur par convection naturelle.

Chapitre II :Des recherches menées par des moyens numérique et expérimentaux sur la convection

Les recherches menées par des moyens numériques et expérimentaux sur la convection :**1. Convection des nanofluides dans un environnement poreux**

Les matériaux poreux sont utilisés comme technique peu coûteuse pour étendre la zone de transfert de chaleur et améliorer l'efficacité thermique. En raison de leur énorme surface par unité de volume, les milieux poreux ont été largement étudiés pour améliorer la transmission de chaleur. En raison de son potentiel remarquable dans une variété de domaines liés à l'ingénierie, à la bio-ingénierie et aux systèmes énergétiques, la recherche sur le flux convectif naturel des nanofluides à travers les surfaces poreuses a augmenté ces dernières années.

Ahmed et al. [60] ont examiné comment la présence de milieux poreux affecte les propriétés d'écoulement et de transmission de la chaleur dans un récipient de forme étrange rempli de nanofluides hybrides. Les résultats montrent que dans une couche de milieu poreux, le transfert de chaleur par convection est plus important que le transfert de chaleur par conduction dans une couche de matériau non poreux.

Tayebi et al. [61] ont mené une étude numérique qui a examiné comment les caractéristiques de convection libre étaient affectées par les effets thermiques locaux hors équilibre dans un anneau horizontal, elliptique, poreux saturé de nanofluide. Les résultats ont démontré que le nombre de Darcy, le rapport de conductivité thermique ajusté et la porosité du milieu améliorent les effets LTNE.

Khan et al. [62] ont examiné l'effet d'un matériau poreux et d'un champ magnétique incliné sur la convection libre de nanofluides dans un récipient de forme hexagonale avec un cylindre chauffé. Leurs résultats montrent que l'élévation de Da améliore les distributions de vitesse et le taux de transfert de chaleur le long du cylindre chauffé. Un Da plus fort avec une plus grande perméabilité des milieux poreux entraîne une augmentation des débits.

Raizah et al. [63] ont examiné les modèles de transfert de chaleur par convection d'un nanofluide occupant une couche partielle de milieux poreux hétérogènes dans un creux en forme de V. Les résultats suggèrent qu'une augmentation du nombre de Darcy augmente les gradients de température à proximité des zones chaudes, augmentant ainsi la moyenne de Nusselt.

Tayebi et al. [64] ont examiné la convection libre et la génération d'entropie d'un nanofluide hybride Cu-Al/eau qui occupe l'espace entre les cylindres elliptiques et isothermes. Les résultats

montrent que Be_{avg} diminue considérablement avec Ra et que cette diminution se produit plus lentement lors de l'absorption, mais l'insertion de nanoparticules hybrides n'affecte pas ce phénomène.

Baghsaz et al. [65] ont examiné comment la sédimentation des nanoparticules affectait les propriétés de l'écoulement de convection libre et la formation d'entropie dans un conteneur poreux chargé d'un nanofluide Al_2O_3/eau . Ils ont découvert que l'existence de couches de sédiments au fond du conteneur abaissait les lignes de courant par rapport aux principales lignes de courant, ce qui réduisait le transfert de chaleur par convection et le flux de rotation tout en améliorant le transfert de chaleur conductrice. De plus, ils ont découvert que les valeurs Ra et Da n'avaient qu'un impact mineur sur la durée de sédimentation. Cependant, toute augmentation du niveau Ra ou du niveau Da prolongeait la durée de sédimentation.

Tayebi et al. [66] ont étudié la flottabilité thermique dans un anneau elliptique horizontal rempli d'un milieu poreux et de nanofluide. Ils ont affirmé que les valeurs Da et ε du manchon poreux augmentaient avec l'intensité du mouvement convectif naturel dans l'anneau, quelles que soient les valeurs de y et H .

Esfe et al. [67] ont examiné la cavité naturelle en forme de U par convection chargée de milieux poreux et de nanofluide Al_2O_3/H_2O en utilisant l'approche de mélange en deux phases. Les résultats montrent qu'en augmentant la conductivité thermique, Nu_{avg} augmente également.

Tableau 1 : Convection naturelle des nanofluides dans un environnement poreux

Référence	Géométrie du boîtier	Nanofluide utilisé	Principaux Résultats
Ahmed et al. [60]	Récipient de forme étrange	Nanofluide hybride	Le transfert de chaleur par convection est plus important dans les milieux poreux.
Tayebi et al. [61]	Anneau elliptique horizontal	Non spécifié	Les effets thermiques locaux hors équilibre sont améliorés par le nombre de Darcy et la porosité.
Khan et al. [62]	Récipient hexagonal avec cylindre chauffé	Non spécifié	Le nombre de Darcy élevé améliore le taux de transfert de chaleur et la distribution de la vitesse.
Raizah et al. [63]	Creux en forme de V	Non spécifié	L'augmentation du nombre de Darcy augmente les gradients de température et la moyenne de Nusselt.
Tayebi et al. [64]	L'espace entre les cylindres elliptiques et isothermes	nanofluide hybride Cu-Al/eau	Be_avg diminue considérablement avec Ra et que cette diminution se produit plus lentement lors de l'absorption, mais l'insertion de nanoparticules hybrides n'affecte pas ce phénomène.
Baghsaz et al. [65]	Conteneur poreux	Al ₂ O ₃ /eau	Les couches de sédiments réduisent le transfert de chaleur par convection, augmentation de Ra

Référence	Géométrie du boîtier	Nanofluide utilisé	Principaux Résultats
			et Da prolonge la durée de sédimentation.
Tayebi et al. [66]	Anneau elliptique horizontal	Non spécifié	Les valeurs de Da et ε augmentent l'intensité du mouvement convectif naturel.
Esfe et al. [67]	Cavité en forme de U	Al ₂ O ₃ /H ₂ O	L'augmentation de la conductivité thermique améliore Nu _{avg} .

2. Convection de nanofluides dans un champ magnétique

Les nanofluides magnétiques, connus comme des suspensions avec de fortes caractéristiques magnétiques, ont une conductivité électrique importante lors de l'utilisation d'un champ magnétique. Le principal avantage des nanofluides magnétiques par rapport aux nanofluides non magnétiques est leur capacité à améliorer et à contrôler des caractéristiques physiques telles que la viscosité, la conductivité thermique et la convection magnétique en introduisant un champ magnétique externe [68,69]. Les nanofluides magnétiques sont principalement utilisés pour modifier les propriétés des fluides et des écoulements pour des fins spécifiques.

Il y a eu deux perspectives sur la régulation du fluide par champs magnétiques ces dernières années. La première, la MHD (Magnétohydrodynamique), étudie un type de fluide ayant une conductivité électrique [70,71]. Les plasmas, les métaux liquides, l'eau salée et les nanofluides comme l'oxyde de fer et le cuivre dans l'eau sont des exemples de cette catégorie de fluides. La MHD fournit les conditions nécessaires pour introduire un courant électrique dans un flux de fluide ou pour fournir une force de Lorentz à un fluide qui transporte un courant électrique via un champ magnétique. La catégorie suivante est la ferrohydrodynamique (FHD). Dans ce groupe, Hartmann possède la propriété du fluide lui-même. De plus, plusieurs études ont utilisé la modélisation CFD pour examiner le processus de convection naturelle MHD dans les nanofluides [72,73].

Yan et al. [74] ont examiné la façon dont un matériau elliptique perméable au nickel qui émet de la chaleur a été refroidi. Ce matériau était situé au milieu d'un creux rempli d'un hybride de nanofluide EG/TiO₂ et avait des parois froides verticales. Selon les résultats de cette enquête, la moyenne Nu dans tous les nombres poreux de Rayleigh et les fractions volumiques a diminué de plus de 9 % en raison de la croissance du nombre de Hartmann.

Nabwey et al. [75] ont examiné un flux de convection libre MHD instable et le transfert de chaleur dans une enceinte inclinée en forme de U saturée de nanofluide Cu-eau. Les résultats montrent que l'emplacement de la source de chaleur sans dimension augmente le Nu moyen, mais que la longueur de la source de chaleur et le nombre de Hartmann diminuent.

Lorsque **Abderrahmane et al. [76]** ont examiné le flux convectif MHD de nanofluide non newtonien dans une enceinte d'anneau poreux coupée en deux, le flux de chaleur constant a été pris en compte. Les résultats montrent que l'angle d'inclinaison de la cavité et le nombre de Hartmann peuvent être considérés comme des paramètres de contrôle utiles pour différents nombres de

Rayleigh. Lorsque le champ magnétique a été appliqué, le champ de vitesse a diminué, ce qui a entraîné un transfert de chaleur par convection et un nombre de Nusselt plus faible.

Rahman et al. [77] ont examiné comment un champ magnétique incliné affectait un écoulement non newtonien d'un nanofluide dans une zone rectangulaire. Selon les recherches, le nombre moyen de Nusselt augmente avec l'angle magnétique jusqu'à 90° avant d'augmenter jusqu'à 120° .

Cao et al. [78] ont examiné la convection naturelle MHD de nanofluide Cu à base d'eau dans un récipient d'échangeur de chaleur carré avec deux cylindres sur les côtés gauche et droit comme refroidisseur et réchauffeur. Leurs résultats montrent que l'introduction d'un champ magnétique a élargi la zone de transport des nanoparticules.

Boulahia et al. [79] ont examiné l'irréversibilité de la convection libre MHD dans une enceinte cubique remplie d'un nanofluide d'eau hybride. Les résultats ont montré que l'augmentation de la valeur de Hartmann de 15 à 45 entraîne une diminution du taux de transfert de chaleur. Le taux de transfert de chaleur augmente progressivement à mesure que l'angle d'inclinaison du champ magnétique augmente.

Chammam et al. [80] ont examiné la convection magnétique naturelle du nanofluide de Fe_3O_4 à base d'eau dans un récipient de forme complexe avec un chauffage à peu près circulaire. Les résultats montrent que l'application d'un champ magnétique peut réduire l'intensité de la convection naturelle et le rythme du transfert de chaleur à l'intérieur du système, ce qui en fait un facteur de régulation utile dans les applications de transfert de chaleur.

Boulahia et al. [81] ont étudié la production d'entropie provenant de la convection libre MHD à l'intérieur d'une cavité perforée contenant de l'nanofluide et un objet. Les résultats montrent que, avec la croissance du champ magnétique Ha , l'influence du nombre N des ondulations devient progressivement sans conséquence.

Islam et al. [82] ont examiné un flux convectif naturel de nanofluides entre deux trous elliptiques au sommet d'un récipient à échange de chaleur. Selon les résultats, l'introduction d'un champ magnétique peut réduire les caractéristiques de l'écoulement convectif naturel et le transfert de chaleur.

Dans une étude menée par **Al-Farhany et al. [83]**, un récipient en forme de U rempli d'un milieu poreux/saturé nanofluide et de deux chicanes a été utilisé pour examiner la transmission naturelle de chaleur par convection en utilisant les effets MHD. Leurs résultats ont révélé que l'augmentation des

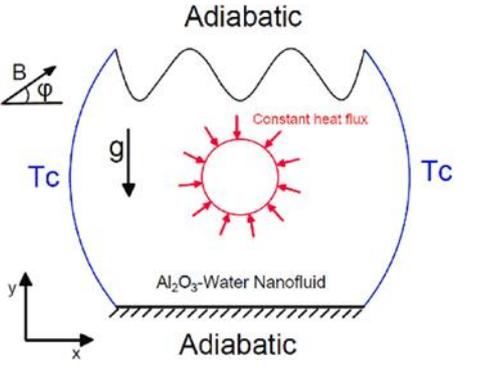
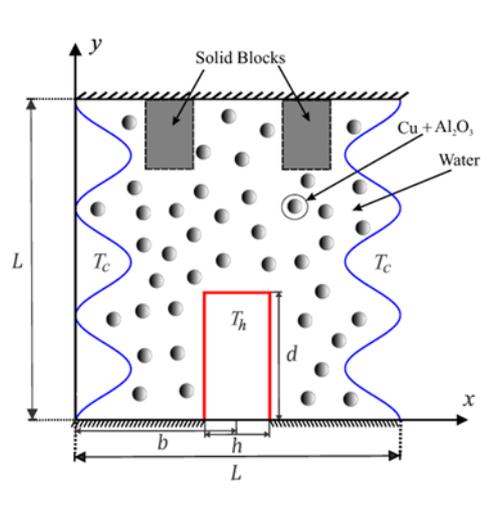
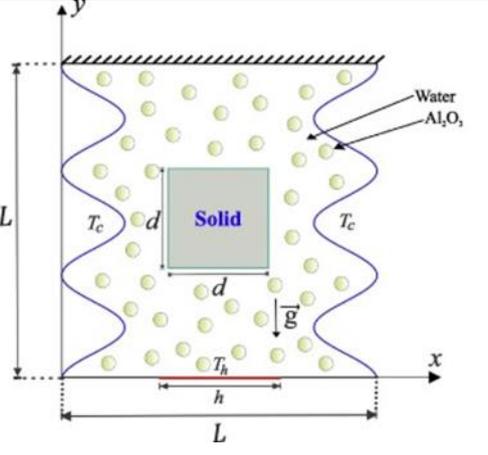
valeurs de Ra , Da , et du pourcentage volumique des nanoparticules améliore la transmission de chaleur. Cependant, ils ont noté que l'incrément de transfert de chaleur est affecté de manière opposée par le nombre de Hartmann.

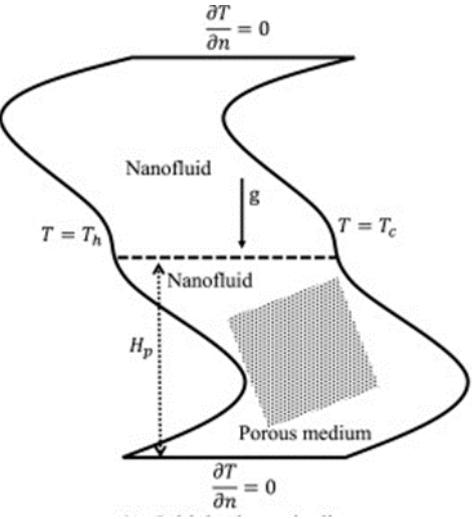
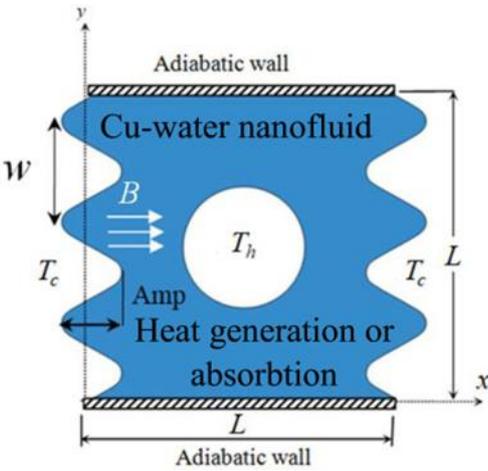
Tableau 2 : Convection naturelle de nanofluides dans un champ magnétique

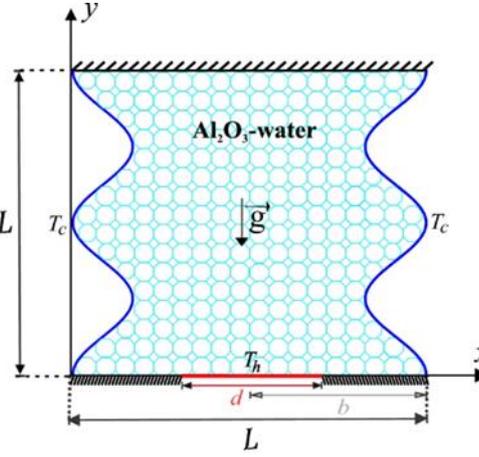
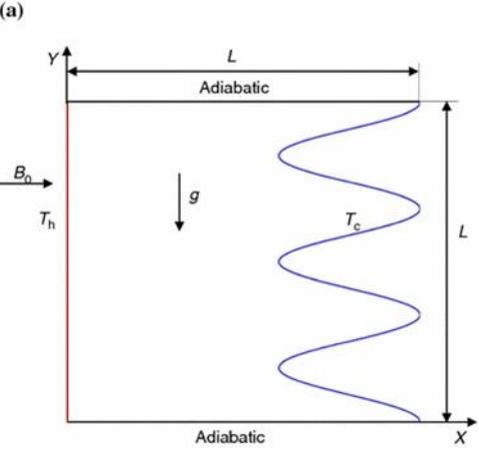
Référence	Géométrie du boîtier	Nanofluide utilisé	Principaux Résultats
Yan et al. [74]	Creux	EG/TiO ₂	La moyenne Nu diminue avec l'augmentation du nombre de Hartmann.
Nabwey et al. [75]	Enceinte inclinée en forme de U	Cu-eau	L'emplacement de la source de chaleur augmente Nu moyen, mais la longueur de la source et le nombre de Hartmann le diminuent.
Abderrahmane et al. [76]	Enceinte d'anneau poreux	Non spécifié	L'angle d'inclinaison et le nombre de Hartmann peuvent contrôler les nombres de Rayleigh.
Rahman et al. [77]	Zone rectangulaire	Non spécifié	Le nombre moyen de Nusselt augmente avec l'angle magnétique jusqu'à 90°, puis augmente jusqu'à 120°.
Cao et al. [78]	Récipient d'échangeur de chaleur carré	Cu-eau	Le champ magnétique élargit la zone de transport des nanoparticules.
Boulahia et al. [79]	Enceinte cubique	Eau hybride	L'augmentation de Hartmann diminue le taux de transfert de chaleur, mais l'angle d'inclinaison l'augmente.

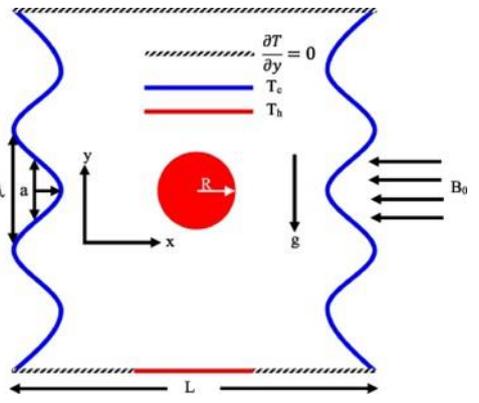
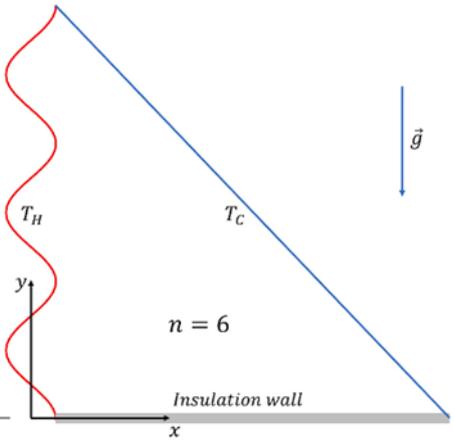
Référence	Géométrie du boîtier	Nanofluide utilisé	Principaux Résultats
Chammam et al. [80]	Récipient de forme complexe	Fe ₃ O ₄ à base d'eau	Le champ magnétique réduit l'intensité de la convection naturelle et le transfert de chaleur.
Boulahia et al. [81]	Cavité perforée	Non spécifié	Avec l'augmentation de Ha, l'influence des ondulations devient sans conséquence.
Islam et al. [82]	Récipient à échange de chaleur avec deux trous elliptiques	Non spécifié	Le champ magnétique réduit les caractéristiques de l'écoulement convectif naturel et le transfert de chaleur.
Al-Farhany et al. [83]	Récipient en forme de U avec chicanes	Nanofluide poreux/saturé	L'augmentation de Ra, Da et du pourcentage volumique des nanoparticules améliore la transmission de chaleur, mais l'incrément de transfert de chaleur est affecté de manière opposée par le nombre de Hartmann.

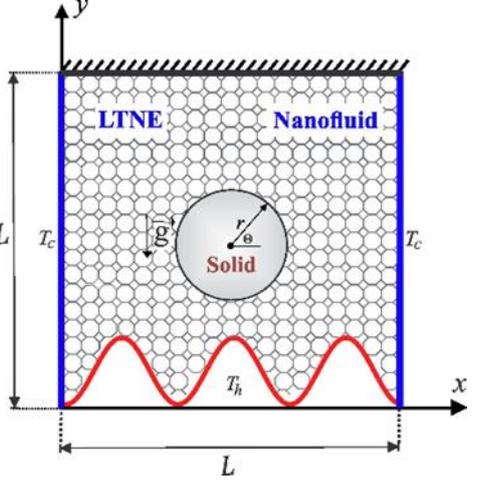
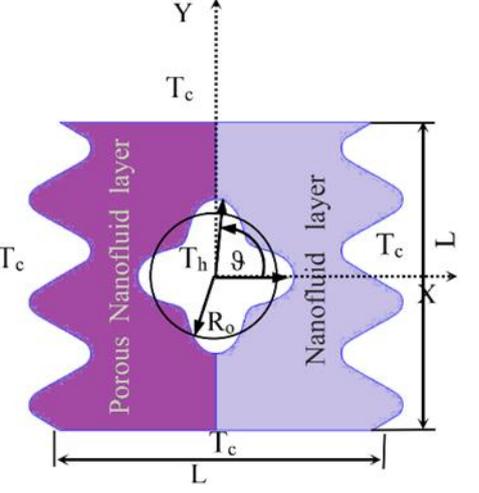
Tableau 3 : Résumé des recherches sur la convection naturelle des nanofluides en présence de champ magnétique : études expérimentales et numériques

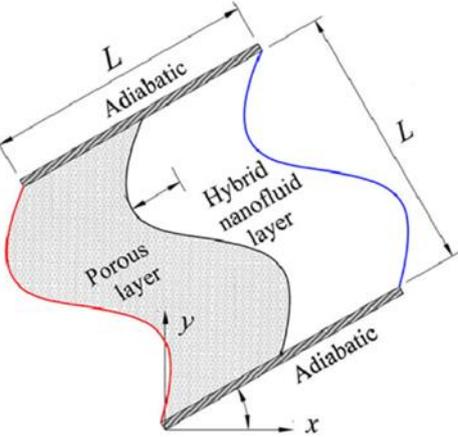
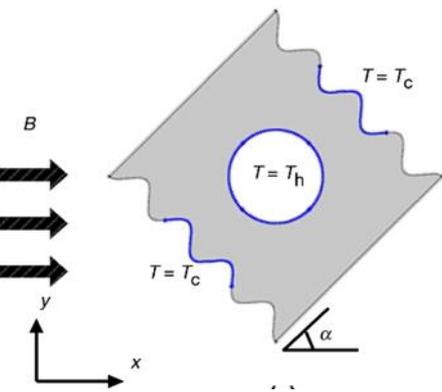
Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
Dogonchi et al. [84]		Al ₂ O ₃ /H ₂ O	Les changements d'orientation du champ magnétique n'affectent pas le Nuavg. À mesure que la courbure de la cavité augmente, la production d'entropie augmente.
Alsabery et al. [85]		Cu-Al ₂ O ₃ / H ₂ O Hybrid nanofluid	Le nombre de Nusselt est augmenté en comparant les nanofluides hybrides aux nanofluides basiques. Les nombres de Rayleigh faibles ressentent une amplification particulière.
Hashim et al. [86]		Al ₂ O ₃ /H ₂ O two-phase model	En ajoutant des nanoparticules et en choisissant un nombre idéal d'oscillations, la transmission de chaleur dans la cavité est améliorée.

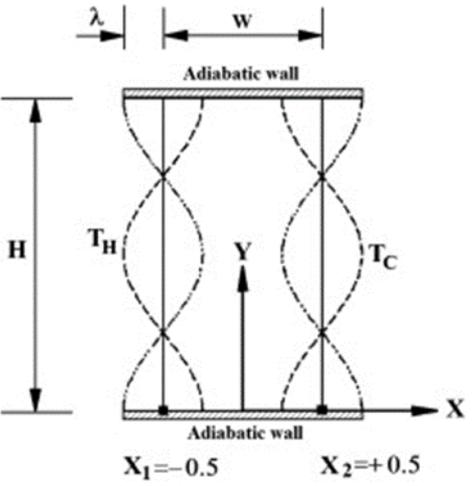
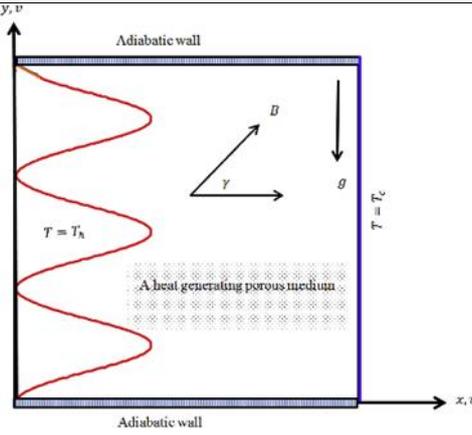
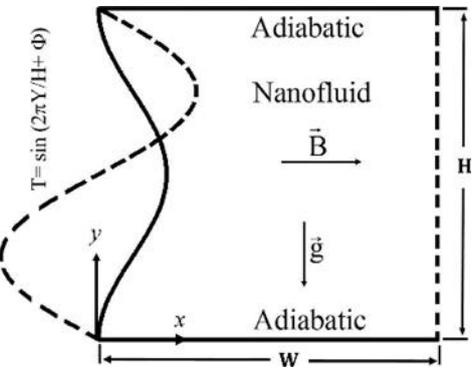
Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
Abdelraheem et al. [87]		Cu/H2O non-Darcy porous model	Les écoulements de fluide pénètrent dans la couche de milieu poreux avec des valeurs plus élevées du paramètre de Darcy $Da \leq 10^{-3}$ (résistance poreuse inférieure). Cette pénétration augmente à mesure que le nombre de Rayleigh augmente.
Abdulkadhim et al. [77]		Cu/H2O	En raison de la convection contraignante, l'élévation de Ha a une influence mineure sur le nombre de Nusselt pour un Ra faible, mais elle entraîne considérablement le nombre de Nusselt jusqu'à 33 % pour un Ra plus élevé.

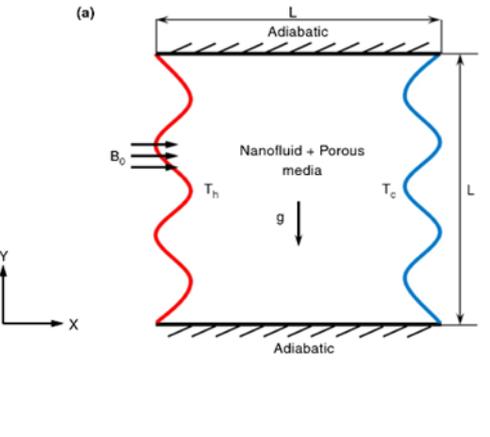
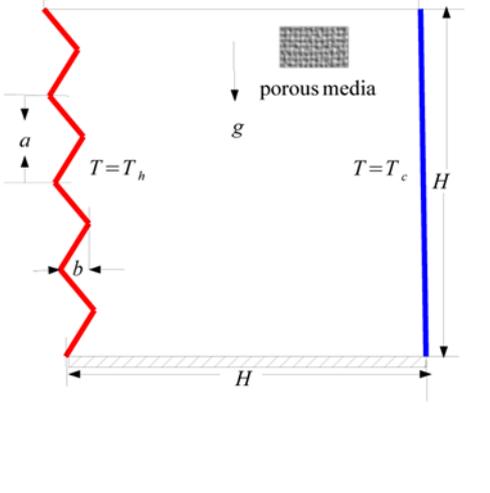
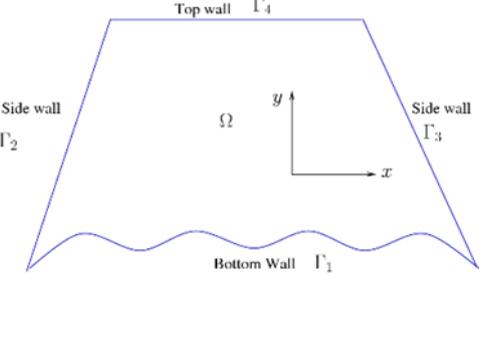
Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
<p>Alsabery et al. [89]</p>		<p>Al₂O₃/H₂O non-Darcian porous model</p>	<p>Les paramètres de contrôle du flux convectif naturel et de la transmission de chaleur à l'intérieur de la cavité ondulée peuvent inclure la longueur du réchauffeur, son emplacement, les parois de concentration de nanoparticules et le nombre d'ondes sur le côté vertical.</p>
<p>Dogonchi et al. [90]</p>		<p>Cu/H₂O</p>	<p>Le nombre moyen de Nusselt augmente avec le nombre d'ondulations et le rapport de contraction ondulé pour Ra = 103 et 104. L'intensité du flux convectif augmente avec le nombre de Ra et diminue avec le nombre de Hartmann.</p>

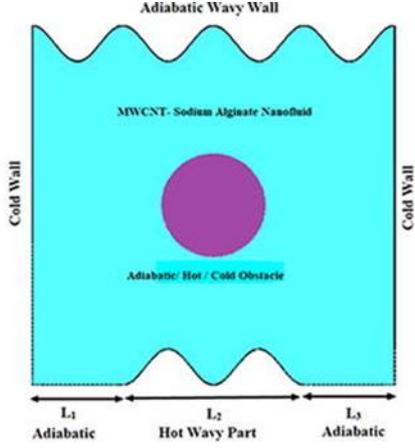
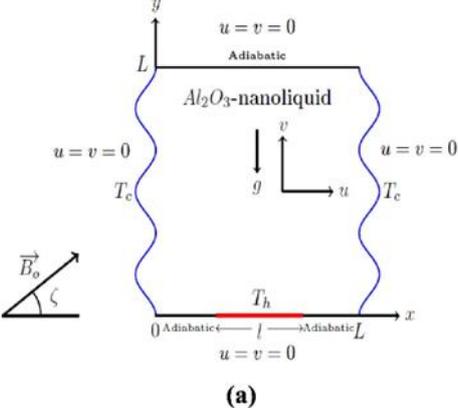
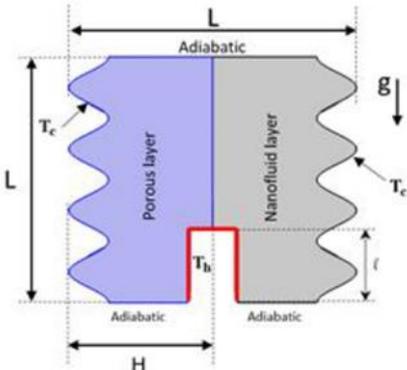
Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
<p>Mohammad et al. [91]</p>		<p>Cu-Al2O3/ H2O hybrid nanofluid</p>	<p>Par rapport à une cavité ordinaire sans obstruction, le mouvement du fluide dans une cavité ondulée avec un obstacle produisant de la chaleur est plus intense. La rugosité de la cavité augmente également le taux de transmission de chaleur.</p>
<p>Shekaramiz et al. [92]</p>		<p>Fe3O4/ H2O</p>	<p>La dispersion des nanofluides à l'intérieur du récipient n'est pas affectée par l'inclinaison du champ magnétique. Le nombre ondulé est inversement lié au nombre Nusselt. Augmentation de Ha, la génération d'entropie augmente, puis reste constante.</p>

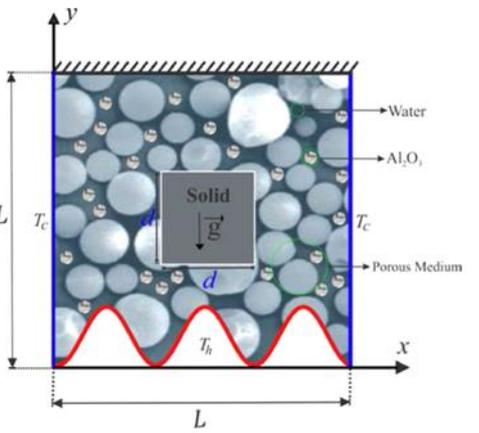
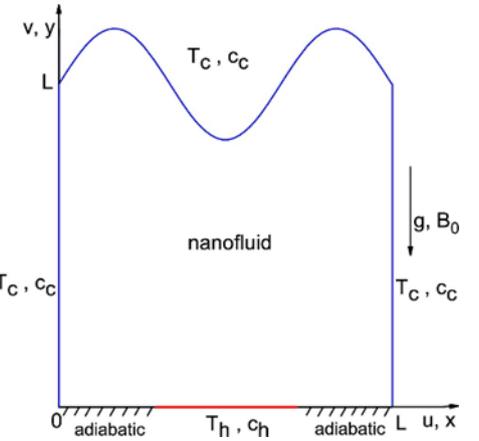
Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
<p>Alsabery et al. [93]</p>		<p>Al₂O₃/H₂O</p>	<p>Le nombre moyen de Nusselt augmente avec l'ajout de ϕ pour les valeurs de porosité élevées, mais pour les valeurs de porosité faibles, le nombre moyen de Nusselt diminue après le pic. Lorsque les ondulations sont petites, l'utilisation de nanoparticules est idéale.</p>
<p>Abdulkadhim et al. [94]</p>		<p>Ag/ H₂O</p>	<p>Lorsque l'épaisseur de la couche poreuse augmente, la transmission moyenne de chaleur diminue. La force maximale d'écoulement du fluide se développe à $N = 4$, lorsque le cylindre sinusoïdal interne se déplace verticalement.</p>

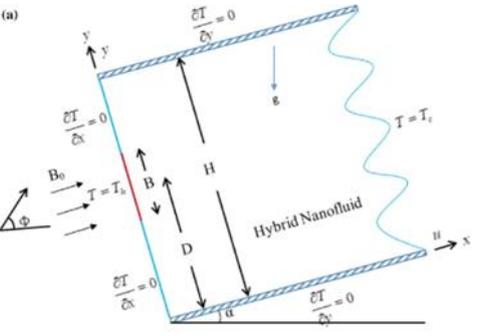
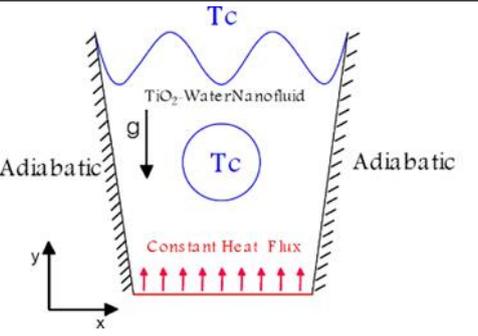
Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
<p>Kadhim et al. [95]</p>		<p>Cu-Al₂O₃/ H₂O hybrid nanofluid</p>	<p>La comparaison entre la suspension de nanoparticules Al₂O₃ dans l'eau en tant que nanofluide unique et la suspension de nanoparticules Cu-Al₂O₃ dans l'eau en tant que nanofluide hybride démontre que le nanofluide hybride a un meilleur transfert de chaleur. Le nombre d'onde de la paroi ondulée affecte les cellules convectives primaires et les formes isothermes.</p>
<p>Gupta et al. [96]</p>		<p>Cu-Al₂O₃/ H₂O hybrid nanofluid</p>	<p>Le schéma de transfert de chaleur global est en zigzag avec une ondulation croissante. Lorsque le nombre de Rayleigh est élevé ($Ra > 105$), le nombre moyen de Nusselt présente une tendance opposée avec une forte concentration de nanoparticules hybrides.</p>

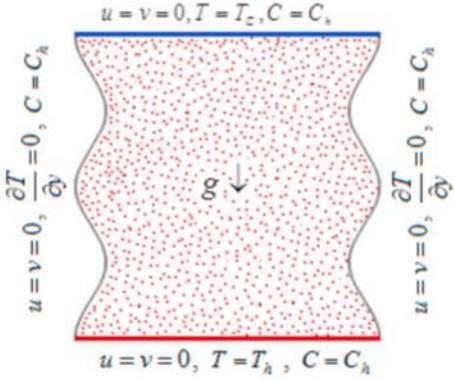
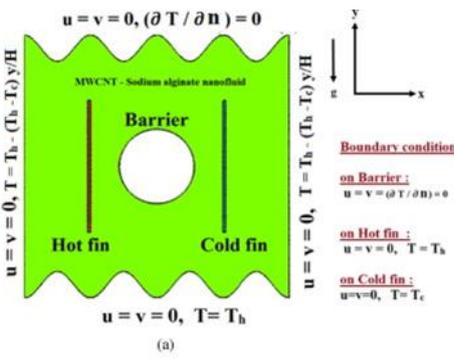
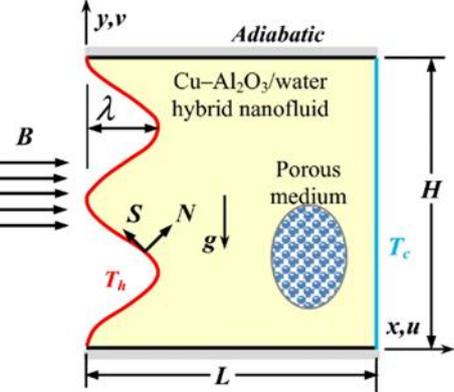
Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
Esmail et al. [97]		Cu/H2O	La valeur moyenne de Nusselt diminue à mesure que l'ondulation de surface augmente et que le nombre de Grashof augmente. La création d'entropie augmente à mesure que le nombre de Grashof augmente et que l'ondulation de surface diminue.
Ahmed et al. [98]		Non spécifié	Le taux de transfert de chaleur est corrélé à la fois au nombre d'ondulations et au taux de contraction ondulée.
Ashorynejad et al. [99]		Cu-Al2O3/ H2O hybrid nanofluid	L'augmentation de la déviation de phase a un effet positif sur l'amélioration du transfert de chaleur à un Ra plus élevé. Le nombre de Nusselt diminue en inverse du nombre de Hartmann, mais augmente à mesure que Ra et

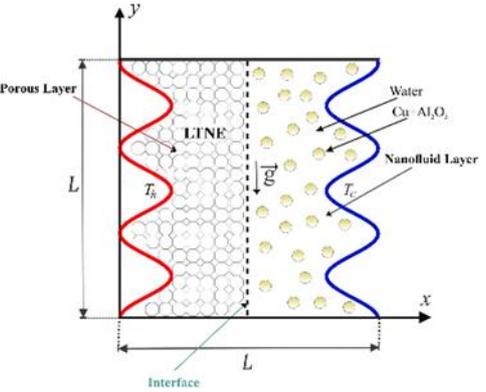
Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
			la fraction volumique des nanoparticules augmentent.
Hamzah et al. [100]		Cu-Al ₂ O ₃ /H ₂ O hybrid nanofluid	La suppression du transport de chaleur est fortement influencée par le nombre de Darcy et l'ondulation de surface. Pour $Da < 10^{-3}$, l'effet de Ha devient minime et peut être ignoré.
Chamkha et al. [101]		Cu/ H ₂ O	Avec l'augmentation de la fréquence des ondes triangulaires, les taux de transfert de chaleur locaux et moyens diminuent, ce qui est plus efficace pour les grands nombres de Darcy et de Rashhof.
Reddy et al. [102]		Al ₂ O ₃ /H ₂ O	Le nombre de Nusselt est sensible au paramètre de Casson et au pourcentage de volume solide dans un flux de nombres de Hartmann élevé.

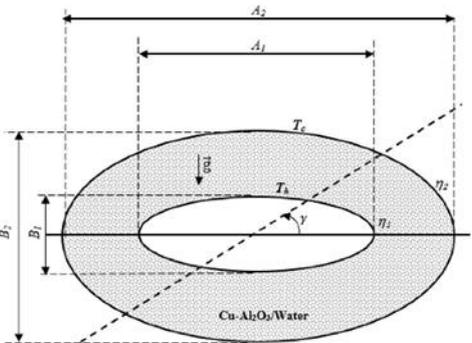
Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
<p>Ganesh et al. [103]</p>		<p>Casson-based MWCNT nanofluid</p>	<p>Pour toutes les formes d'obstacles, le nombre moyen de Nusselt le long du mur ondulé chauffé a augmenté en raison des paramètres Casson, de rayonnement, du pourcentage de volume MWCNT et du nombre de Rayleigh.</p>
<p>Sivaraj et al. [104]</p>	 <p>(a)</p>	<p>Al2O3/ H2O</p>	<p>À mesure que le nombre d'ondulations ou de Hartmann augmente, le taux de transfert de chaleur par convection et l'intensité moyenne de la génération d'entropie diminuent.</p>
<p>Bendrer et al. [105]</p>		<p>Fe3O4- MWCNT/ H2O hybrid nanofluid</p>	<p>L'efficacité du transfert de chaleur et du flux de nanoliquides augmente considérablement lorsque le nombre de Rayleigh augmente. L'irréversibilité du transport de chaleur est la principale caractéristique des</p>

Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
			faibles valeurs Ra. La valeur absolue maximale de la fonction de flux diminue de 84,78 % lorsque Ha est augmenté de 0 à 100.
Alsabery et al. [106]		Al ₂ O ₃ / H ₂ O	L'irréversibilité thermique à des niveaux de nombre et de porosité de Darcy inférieurs, ainsi que le plus grand nombre d'ondulations et de fractions volumiques de nanoparticules, contribuent principalement à la génération d'entropie dans le conteneur.
Parveen et al. [107]		Al ₂ O ₃ / H ₂ O	On observe que les taux de transfert de chaleur et de masse augmentent à mesure que le nombre de Rayleigh et le pourcentage de volume des nanoparticules augmentent, mais on observe également que ces taux augmentent à mesure que le

Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
			volume des nanoparticules augmente.
Shaik et al. [108]		TiO2–Cu/ H2O hybrid nanofluid	La variation locale de Nusselt diminue à mesure que le paramètre d'ondulation augmente. Le schéma d'écoulement de la cavité est fortement influencé par le champ magnétique, et la vitesse du fluide s'écoule dans le sens des aiguilles d'une montre dans la surface ondulée en raison du champ magnétique imposé dans la direction de l'inclinaison.
Fereidooni et al. [109]		TiO2/ H2O	Nuavg diminue de 31 % si l'amplitude du mur ondulé passe de 0,05 à 0,1. Nuavg augmente de 36 % alors que Ra passe de 103 à 105.

Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
<p>Uddin et al. [110]</p>		<p>CuO/ H2O</p>	<p>Lorsque le nombre d'ondes est augmenté à 2, la transmission de chaleur diminue de 16,98 % et augmente de 3,62 %.</p>
<p>Ganesh et al. [111]</p>		<p>MWCNT– Casson nanofluid</p>	<p>Le taux de transmission de chaleur a augmenté de 257%, 189%, 116% et 30% en raison de l'augmentation du nombre de Rayleigh, du paramètre de Casson, de l'amplitude de l'ondulation et du pourcentage de volume solide du MWCNT, respectivement.</p>
<p>Mandal et al. [112]</p>		<p>Cu-Al2O3/ H2O hybrid nanofluid</p>	<p>À mesure que le Ra augmente, la transmission de chaleur et l'intensité du flux augmentent. Cependant, Da et Ha diminuent à mesure qu'ils augmentent.</p>

Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
<p>Alsabery et al. [113]</p>		<p>Cu-Al₂O₃/ H₂O hybrid nanofluid</p>	<p>À mesure que la concentration en nanoparticules passe de 0 à 0,04, le nombre de Nusselt liquide augmente de 17 %. Le nanofluide hybride a une transmission thermique améliorée par rapport aux nanofluides basiques. L'impact de l'amplitude A des ondulations de la paroi sur l'écoulement et le transfert de chaleur est déterminé par la valeur de Da. L'utilisation d'une cavité avec une valeur A plus grande améliore la transmission thermique lorsque Da est faible ; lorsque Da est élevé, c'est le contraire qui est vrai.</p>

Auteurs	Géométrie du boîtier	Nanofluide	Observations
<p>Tayebi et al. [114]</p>		<p>Cu-Al₂O₃/ H₂O hybrid nanofluid</p>	<p>Lorsque le nombre de Rayleigh augmente ou lorsque des nanoparticules hybrides sont utilisées dans de l'eau pure, le flux convectif naturel, le taux de transfert de chaleur et la formation d'entropie thermique et de friction à l'intérieur de l'anneau augmentent.</p>

Ce tableau complète les deux premiers en fournissant un résumé des recherches sur la convection naturelle des nanofluides en présence d'un champ magnétique, mais cette fois-ci en incluant à la fois les études numériques et expérimentales. Cela permet de consolider davantage les informations présentées dans les tableaux précédents en offrant une vue d'ensemble plus complète et diversifiée des recherches menées dans ce domaine.

Chapitre III: Model mathématique

1. Introduction

Avant d'aborder la formulation mathématique du problème de convection forcée dans une cavité, il convient de rappeler les principes fondamentaux d'équilibre et de conservation. Ce chapitre présente ces principes, démontrant comment, en se basant sur des hypothèses thermodynamiques, il est possible de mettre en évidence les liens entre les variables hydrodynamiques et thermiques du domaine. Les principales relations sont l'équation de continuité, les équations de mouvement, l'équation d'énergie et l'équation de génération d'entropie. Toutes les étapes intermédiaires nécessaires pour passer d'une étape à l'autre sont abordées dans des ouvrages de référence comme Prigogine (1967), Wisnieski et al. (1976), Fox & McDonald (2000) ou Bird et al. (2002).

2. Modèle Mathématique

Le mouvement convectif présenté dans cette étude est considéré comme stable, 3D et laminaire. La figure 3.1 affiche le domaine de calcul, comprenant les milieux poreux saturés de nanoliquides hybrides, ainsi que les conditions aux limites associées. La paroi verticale et le cylindre sont adiabatiques, mais la paroi ondulée inférieure et la paroi inclinée sont respectivement chauffées et refroidies. Une variété de motifs pour le mur ondulé inférieur est étudiée afin de déterminer l'influence de la géométrie de l'enceinte. Les effets du champ magnétique sont également pris en compte en appliquant un champ magnétique constant le long de l'axe Z positif. L'eau est utilisée comme liquide de base pour les suspensions de travail, mélangée avec des nanoparticules de Fe_3O_4 et de MWCNT pour générer les suspensions. Les caractéristiques thermophysiques du fluide de base et des nanoparticules sont résumées dans le tableau 1.

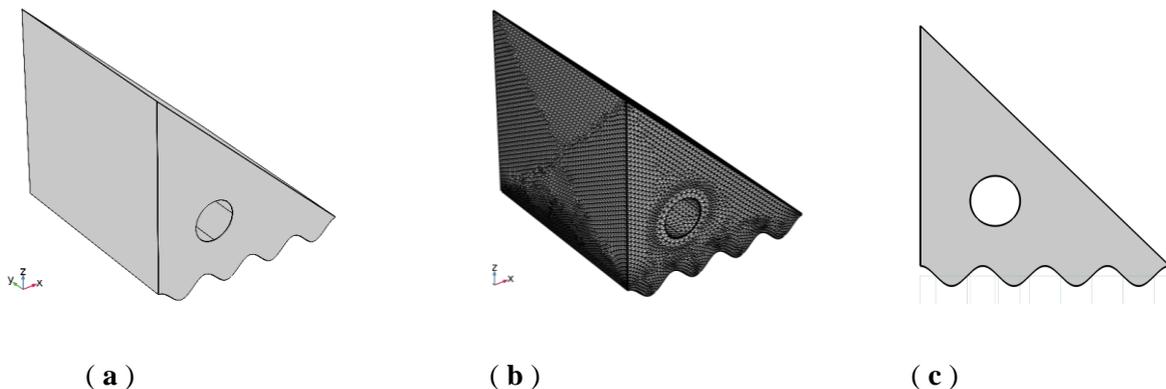


Figure 3.1 : (a) Vue 3D de la chambre, (b) Maillage de grille, (c) Vue 2D de la géométrie.

Tableau 3.1 : Propriétés thermophysiques des nanoparticules et des fluides de base.

Propriétés	Eau pure	Fe3O4	MWCNT
$\rho(\text{kg/m}^3)$	997.1	5180	2100
$C_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$	4179	670	710
$k(\text{W/mK})$	0.613	9.7	2000

Les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, ainsi que l'équation de génération d'entropie, peuvent être écrites comme suit dans un système de coordonnées cartésiennes bidimensionnelles [118]:

3. Équations de conservation (EC) dans la zone poreuse

3.2. Équation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (7)$$

3.3. Équation de mouvement en X :

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \left[\frac{U}{\epsilon^2} \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{V}{\epsilon^2} \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{W}{\epsilon^2} \frac{\partial U}{\partial Z} \right] = \\ & - \frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \frac{1}{\epsilon} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) - \frac{\mu_{nf}}{\mu_f Re Da} U \\ & - \frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \frac{C_F}{\sqrt{Da}} \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} U \end{aligned} \quad (8)$$

3.4. Équation de mouvement en Y :

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \left[\frac{U}{\epsilon^2} \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{V}{\epsilon^2} \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{W}{\epsilon^2} \frac{\partial V}{\partial Z} \right] = \\ & - \frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \frac{1}{\epsilon} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) - \frac{\mu_{nf}}{\mu_f Re Da} V \\ & - \frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \frac{C_F}{\sqrt{Da}} \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} V - \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} Ha^2 \frac{V}{\epsilon} \end{aligned} \quad (9)$$

3.5. Équation de mouvement en Z :

$$\begin{aligned}
& \frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \left[\frac{U}{\epsilon^2} \frac{\partial W}{\partial X} + \frac{V}{\epsilon^2} \frac{\partial W}{\partial Y} + \frac{W}{\epsilon^2} \frac{\partial W}{\partial Z} \right] = \\
& - \frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{Re} \frac{1}{\epsilon} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) - \frac{\mu_{nf}}{\mu_f Re Da} W \\
& - \frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \frac{C_F}{\sqrt{Da}} \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} W + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{(\rho\beta)_f} \frac{Gr}{Re^2} \theta - \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} Ha^2 \frac{W}{\epsilon}
\end{aligned} \tag{10}$$

3.6. Équation d'énergie :

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} + W \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{(\rho c_p)_f}{(\rho c_p)_{nf}} \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) \tag{12}$$

3.7. Paramètres non dimensionnels :

$$\begin{aligned}
X, Y &= \frac{x, y}{L} \\
U, V, W &= \frac{u, v, w}{\alpha_{nf}} L \\
\theta &= \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \\
Ra &= \frac{g \beta_{fluid} (T_h - T_c) L^3}{\alpha_{fluid} \nu_{fluid}}
\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
P &= \frac{p}{\rho_{nf} \left(\frac{\alpha_{fluid}^2}{L^2} \right)} \\
Da &= \frac{K}{L^2}
\end{aligned} \tag{14}$$

$$Ha = L \cdot B \frac{\sqrt{\sigma_{nf}}}{\sqrt{\mu_{nf}}} \tag{15}$$

$$Pr = \frac{\nu_{fluid}}{\alpha_{fluid}} \tag{16}$$

3.8. Conditions aux limites des équations gouvernantes:

$$\begin{aligned}
\{U = V = W = 0, \theta = 0\} & \quad \text{Pour les parois inférieures de l'hybride nano fluide} \\
\left\{ \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial V}{\partial X} = \frac{\partial W}{\partial X} = 0, \theta = 1 \right\} & \quad \text{Pour les parois gauche de l'hybride nano fluide} \\
\left\{ \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial V}{\partial X} = \frac{\partial W}{\partial X} = 0, \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \right\} & \quad \text{Pour les parois droite de l'hybride nano fluide}
\end{aligned}$$

3.9. Cylindre

Pour les conditions aux limites au niveau du cylindre, les équations sont formulées comme suit:

3.9.1. Vitesse U :

$$U = -\Omega(Y - Y_0) \quad (17)$$

3.9.2. Vitesse V :

$$V = \Omega(X - X_0) \quad (18)$$

3.9.3. Température θ :

$$\frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad (19)$$

4. Corrélations pour les Propriétés Thermophysiques

Les corrélations suivantes (tableau 2) sont utilisées pour déterminer les propriétés thermophysiques des nanoliquides hybrides :

Tableau 3.2. Corrélations utilisées pour estimer les propriétés des nanofluides classiques et hybrides [44, 45]

Propriétés	Nanofluide
Densité	$\rho_{hnf} = (1 - \phi)\rho_{fluid} + \phi\rho_{hnp}$
Capacité thermique	$(\rho c_p)_{hnf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_{fluid} + \phi(\rho c_p)_{hnp}$
Coefficient de dilatation thermique	$(\rho\beta)_{hnf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_{fluid} + \phi(\rho\beta)_{hnp}$
Conductivité électrique	$\sigma_{hnf} = (1 - \phi)\sigma_{fluid} + \phi\sigma_{hnp}$
Conductivité thermique	$k_{hnf} = \frac{k_{hnp} + (n - 1)k_f - (n - 1)(k_f - k_{hnp})\phi}{k_{hnp} + (n - 1)k_f + (k_f - k_{hnp})\phi} k_f$

Propriétés	Nanofluide hybride
Densité	$\rho_{hnp} = \frac{\phi_{Fe_3O_4}\rho_{Fe_3O_4} + \phi_{MWCNT}\rho_{MWCNT}}{\phi}$
Capacité thermique	$(c_p)_{hnp} = \frac{\phi_{Fe_3O_4}(c_p)_{Fe_3O_4} + \phi_{MWCNT}(c_p)_{MWCNT}}{\phi}$
Coefficient de dilatation thermique	$\beta_{hnp} = \frac{\phi_{Fe_3O_4}\beta_{Fe_3O_4} + \phi_{MWCNT}\beta_{MWCNT}}{\phi}$
Conductivité électrique	$\sigma_{hnp} = \frac{\phi_{Fe_3O_4}\sigma_{Fe_3O_4} + \phi_{MWCNT}\sigma_{MWCNT}}{\phi}$
Conductivité thermique	$k_{hnp} = \frac{\phi_{Fe_3O_4}k_{Fe_3O_4} + \phi_{MWCNT}k_{MWCNT}}{\phi}$

$$\text{Viscosité} \quad \mu_{hnf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (20)$$

$$\text{Fraction volumique} \quad \phi = \phi_{MWCNT} + \phi_{Fe_3O_4} \quad (21)$$

En utilisant ces corrélations, les propriétés thermophysiques des nanoliquides hybrides peuvent être calculées avec précision.

5. Génération de l'Entropie

La méthode de génération de l'entropie combine les principes de la thermodynamique, les lois fondamentales de transfert de chaleur et de mécanique de fluide. C'est l'influence combinée de ces disciplines qui est représentée par la Figure 3.3 (Bejan, 1982).

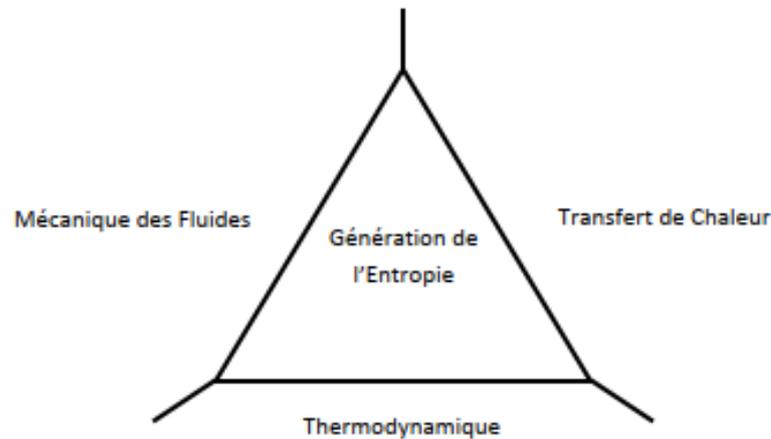


Figure 3.3. Triangle multidisciplinaire couvert par la génération de l'entropie.

La génération de l'entropie, qui est une mesure des imperfections d'un système, est définie comme une combinaison de l'entropie produite par les effets visqueux du fluide et celle produite par les effets thermiques. Cette combinaison est exprimée par la formule suivante :

$$S_{\text{tot}} = S_{ht} + S_{ff} + S_{mf} \quad (22)$$

L'équation du bilan d'entropie en 3D en absence de transfert de masse et de réactions chimiques donne l'équation de la génération de l'entropie, qui peut être exprimée en coordonnées cartésiennes par :

5.1. Entropie due aux effets thermiques S_{ht} :

$$S_{ht} = \frac{k_{mf}}{T_0^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (23)$$

5.2. Entropie due aux effets visqueux S_{ff} :

$$\begin{aligned}
S_{ff} = \frac{\mu_{hnf}}{T_0} & \left[2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) \right. \\
& + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \\
& + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \\
& \left. + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \\
& + \frac{\mu_{hnf}}{T_0 K} (u^2 + v^2 + w^2)
\end{aligned} \tag{24}$$

5.3. Entropie due aux effets magnétiques S_{mf}

$$S_{mf} = \frac{\sigma_{hnf}}{T_0} (v \times B_0)^2 \tag{25}$$

Avec:
$$T_0 = \frac{T_c + T_h}{2} \tag{26}$$

6. Génération d'Entropie sous Forme Non Dimensionnelle

La génération d'entropie S_{tot} sous forme non dimensionnelle se lit comme suit :

$$S_{TOT} = S_{HT} + S_{FF} + S_{MF} \tag{27}$$

7. Entropie thermique non dimensionnelle S_{HT} :

$$S_{HT} = \frac{k_{hnf}}{k_{fluid}} \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)^2 \right] \tag{28}$$

8. Entropie visqueuse non dimensionnelle S_{FF} :

$$\begin{aligned}
S_{FF} = \frac{\mu_{hnf}}{\mu_{fluid}} N_\mu & \left[2 \left(\left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial Z} \right)^2 \right) \right. \\
& + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} \right)^2 \\
& + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right)^2 \\
& \left. + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} \right)^2 \right] \\
& + \frac{\mu_{hnf}}{\mu_{fluid}} N_\mu \frac{(U^2 + V^2 + W^2)}{Da}
\end{aligned} \tag{29}$$

9. Entropie magnétique non dimensionnelle S_{MF} :

$$S_{MF} = N_{\mu} \frac{\sigma_{\text{hnf}}}{\sigma_{\text{fluid}}} Ha^2 (U^2 + V^2) \quad (30)$$

9.1. Nombre de Bejan

Pour montrer lequel des effets visqueux et thermiques dominant, on définit un nombre sans dimension appelé nombre de Bejan. Ce nombre permet de montrer la contribution des effets thermiques dans la génération totale de l'entropie. Il est défini comme le rapport de la génération de l'entropie due aux effets thermiques sur la génération de l'entropie totale (Bejan, 1994):

$$Be = \frac{S_{\text{th}}}{S_{\text{TOT}}} \quad (31)$$

9.2. Les Nombres de Nusselt

Les nombres de Nusselt local et moyen sont estimés comme suit:

9.3. Nombre de Nusselt local Nu_{loc}

$$Nu_{loc} = -\frac{k_{eff}}{k_{fl}} \left(\frac{\partial \theta_{po}}{\partial n} \right)_{\text{wall}} \quad (32)$$

9.4. Nombre de Nusselt moyen Nu_{avg}

$$Nu_{avg} = \frac{1}{S^2} \int_0^S \int_0^S Nu_{loc} dy dz \quad (33)$$

10. Résolution Numérique

La résolution numérique des équations a été effectuée sur une configuration bidimensionnelle par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. Le maillage a été resserré près des parois en raison de la présence de couches limites avec des gradients de vitesse et de température élevés.

La méthode des éléments finis consiste à discrétiser le domaine géométrique de calcul en sousdomaines ou éléments de contrôle, dont les faces suivent les lignes de coordonnées. Son principe est simple, initialement développé pour les problèmes mécaniques, et s'applique ici aux équations de transfert de chaleur et de mécanique des fluides.

11. Validation et Évaluation du Maillage

Le nombre moyen de Nusselt (Nu_{avg}) et le nombre moyen de Bejan sont utilisés pour démontrer que le transport de chaleur ne dépend pas du nombre de grilles (voir Tableau 3).

Cinq grilles différentes ont été utilisées pour garantir que la taille de la grille sélectionnée n'influence pas les résultats. En raison de la variabilité observée (présentée dans le Tableau 2), la quatrième grille a été sélectionnée comme grille finale dans tous les cas afin de conserver un coût de calcul raisonnable tout en obtenant une bonne précision du résultat.

11.1. Validation du Modèle Numérique

Comme critère principal pour parvenir à des conclusions, la méthode numérique utilisée dans cette étude doit être validée par rapport à la littérature publiée. Les enquêtes antérieures menées par Ghasemi et al. [47] ont été utilisées pour valider le modèle numérique utilisé dans cette étude. Comme le montre la Figure 15, les résultats de notre modèle actuel concordent bien avec les résultats présentés par Ghasemi et al. [47].

Tableau 3: Différentes tailles de mailles pour $Ha = 0, \Omega = 0$ et $\varphi = 0, 02$.

Nombre d'éléments de grille	$Nu_{moy.}$	$Be_{moy.}$
13562	6.7285	0.29988
21955	6.8965	0.29566
41251	7.3427	0.29545
124306	7.352	0.29544
259231	7.351	0.29545

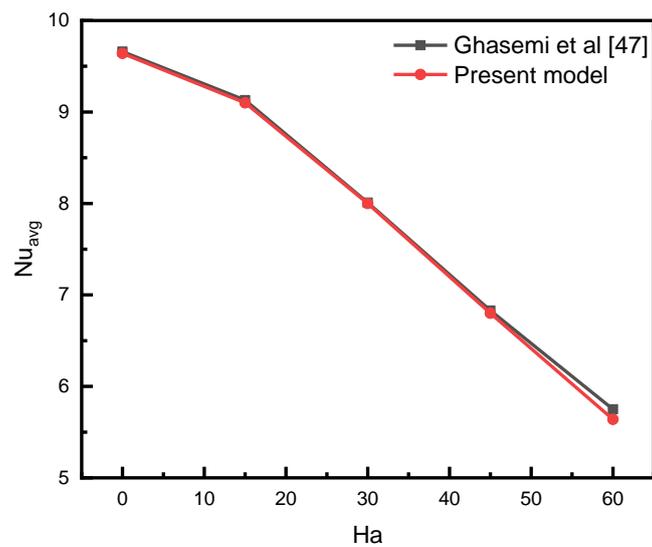


Figure 3.4: Comparaisons du modèle actuel avec des travaux antérieurs [47].

11.2. Méthodologie et Validation

Il est essentiel de garder à l'esprit que les équations gouvernantes et leurs contraintes associées ont été résolues en utilisant la technique des éléments finis de Galerkin. L'environnement de programmation est divisé en sections en forme de triangle, et des éléments finis triangulaires de Lagrange de différents ordres sont utilisés sur toutes les variables de flux dans le domaine de calcul. En substituant les équations directrices aux approximations, le résidu est obtenu.

11.3. Critère de Convergence

Le critère de convergence utilisé pour garantir la précision des résultats est défini par l'expression suivante :

$$\left| \frac{\Gamma^{(i+1)} - \Gamma^i}{\Gamma^i} \right| \leq 10^{-6} \quad (34)$$

Cette condition assure que les solutions obtenues sont suffisamment précises et stables pour les analyses menées.

Chapitre VI: résultat et discussion

Dans ce chapitre, nous examinons la performance de la cavité étudiée, mettant en lumière son comportement en termes d'écoulement et de transfert de chaleur dans un milieu poreux contenant un nanofluide hybride Fe₃O₄/MWCNT-eau. La cavité est équipée d'un cylindre adiabatique rotatif au centre, tandis que l'ensemble de la cavité est soumis à un champ magnétique provenant de son fond. La paroi du fond est ondulée pour augmenter davantage les taux de transfert de chaleur. Un cylindre intégré est ajouté pour induire un transfert de chaleur mixte plutôt que naturel.

Nous présentons les résultats à travers deux types de schémas : des visualisations massives en 3D pour illustrer les caractéristiques d'écoulement et de transfert de chaleur dans des conditions spécifiques, et des graphiques 2D pour étudier l'impact des paramètres choisis. Les variables sélectionnées incluent le nombre de Darcy (pour refléter la fluidité en fonction de la perméabilité du milieu poreux), la vitesse angulaire du cylindre (pour générer un transfert de chaleur par convection mixte), le nombre de Hartmann (pour évaluer l'impact du champ magnétique sur la viscosité de l'écoulement) et le nombre d'ondulations de la surface chaude (pour examiner toute amélioration supplémentaire des taux de transfert de chaleur).

L'effet de ces variables est évalué en comparant les lignes d'écoulement (pour visualiser la direction de l'écoulement), les isothermes sans dimension (pour identifier les régions chaudes et froides) et le nombre de Bejan (comme une mesure de la contribution des pertes de chaleur à l'entropie totale). Les valeurs étudiées pour ces variables sont comprises dans les plages suivantes : $-500 < \Omega < 1000$ rad/s pour la vitesse de rotation des cylindres, $0 < Ha < 100$ pour le nombre de Hartmann, $n = 1, 2, 3$ et 4 pour le nombre d'ondulations de la surface chaude, et $0,01 < Da < 0,00001$ pour le nombre de Darcy.

1. Effet de la vitesse et de la direction de rotation

Dans cette section, l'impact de la vitesse et de la direction de rotation des cylindres sur le transfert de chaleur et l'écoulement dans la cavité est examiné. Les résultats sont illustrés à la Figure 4.1, qui présente les tracés de surface des lignes de courant, des isothermes et du nombre de Bejan pour différentes valeurs et directions de vitesse du cylindre.

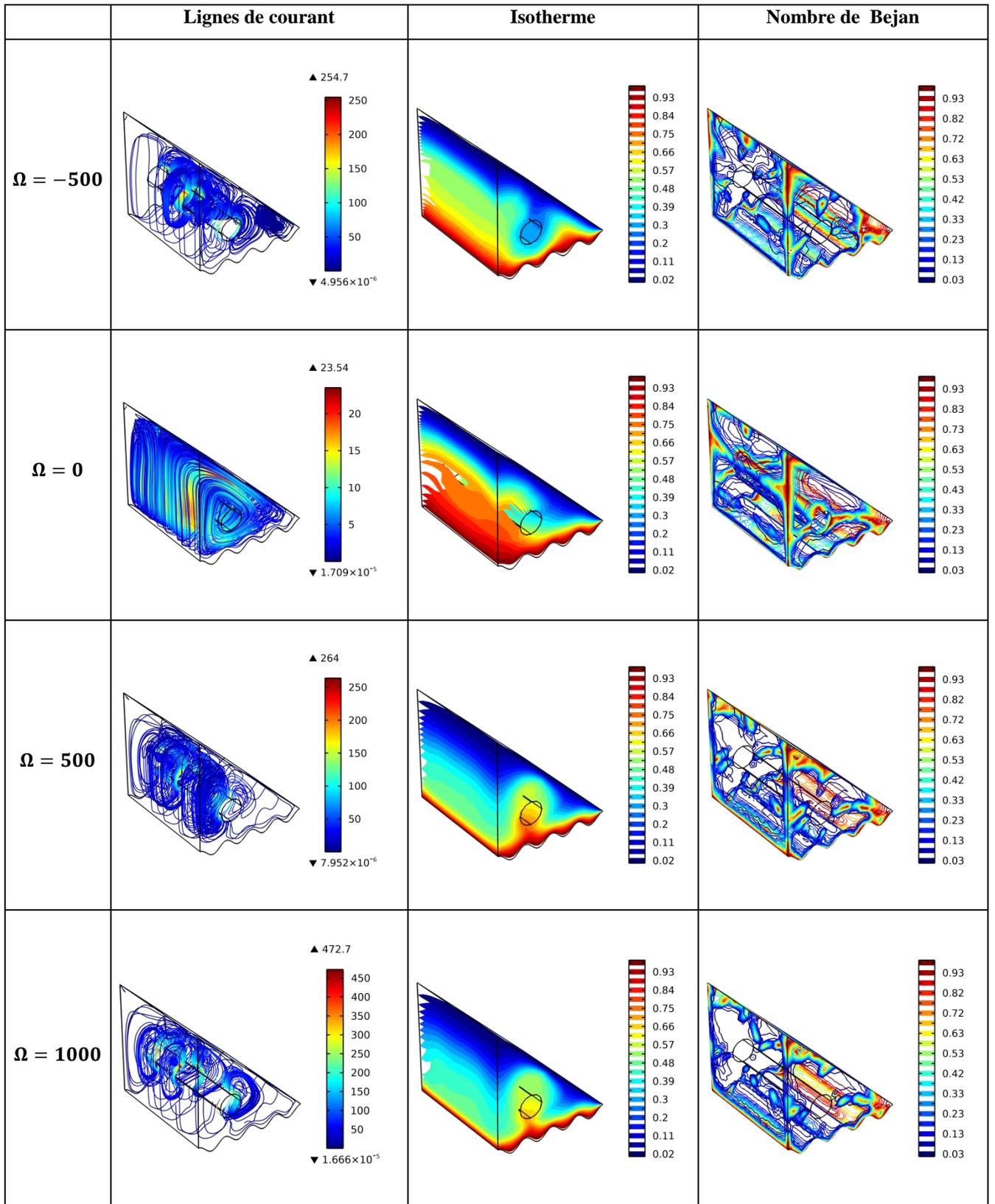


Figure 4.1. Tracés de surface de la vitesse, de la température et du nombre de Bejan pour différentes valeurs et directions de vitesse de cylindre.

Tout d'abord, pour $\Omega = 0$ rad/s (pas de rotation), les lignes de courant révèlent une circulation fluide des nanofluides dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, induite par le transfert naturel de chaleur par convection. Cette circulation, due à l'effet de flottabilité, conduit à une région chaude plus épaisse dans le coin gauche de la cavité, où la surface froide est éloignée. Cependant, les taux de transfert de chaleur sont plus faibles dans ces régions en raison de la faible turbulence résultant de la faible vitesse du fluide.

Pour les cas $\Omega = -500$ et 500 rad/s, le transfert de chaleur par convection mixte domine, entraînant une augmentation de la vitesse d'écoulement et un meilleur mélange des régions chaudes et froides. Pour $\Omega = -500$ rad/s (rotation dans le sens des aiguilles d'une montre), le transfert de chaleur est amélioré car le flux chaud et le flux froid sont mélangés sous le cylindre, favorisant ainsi le transfert de chaleur vers le haut du côté gauche. Cependant, des tourbillons peuvent apparaître dans certaines régions éloignées du cylindre rotatif, entraînant une génération plus élevée d'entropie près de ces régions.

En revanche, pour $\Omega = 500$ rad/s (rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre), le transfert de chaleur est plus efficace au-dessus du cylindre, car il favorise le mélange des fluides chauds et froids au-dessus du cylindre. Cependant, il est moins efficace en dessous par rapport au cas de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre. Ces résultats montrent clairement que la direction du mouvement du cylindre a un impact significatif sur les taux de transfert de chaleur.

En augmentant la vitesse d'écoulement, comme pour $\Omega = 1000$ rad/s, le transfert de chaleur s'améliore encore grâce à un meilleur mélange des flux chauds et froids. Il est à noter que pour $\Omega = -1000$ rad/s (non représenté), un transfert de chaleur encore meilleur est attendu, similaire au cas de $\Omega = -500$ rad/s mais avec une vitesse de rotation plus élevée.

Les régions bleues dans les diagrammes du nombre de Bejan indiquent la dominance du frottement de l'écoulement sur les valeurs de génération d'entropie, là où les pertes de chaleur sont faibles.

2. Effet du nombre de Hartmann

L'effet du nombre de Hartmann (Ha) sur le transfert de chaleur et l'écoulement dans la cavité est examiné dans cette section. Avec l'utilisation de nanoparticules métalliques, l'application de champs magnétiques du fond de la cavité induit une force corporelle hydromagnétique ascendante, également connue sous le nom de force de Lorentz. Idéalement, cette force devrait améliorer le transfert de chaleur de la surface chaude vers la surface froide, car elle agit dans la même direction que le flux thermique. Cependant, cette force entrave simultanément la recirculation du flux froid de haut en bas, car son effet et son écoulement de fluide sont dans la direction opposée. Ces effets opposés peuvent atténuer l'impact du champ magnétique appliqué sur le mouvement du fluide.

En outre, la rotation du cylindre contribue au mouvement d'écoulement et réduit l'importance de la force de Lorentz. Cependant, des valeurs plus élevées de Ha , telles que $Ha = 100$, peuvent entraîner des

mouvements d'écoulement contradictoires, entravant ainsi la circulation du fluide. L'impact global du champ magnétique sur le flux et le transfert de chaleur est évalué en examinant les rationalisations, les caractéristiques de température et les nombres de Bejan.

L'analyse des résultats, illustrée à la Figure 4.2, suggère que des valeurs plus basses de Ha , telles que $Ha = 0$, pourraient offrir de meilleures caractéristiques d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur. En effet, le champ magnétique exerce un impact opposé sur le mouvement du fluide, entraînant une augmentation de la génération d'entropie. Par conséquent, pour optimiser le transfert de chaleur et réduire les pertes d'entropie, des valeurs de Ha plus faibles pourraient être préférables.

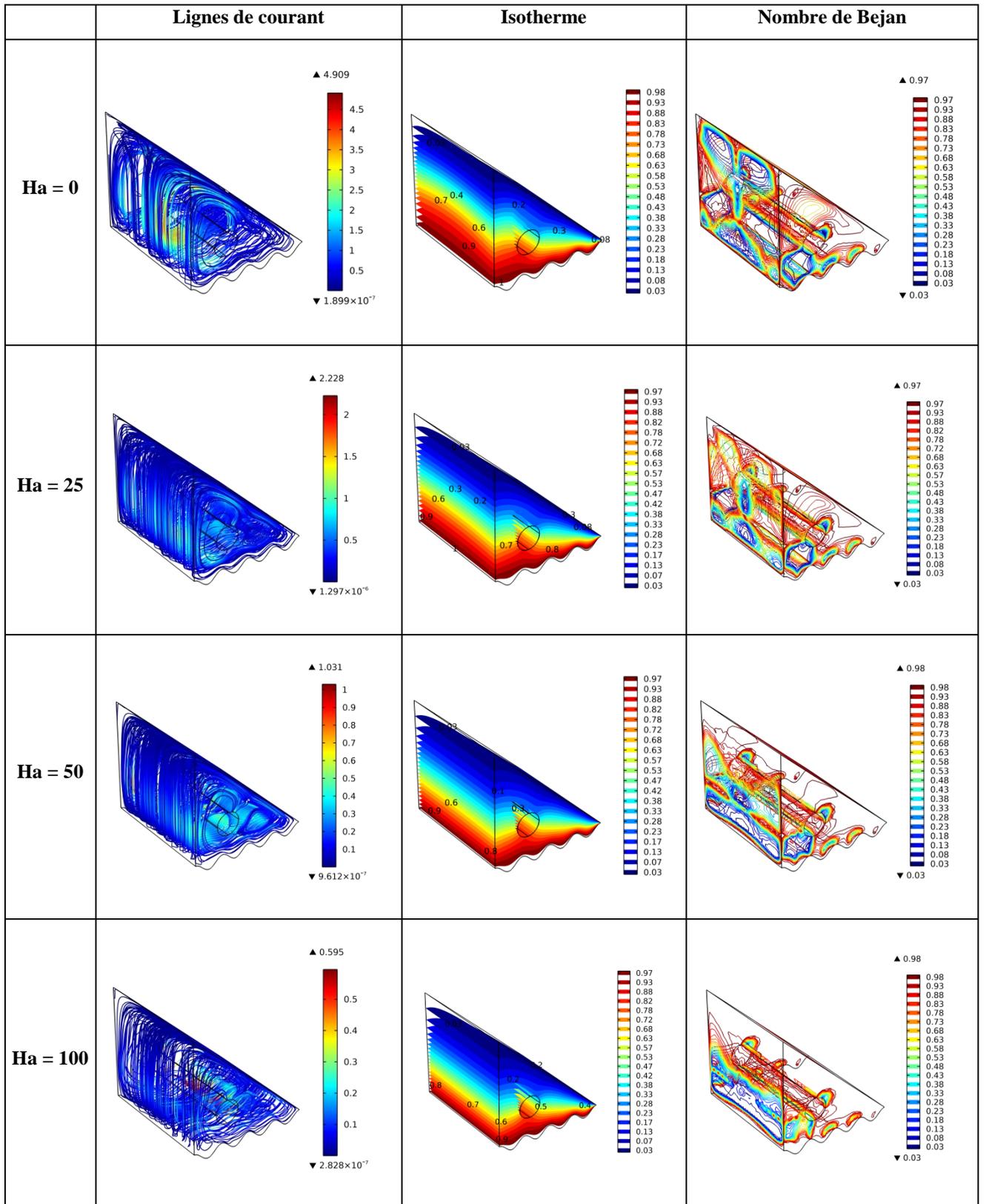


Figure 4.2. Représentations surfaciques de la vitesse, de la température et du nombre de Bejan pour différents nombres de Hartmann.

3. Effet du nombre d'ondulations des parois ondulées

Dans cette section, nous examinons l'effet du nombre d'ondulations des parois ondulées sur les caractéristiques de l'écoulement et du transfert de chaleur à l'intérieur de la cavité étudiée. L'illustration de cet impact est présentée à la Figure 4.3, où nous avons étudié les cas pour $n = 1, 2, 3$ et 4 .

$n = 1$:

Pour $n = 1$, les trajectoires d'écoulement sont uniformes et régulières, avec des caractéristiques de transfert de chaleur optimales. Les pertes de chaleur sont minimisées, et les taux de transfert de chaleur sont améliorés, en particulier près des surfaces chaudes. Cela s'explique par une réduction des pertes de transfert de chaleur et une meilleure exploitation de la rugosité des surfaces chaudes par le transfert de chaleur par convection mixte. Le faible nombre de Bejan près des surfaces chaudes indique des pertes de chaleur minimales et une efficacité accrue du transfert de chaleur.

$n \geq 2$:

Pour $n \geq 2$, le frottement de l'écoulement tend à augmenter près des surfaces chaudes, ce qui pourrait potentiellement améliorer le transfert de chaleur. Cependant, le transfert de chaleur par convection mixte ne parvient pas à exploiter efficacement la rugosité des surfaces chaudes, car la vitesse d'écoulement près de la paroi ondulée n'augmente pas de manière significative. Cela nécessiterait des forces supplémentaires pour induire un écoulement turbulent, telles que celles associées au transfert de chaleur par convection forcée. Les valeurs plus élevées du nombre de Bejan près des surfaces ondulées pour $n \geq 2$ reflètent une augmentation de la zone de transfert de chaleur, mais sans amélioration significative des taux de transfert de chaleur. Par conséquent, la contribution du transfert de chaleur à la génération d'entropie est plus élevée près de la surface ondulée, mais sans les avantages substantiels en termes de transfert de chaleur.

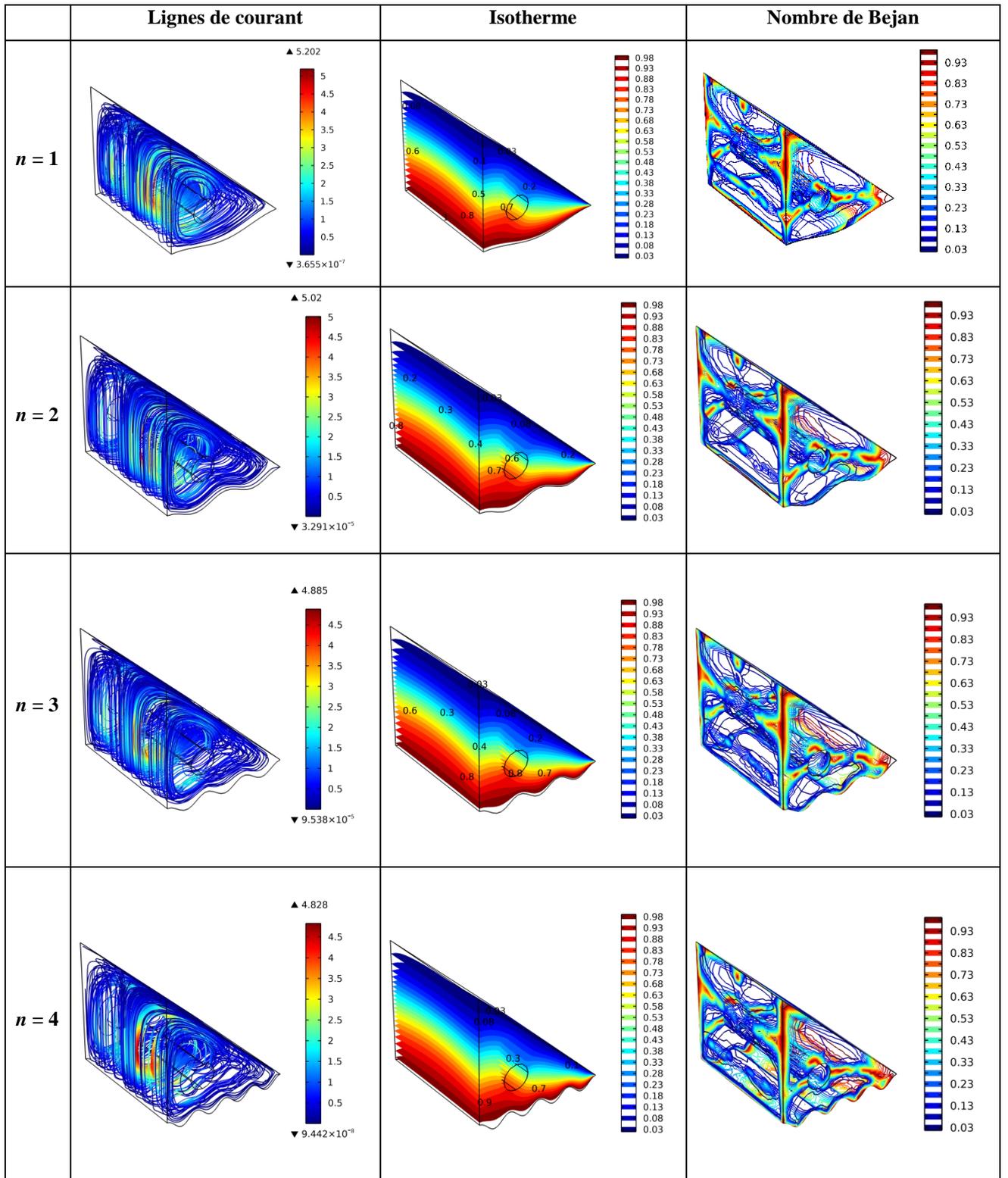


Figure 4.3. Tracés de surface de la vitesse, de la température et du nombre de Bejan pour divers nombres d'ondulations des murs.

4. Effet du nombre de Darcy

Le nombre de Darcy, en fonction de la perméabilité du milieu poreux, joue un rôle prépondérant dans la dynamique de l'écoulement à l'intérieur de la cavité examinée. Dans cette section, nous explorons l'influence de Da sur le comportement du flux, la distribution de la température et les caractéristiques d'entropie du système dans une cavité cubique en 3D, en considérant différentes valeurs de Da , à savoir 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} et 10^{-2} .

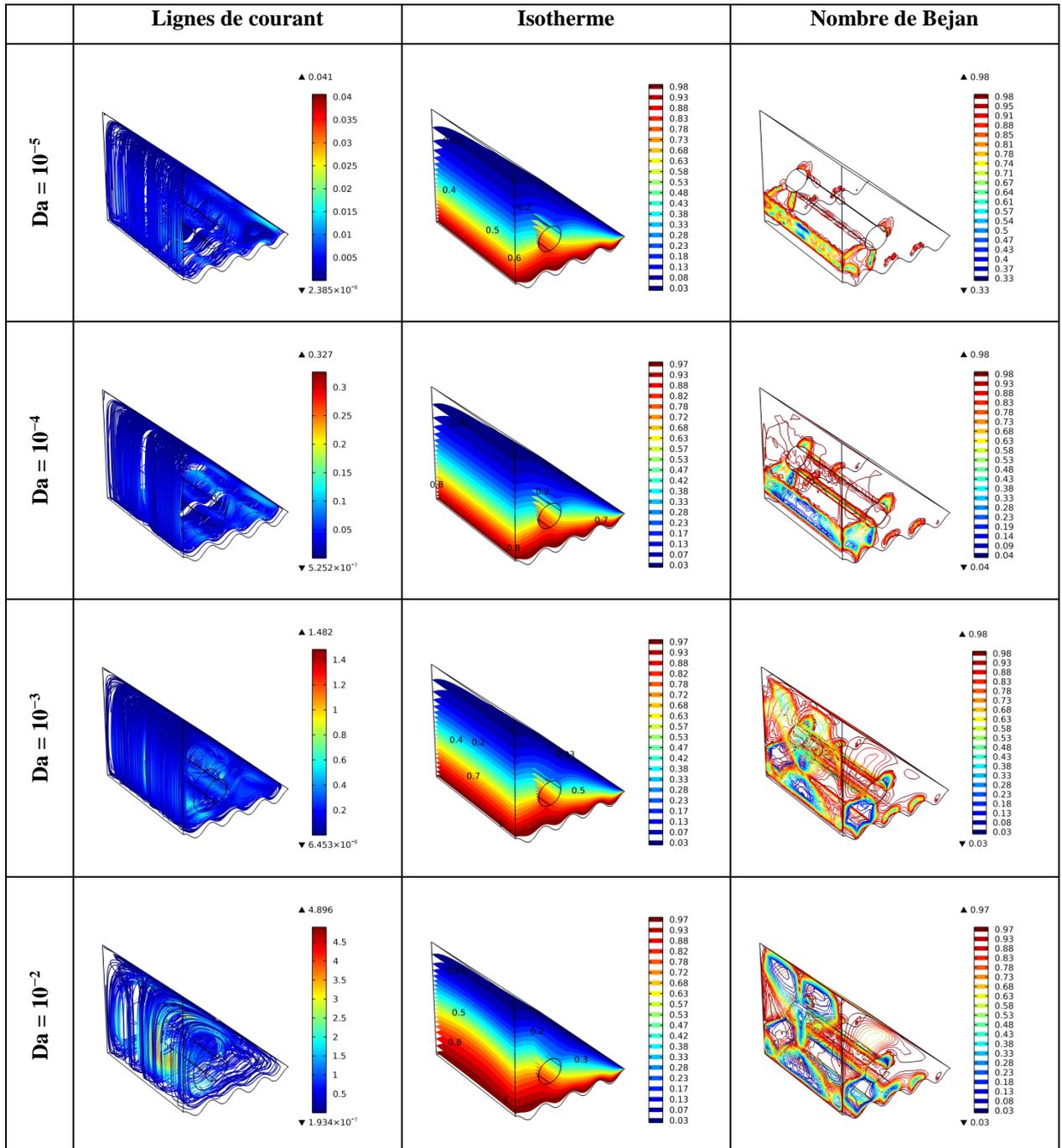


Figure 4.4. Surface plots of the velocity, temperature, and Bejan number for various Darcy number values.

La Figure 4.4 illustre ces variations en présentant les trajectoires d'écoulement, les isothermes et le nombre de Bejan pour ces différentes valeurs de Da . Il est observé que :

- Les trajectoires d'écoulement et la distribution de la température tendent à s'améliorer pour des valeurs plus élevées de Da , telles que $Da = 10^{-2}$. Cette amélioration est attribuable à une perméabilité accrue du milieu poreux, ce qui entraîne une résistance réduite à l'écoulement des nanofluides et une plus grande liberté d'écoulement à travers la cavité.
- En revanche, pour des valeurs faibles de Da ($Da < 10^{-4}$), la résistance poreuse augmente, ce qui ralentit la vitesse d'écoulement et accroît les pertes de charge. Cela se traduit par une moins bonne distribution de la température et une performance globale moins efficace en termes de transfert de chaleur.
- L'analyse des caractéristiques de température révèle que la convection mixte devient le mode prédominant de transfert de chaleur pour des nombres de Darcy élevés, où la vitesse d'écoulement augmente significativement. En revanche, pour des valeurs faibles de Da , la conduction thermique prévaut en raison de la faible vitesse d'écoulement.
- En ce qui concerne le nombre de Bejan, on observe une réduction de celui-ci avec l'augmentation de Da , en raison de l'amélioration concomitante de la vitesse d'écoulement et du transfert de chaleur. Cette diminution du nombre de Bejan reflète une diminution des pertes de chaleur et une meilleure efficacité thermique du système.

5. Parcelles détaillées pour l'étude paramétrique

Dans cette section, nous analysons en détail l'impact des différents paramètres sur les caractéristiques de transfert de chaleur et de perte de chaleur à l'intérieur de la cavité.

5.1. Impact du nombre de Darcy et de la vitesse/direction de rotation

La Figure 4.5 présente l'effet du nombre de Darcy et de la vitesse/direction de rotation du cylindre sur le nombre moyen de Nusselt (Nu_{avg}) et les pertes de chaleur représentées par le nombre moyen de Bejan (Be_{avg}).

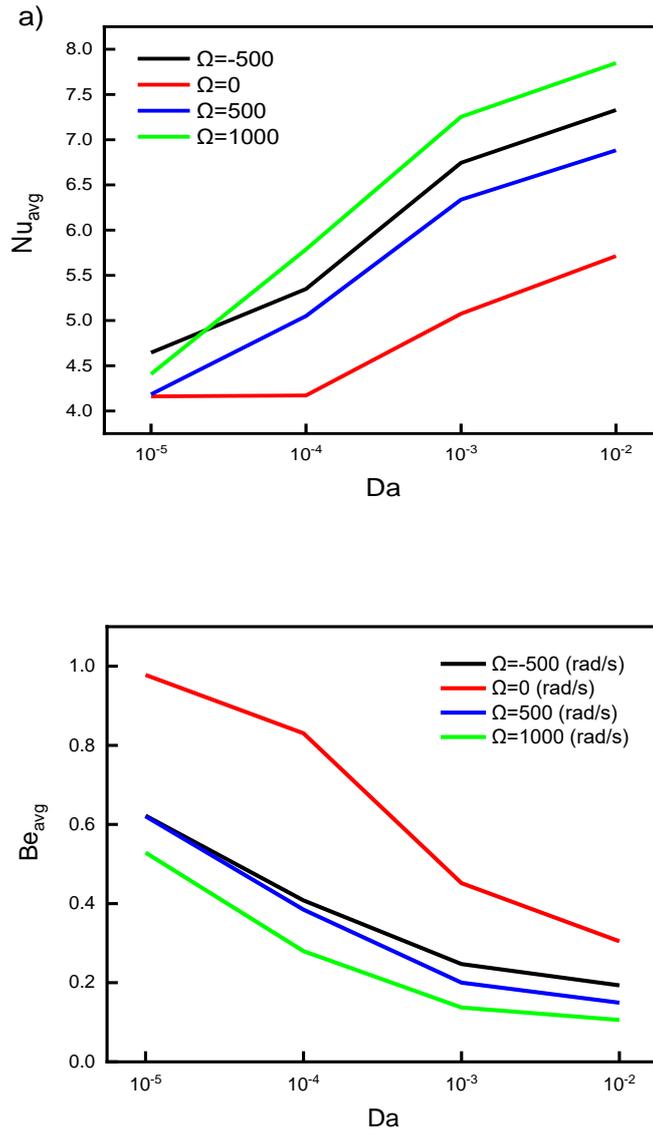


Figure 4.5. Impact du nombre de Darcy sur Nu_{avg} et Be_{avg} pour différentes vitesses de rotation des cylindres.

- L'augmentation du nombre de Darcy (Da) indique une plus grande fluidité et une faible résistance à l'écoulement, favorisant ainsi une meilleure circulation du fluide à l'intérieur de la cavité. En conséquence, Nu_{avg} est directement proportionnel à Da , indiquant une amélioration du transfert de chaleur avec une augmentation de Da .

- De plus, l'augmentation de la vitesse de rotation du cylindre améliore la circulation de l'écoulement et, par conséquent, Nu_{avg} . En particulier, dans le sens des aiguilles d'une montre, le mélange des flux chauds et froids est favorisé, entraînant une augmentation de Nu_{avg} .

- En ce qui concerne les pertes de chaleur, représentées par Be_{avg} , une augmentation de Da réduit les pertes de chaleur en minimisant les obstacles à l'écoulement. Cependant, des valeurs plus élevées de Be_{avg} sont observées pour des vitesses de rotation du cylindre plus élevées, en raison de l'augmentation des pertes de chaleur dans certaines zones de la cavité.

5.2. Impact du nombre de Hartmann

La Figure 4.6 illustre l'impact du nombre de Hartmann (Ha) sur Nu_{avg} et Be_{avg} pour différentes vitesses de rotation des cylindres.

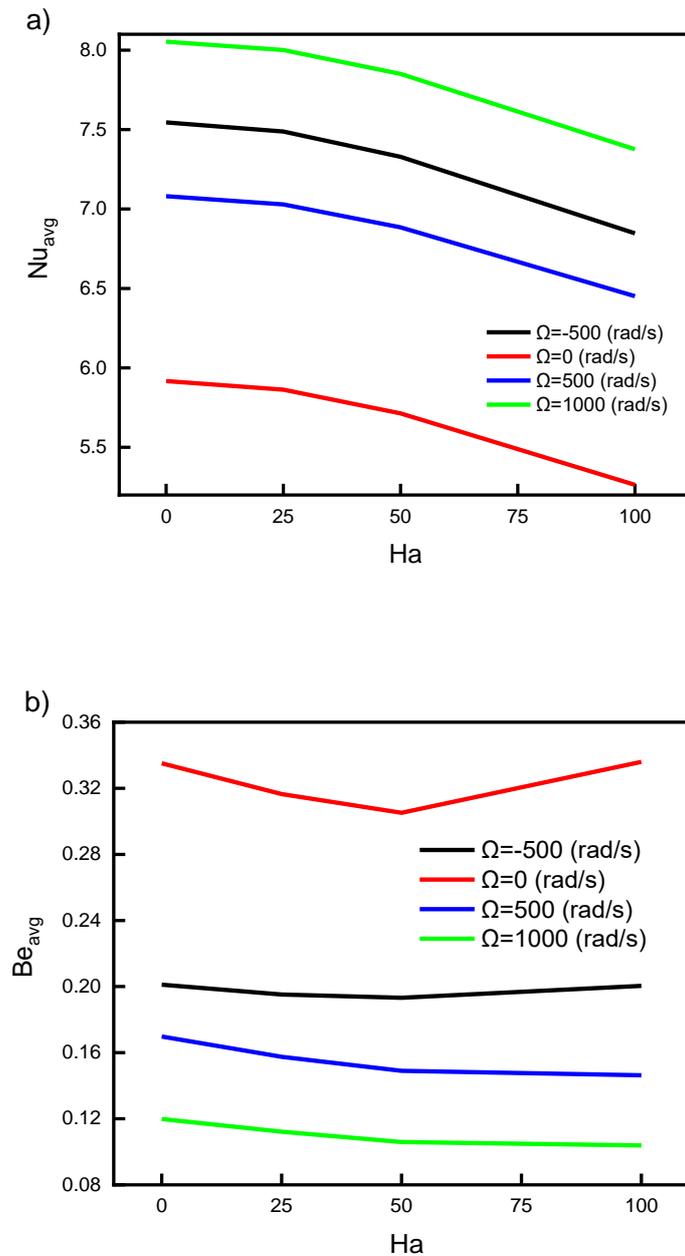
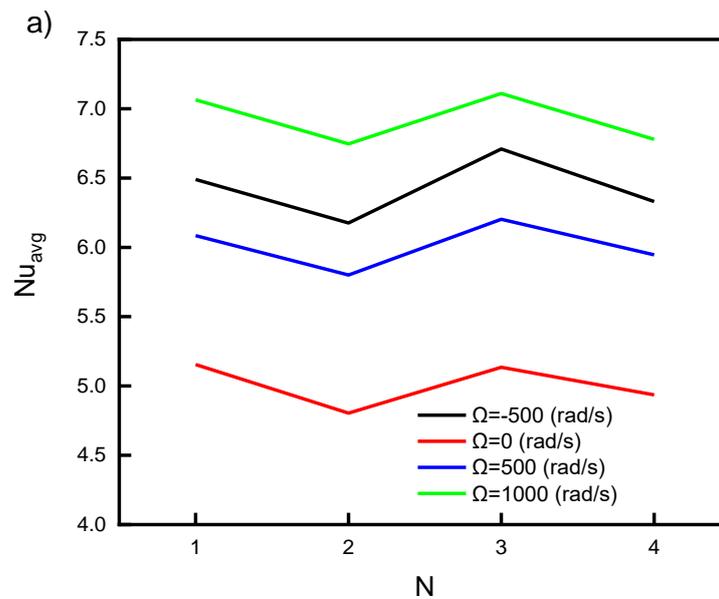


Figure 4.6. Impact du nombre de Hartmann sur la moyenne Nu et la moyenne Be pour différentes vitesses de rotation des cylindres.

- L'augmentation du nombre de Hartmann entraîne une diminution de Nu_{avg} en raison de l'entrave du processus de recirculation du flux. Cependant, Nu_{avg} est amplifié avec une augmentation de la vitesse de rotation du cylindre, grâce à un transfert de chaleur par convection mixte amélioré.
- Pour les pertes de chaleur, l'impact de Ha sur Be_{avg} est négligeable, indiquant que les contributions du frottement et du transfert de chaleur restent les mêmes. Cependant, $Ha = 0$ est recommandé pour des taux de transfert de chaleur plus élevés et une génération d'entropie plus faible.

5.3. Impact du nombre d'ondulations des parois ondulées

La Figure 4.7 examine l'impact du nombre d'ondulations des parois ondulées sur Nu_{avg} et Be_{avg} pour différentes vitesses de rotation des cylindres.



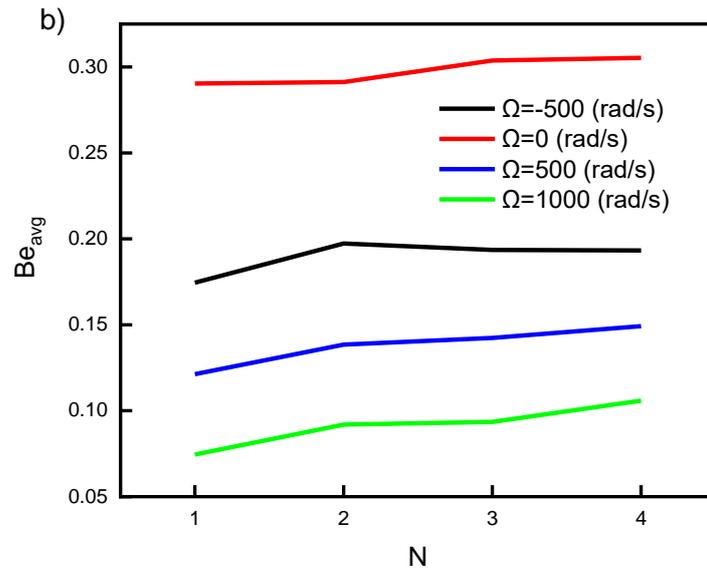


Figure 4.7. Influence du nombre d'ondulations sur Nu_{avg} et Be_{moy} pour différentes vitesses de rotation des cylindres.

- La variation du nombre d'ondulations ne semble pas améliorer significativement les taux de transfert de chaleur lorsque la convection mixte est mise en œuvre, indiquant que $n = 1$ est suffisant pour ce cas.
- L'effet zigzag et la faible amélioration des valeurs de Nu_{avg} pour $n = 1$ et 3 sont dus à la faible distance verticale entre le cylindre et la paroi ondulée pour ces cas. En revanche, des valeurs plus élevées de n entraînent une plus grande distance entre le cylindre et la paroi, réduisant ainsi Nu_{avg} .

Conclusion Général et Perspective au Future

Conclusion générale

Une cavité triangulaire tridimensionnelle, remplie de milieu poreux et de nanofluide hybride $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ -eau, est simulée dans la présente étude. La paroi inférieure est chauffée et ondulée, tandis que la paroi inclinée de l'ascenseur est froide, avec l'autre paroi isolée. La cavité est soumise à un champ magnétique depuis le bas dans la direction z positive. Un cylindre tournant est inclus dans la région d'écoulement pour le mécanisme de transfert de chaleur par convection mixte. La méthode des éléments finis (FEM) est employée pour résoudre les équations régissant l'écoulement des fluides et le transfert de chaleur sous la forme d'un écoulement newtonien. Pour analyser les caractéristiques d'écoulement du fluide et de transfert de chaleur, certains paramètres importants sont étudiés, tels que le nombre de Darcy (10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2}), le nombre de Hartmann ($\text{Ha} = 0, 20, 50, 100$), la vitesse de rotation du cylindre ($\Omega = -500, 0, 500, 1\ 000$ rad/s) et le nombre d'ondulations de la paroi ondulée ($n = 1, 2, 3$ et 4). L'influence de ces paramètres est présentée par des tracés de surface 3D des lignes de courant, des isothermes, du nombre de Bejan et des profils 2D pour le nombre de Nusselt moyen et le nombre de Bejan moyen. Sur la base des conditions appliquées, les résultats de cette étude conduisent aux conclusions suivantes :

- L'augmentation de la vitesse angulaire du cylindre améliore les caractéristiques d'écoulement et de transfert de chaleur du nanofluide. Une amélioration plus importante est observée lorsque le sens de rotation du cylindre est dans le sens des aiguilles d'une montre pour renforcer les flux froids mélangés aux flux chauds sous le cylindre.
- L'augmentation des valeurs Ha (effets magnétiques) jusqu'à 100 entrave le mouvement de l'écoulement et entraîne une irréversibilité accrue due à la fois aux pertes par frottement et par transfert de chaleur. Cependant, grâce à la présence du cylindre mobile, l'effet du champ magnétique est minimisé.

- Grâce à la résistance des milieux poreux, la fluidité et le transfert thermique sont améliorés pour des valeurs Da supérieures à 10^{-3} .

- L'ondulation de la paroi avec $n = 1$ est suffisante pour un transfert de chaleur amélioré et une faible irréversibilité. Au-delà de 1 ($n \geq 2$), aucun gain perceptible dans les taux de transfert de chaleur pour le transfert de chaleur par convection mixte n'est observé.

En conséquence, la cavité poreuse triangulaire chargée de nanofluide hybride $Fe_3O_4/MWCNT$ -eau pourrait présenter des taux de transfert de chaleur améliorés lorsque $Ha = 0$, $Da > 10^{-3}$, $n = 1$ et $\Omega > \pm 500$ rad/s.

References

Références

- [1] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] D. A. Nield and A. Bejan, *Convection in porous media*, vol. 3. Springer, 2006.
- [3] C. H. Forsberg, “Chapter 7 - Natural (free) convection,” C. H. B. T.-H. T. P. and A. Forsberg, Ed. Academic Press, 2021, pp. 267–304.
- [4] D. Ting, “Chapter 15 - Natural convection,” D. B. T.-T. Ting, Ed. Academic Press, 2022, pp. 295–319.
- [5] S. Maruyama and S. Moriya, “Newton’s Law of Cooling: Follow up and exploration,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 164, p. 120544, 2021.
- [6] H. ALFVÉN, “Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves,” *Nature*, vol. 150, no. 3805, pp. 405–406, 1942, doi: 10.1038/150405d0.
- [7] P. A. Davidson, “An introduction to magnetohydrodynamics.” American Association of Physics Teachers, 2002.
- [8] R. L. Vekariya, A. Dhar, P. K. Paul, and S. Roy, “An overview of engineered porous material for energy applications: a mini-review,” *Ionics (Kiel)*, vol. 24, no. 1, pp. 1–17, 2018.
- [9] H. Singh and R. S. Myong, “Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro-to Nano-scale Porous Media Applications in the Energy Sector,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2018, 2018.
- [10] D. B. Ingham, A. Bejan, E. Mamut, and I. Pop, “Emerging technologies and techniques in porous media,” 2012.
- [11] H. J. Xu, L. Gong, C. Y. Zhao, Y. H. Yang, and Z. G. Xu, “Analytical considerations of local thermal non-equilibrium conditions for thermal transport in metal foams,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 95, pp. 73–87, 2015, doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2015.04.007](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.04.007).
- [12] G. Metcalfe, D. Lester, and M. Trefry, “A Primer on the Dynamical Systems Approach to Transport in Porous Media,” *Transp. Porous Media*, 2022, doi: 10.1007/s11242-022-01811-6.
- [13] S. Rashidi, J. A. Esfahani, and N. Karimi, “Porous materials in building energy technologies—A review of the applications, modelling and experiments,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, pp. 229–247, 2018.
- [14] G. Yan, Z. Li, S. A. Galindo Torres, A. Scheuermann, and L. Li, “Transient Two-Phase Flow in Porous Media: A Literature Review and Engineering Application in Geotechnics,” *Geotechnics*, vol. 2, no. 1, pp. 32–90, 2022.

- [15] W. C. Tan, L. H. Saw, H. San Thiam, J. Xuan, Z. Cai, and M. C. Yew, "Overview of porous media/metal foam application in fuel cells and solar power systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 96, pp. 181–197, 2018.
- [16] S. Whitaker, "Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy's law," *Transp. Porous Media*, vol. 1, no. 1, pp. 3–25, 1986.
- [17] X. B. Chen, P. Yu, S. H. Winoto, and H. T. Low, "Free convection in a porous wavy cavity based on the Darcy-Brinkman-Forchheimer extended model," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 52, no. 4, pp. 377–397, 2007.
- [18] D. Li and T. W. Engler, "Literature review on correlations of the non-Darcy coefficient," in *SPE permian basin oil and gas recovery conference*, 2001.
- [19] M. J. Blunt, "Flow in porous media—pore-network models and multiphase flow," *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 197–207, 2001.
- [20] J. Hommel, E. Coltman, and H. Class, "Porosity–permeability relations for evolving pore space: a review with a focus on (bio-) geochemically altered porous media," *Transp. Porous Media*, vol. 124, no. 2, pp. 589–629, 2018.
- [21] S. Aramideh, P. P. Vlachos, and A. M. Ardekani, "Pore-scale statistics of flow and transport through porous media," *Phys. Rev. E*, vol. 98, no. 1, p. 13104, 2018.
- [22] A. Y. Al-Maharma, S. P. Patil, and B. Markert, "Effects of porosity on the mechanical properties of additively manufactured components: A critical review," *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 12, p. 122001, 2020.
- [23] R. Schulz, N. Ray, S. Zech, A. Rupp, and P. Knabner, "Beyond Kozeny–Carman: predicting the permeability in porous media," *Transp. Porous Media*, vol. 130, no. 2, pp. 487–512, 2019.
- [24] H. J. Xu, Z. B. Xing, F. Q. Wang, and Z. M. Cheng, "Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 195, pp. 462–483, 2019, doi: 10.1016/j.ces.2018.09.045.
- [25] D. A. Nield and C. T. Simmons, "A brief introduction to convection in porous media," *Transp. Porous Media*, vol. 130, no. 1, pp. 237–250, 2019.
- [26] K. Khanafer and K. Vafai, "Applications of nanofluids in porous medium," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 135, no. 2, pp. 1479–1492, 2019.
- [27] B. P. Benam, A. K. Sadaghiani, V. Yağcı, M. Parlak, K. Sefiane, and A. Koşar, "Review on high heat flux flow boiling of refrigerants and water for electronics cooling," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 180, p. 121787, 2021.
- [28] A. Genbach, H. Beloev, and D. Bondartsev, "Comparison of Cooling Systems in Power Plant Units," *Energies*, vol. 14, no. 19, p. 6365, 2021.
- [29] J. M. P. França, M. J. V Lourenço, S. M. S. Murshed, A. A. H. Pádua, and C. A. Nieto de Castro, "Thermal conductivity of ionic liquids and ionanofluids and their feasibility as heat transfer fluids," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 57, no. 18, pp. 6516–6529, 2018.

- [30] T. J. Ober, D. Foresti, and J. A. Lewis, “Active mixing of complex fluids at the microscale,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 112, no. 40, pp. 12293–12298, 2015.
- [31] S. U. S. Choi, “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles,” *Am. Soc. Mech. Eng. Fluids Eng. Div. FED*, vol. 231, no. January 1995, pp. 99–105, 1995.
- [32] Y. Li, S. Tung, E. Schneider, and S. Xi, “A review on development of nanofluid preparation and characterization,” *Powder Technol.*, vol. 196, no. 2, pp. 89–101, 2009.
- [33] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, S. R. Aid, T. L. Ken, and Y. Asako, “Review on preparation techniques, properties and performance of hybrid nanofluid in recent engineering applications,” *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 45, no. 1, pp. 1–13, 2018.
- [34] Y. X. Li et al., “Dynamics of aluminum oxide and copper hybrid nanofluid in nonlinear mixed Marangoni convective flow with entropy generation: Applications to renewable energy,” *Chinese J. Phys.*, vol. 73, no. September 2020, pp. 275–287, 2021, doi: 10.1016/j.cjph.2021.06.004.
- [35] A. Sohani et al., “Selecting the best nanofluid type for A photovoltaic thermal (PV/T) system based on reliability, efficiency, energy, economic, and environmental criteria,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 124, pp. 351–358, 2021.
- [36] Q. Xiong, A. Hajjar, B. Alshuraiaan, M. Izadi, S. Altnji, and S. A. Shehzad, “State-of-the-art review of nanofluids in solar collectors: A review based on the type of the dispersed nanoparticles,” *J. Clean. Prod.*, vol. 310, p. 127528, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127528.
- [37] T. R. Shah and H. M. Ali, “Applications of hybrid nanofluids in solar energy, practical limitations and challenges: a critical review,” *Sol. energy*, vol. 183, pp. 173–203, 2019.
- [38] M. Muneeshwaran, G. Srinivasan, P. Muthukumar, and C. C. Wang, “Role of hybrid-nanofluid in heat transfer enhancement – A review,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 125, no. May, p. 105341, 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105341.
- [39] A. Kumar and S. Subudhi, “Preparation, characterization and heat transfer analysis of nanofluids used for engine cooling,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 160, p. 114092, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114092.
- [40] K. R. Aglawe, R. K. Yadav, and S. B. Thool, “Preparation, applications and challenges of nanofluids in electronic cooling: A systematic review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 43, pp. 366–372, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.679.
- [41] M. Imran, A. M. Affandi, M. M. Alam, A. Khan, and A. I. Khan, “Advanced biomedical applications of iron oxide nanostructures based ferrofluids,” *Nanotechnology*, vol. 32, no. 42, p. 422001, 2021.
- [42] A. Mourad, A. Aissa, Z. Said, O. Younis, M. Iqbal, and A. Alazzam, “Recent advances on the applications of phase change materials for solar collectors, practical limitations, and challenges: A critical review,” *J. Energy Storage*, vol. 49, p. 104186, May 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104186.

- [43] A. R. I. Ali and B. Salam, “A review on nanofluid: preparation, stability, thermophysical properties, heat transfer characteristics and application,” *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 10, p. 1636, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-03427-1.
- [44] B. Sanjeevi and K. Loganathan, “Synthesis of multi wall carbon nanotubes nanofluid by using two step method,” *Therm. Sci.*, vol. 24, no. 1 Part B, pp. 519–524, 2020.
- [45] B. Ma, D. Shin, and D. Banerjee, “One-step synthesis of molten salt nanofluid for thermal energy storage application – a comprehensive analysis on thermophysical property, corrosion behavior, and economic benefit,” *J. Energy Storage*, vol. 35, p. 102278, 2021, doi: [10.1016/j.est.2021.102278](https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102278).
- [46] L. Yang, W. Ji, M. Mao, and J. nan Huang, “An updated review on the properties, fabrication and application of hybrid-nanofluids along with their environmental effects,” *J. Clean. Prod.*, vol. 257, p. 120408, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120408.
- [48] S. Simpson, A. Schelfhout, C. Golden, and S. Vafaei, “Nanofluid thermal conductivity and effective parameters,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 1, p. 87, 2018.
- [47] A. Barkhordar, R. Ghasemiasl, and T. Armaghani, “Statistical study and a complete overview of nanofluid viscosity correlations: a new look,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 1–34, 2021.
- [49] A. A. Minea and M. G. Moldoveanu, “Overview of hybrid nanofluids development and benefits,” *J. Eng. Thermophys.*, vol. 27, no. 4, pp. 507–514, 2018.
- [50] H. Adun, D. Kavaz, and M. Dagbasi, “Review of ternary hybrid nanofluid: Synthesis, stability, thermophysical properties, heat transfer applications, and environmental effects,” *J. Clean. Prod.*, p. 129525, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129525.
- [51] S. Singh and K. S. Kumar, “Influence of nanomaterials on nanofluid application—a review,” in *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2341, no. 1, p. 40016.
- [52] M. Gupta, V. Singh, S. Kumar, S. Kumar, N. Dilbaghi, and Z. Said, “Up to date review on the synthesis and thermophysical properties of hybrid nanofluids,” *J. Clean. Prod.*, vol. 190, pp. 169–192, 2018.
- [53] J. M. Munyalo and X. Zhang, “Particle size effect on thermophysical properties of nanofluid and nanofluid based phase change materials: A review,” *J. Mol. Liq.*, vol. 265, pp. 77–87, 2018, doi: 10.1016/j.molliq.2018.05.129.
- [54] A. I. Khan and A. V. Arasu, “A review of influence of nanoparticle synthesis and geometrical parameters on thermophysical properties and stability of nanofluids,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 11, pp. 334–364, 2019.
- [55] B. Nigam, S. Mittal, A. Prakash, S. Satsangi, P. K. Mahto, and B. P. Swain, “Synthesis and characterization of Fe₃O₄ nanoparticles for nanofluid applications-a review,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 377, no. 1, p. 12187.
- [56] J. Li, X. Zhang, B. Xu, and M. Yuan, “Nanofluid research and applications: A review,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 127, p. 105543, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105543.

- [57] F. Iriaye, A. A. Noiki, O. O. Yusuf, S. A. Afolalu, and M. E. Egbe, "Overview of Nanofluid Applications and Its Sustainability," *Adv. Manuf. Biol. Pet. Nanotechnol. Process.*, pp. 45–54, 2022.
- [58] S. Chakraborty and P. K. Panigrahi, "Stability of nanofluid: A review," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 174, no. April, 2020, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2020.115259](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115259).
- [59] Y. Menni, A. J. Chamkha, and A. Azzi, "Nanofluid transport in porous media: a review," *Spec. Top. Rev. Porous Media An Int. J.*, vol. 10, no. 1, 2019.
- [60] S. E. Ahmed, Z. A. S. Raizah, and A. M. Aly, "Impacts of the Variable Properties of a Porous Medium on the Entropy Analysis Within Odd-Shaped Enclosures Filled by Hybrid Nanofluids," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 46, no. 8, pp. 7379–7398, 2021, doi: [10.1007/s13369-020-05218-7](https://doi.org/10.1007/s13369-020-05218-7).
- [61] T. Tayebi, A. J. Chamkha, H. F. Öztöp, and L. Bouzeroura, "Local thermal non-equilibrium (LTNE) effects on thermal-free convection in a nanofluid-saturated horizontal elliptical non-Darcian porous annulus," *Math. Comput. Simul.*, vol. 194, pp. 124–140, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2021.11.011>.
- [62] A. Ullah Khan, N. Ullah, A. Al-Zubaidi, and S. Nadeem, "Finite element analysis for CuO/water nanofluid in a partially adiabatic enclosure: Inclined Lorentz forces and porous medium resistance," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 8, pp. 6477–6488, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.12.007>.
- [63] Z. A. S. Raizah, A. M. Aly, and S. E. Ahmed, "Natural convection flow of a nanofluid-filled V-shaped cavity saturated with a heterogeneous porous medium: Incompressible smoothed particle hydrodynamics analysis," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 2, pp. 2033–2046, 2021, doi: [10.1016/j.asej.2020.09.026](https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.09.026).
- [64] T. Tayebi, H. F. Öztöp, and A. J. Chamkha, "Natural convection and entropy production in hybrid nanofluid filled-annular elliptical cavity with internal heat generation or absorption," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 19, p. 100605, 2020, doi: [10.1016/j.tsep.2020.100605](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100605).
- [65] S. Baghsaz, S. Rezanejad, and M. Moghimi, "Numerical investigation of transient natural convection and entropy generation analysis in a porous cavity filled with nanofluid considering nanoparticles sedimentation," *J. Mol. Liq.*, vol. 279, pp. 327–341, 2019, doi: [10.1016/j.molliq.2019.01.117](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.117).
- [66] T. Tayebi and A. J. Chamkha, "Analysis of the effects of local thermal non-equilibrium (LTNE) on thermo-natural convection in an elliptical annular space separated by a nanofluid-saturated porous sleeve," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 129, p. 105725, 2021, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105725](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105725).
- [67] M. H. Esfe, H. Rostamian, D. Toghraie, M. Hekmatifar, and A. T. Khalil Abad, "Numerical study of heat transfer of U-shaped enclosure containing nanofluids in a porous medium using two-phase mixture method," *Case Stud. Therm. Eng.*, p. 102150, 2022, doi: [10.1016/j.csite.2022.102150](https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102150).
- [68] G. Wang, Z. Zhang, R. Wang, and Z. Zhu, "A review on heat transfer of nanofluids by applied electric field or magnetic field," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 12, p. 2386, 2020.

- [69] S. O. Giwa, M. Sharifpur, M. H. Ahmadi, and J. P. Meyer, “Magnetohydrodynamic convection behaviours of nanofluids in non-square enclosures: A comprehensive review,” *Math. Methods Appl. Sci.*, 2020.
- [70] G. K. Poongavanam, S. Duraisamy, V. S. Vigneswaran, and V. Ramalingam, “Review on the electrical conductivity of nanofluids: Recent developments,” *Mater. Today Proc.*, vol. 39, pp. 1532–1537, 2021.
- [71] M. Hatami, S. Mohammadi-Rezaei, M. Tahari, and D. Jing, “Recent developments in magnetohydrodynamic Fe₃O₄ nanofluids for different molecular applications: A review study,” *J. Mol. Liq.*, vol. 250, pp. 244–258, 2018, doi: 10.1016/j.molliq.2017.11.171.
- [72] N. R. Devi, S. Moolya, H. F. Öztöp, N. Abu-Hamdeh, P. Padmanathan, and A. Satheesh, “A review on ferrofluids with the effect of MHD and entropy generation due to convective heat transfer,” *Eur. Phys. J. Plus**, vol. 137, no. 4, p. 482, 2022.
- [73] S. Yazdani, “Evaluation of water-based Fe₃O₄ ferrofluid heat transfer in the presence of external electromagnetic field: A review,” *J. Mech. Res. Appl.*, vol. 10, no. 4, pp. 1–25, 2020.
- [74] G. Yan, A. Shawabkeh, R. Chaturvedi, R. Nur-Firyal, and M. Mehdizadeh Youshanlouei, “Using MHD free convection to receive the generated heat by an elliptical porous media,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 36, p. 102153, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102153>.
- [75] H. A. Nabwey, A. M. Rashad, W. A. Khan, and S. I. Alshber, “Effectiveness of magnetize flow on nanofluid via unsteady natural convection inside an inclined U-shaped cavity with discrete heating,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 11, pp. 8653–8666, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.010>.
- [76] A. Abderrahmane, M. Hatami, M. A. Medebber, S. Haroun, S. E. Ahmed, and S. Mohammed, “Non-Newtonian nanofluid natural convective heat transfer in an inclined Half-annulus porous enclosure using FEM,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 7, pp. 5441–5453, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.004>.
- [77] A. Rahman, D. A. Redwan, S. Thohura, M. Kamrujjaman, and M. M. Molla, “Natural convection and entropy generation of non-Newtonian nanofluids with different angles of external magnetic field using GPU accelerated MRT-LBM,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 30, p. 101769, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101769>.
- [78] Y. Cao et al., “MHD natural convection nanofluid flow in a heat exchanger: Effects of Brownian motion and thermophoresis for nanoparticles distribution,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 28, p. 101394, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101394>.
- [79] Z. Boulahia, C. Boulahia, and R. Sehaqui, “Three-Dimensional (3D) Visualization and Two-Dimensional (2D) Second Law Analysis of Magnetohydrodynamic (MHD) Free Convection Inside Cubical Enclosure Packed with Hybrid Nanofluid Containing a Circular Heating Cylinder: Effect of Inclined Magnetic Field,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 46, no. 3, pp. 2985–2999, 2021, doi: 10.1007/s13369-020-05293-w.
- [80] W. Chammam, S. Nazari, and S. Z. Abbas, “Numerical scrutiny of entropy generation and ferro-nanoliquid magnetic natural convection inside a complex enclosure subjected to thermal radiation,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 125, p. 105319, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105319>.

- [81] Z. Boulahia, “A Detailed Numerical Investigation for Various Types of Entropy Generation and Magnetohydrodynamic (MHD) Free Convection within a Corrugated Cavity Comprising Nanofluid and a Hot Object Positioned in the Middle,” *Int. J. Appl. Comput. Math.*, vol. 7, no. 6, p. 213, 2021, doi: [10.1007/s40819-021-01146-8](https://doi.org/10.1007/s40819-021-01146-8).
- [82] T. Islam, M. Yavuz, N. Parveen, and M. Fayz-Al-Asad, “Impact of Non-Uniform Periodic Magnetic Field on Unsteady Natural Convection Flow of Nanofluids in Square Enclosure,” *Fractal and Fractional*, vol. 6, no. 2. 2022, doi: [10.3390/fractalfract6020101](https://doi.org/10.3390/fractalfract6020101).
- [83] K. Al-Farhany, A. Abdulkadhim, H. K. Hamzah, F. H. Ali, and A. Chamkha, “MHD effects on natural convection in a U-shaped enclosure filled with nanofluid-saturated porous media with two baffles,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 145, p. 104136, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104136>.
- [84] A. S. Dogonchi, M. S. Sadeghi, M. Ghodrat, A. J. Chamkha, Y. Elmasry, and R. Alsulami, “Natural convection and entropy generation of a nanoliquid in a crown wavy cavity: Effect of thermo-physical parameters and cavity shape,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 27, p. 101208, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101208>.
- [85] A. I. Alsabery, I. Hashim, A. Hajjar, M. Ghalambaz, S. Nadeem, and M. Saffari Pour, “Entropy Generation and Natural Convection Flow of Hybrid Nanofluids in a Partially Divided Wavy Cavity Including Solid Blocks,” *Energies*, vol. 13, no. 11. 2020, doi: [10.3390/en13112942](https://doi.org/10.3390/en13112942).
- [86] I. Hashim, A. I. Alsabery, M. A. Sheremet, and A. J. Chamkha, “Numerical investigation of natural convection of Al₂O₃-water nanofluid in a wavy cavity with conductive inner block using Buongiorno’s two-phase model,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 30, no. 2, pp. 399–414, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.11.017>.
- [87] A. M. Aly and Z. A. S. Raizah, “Incompressible smoothed particle hydrodynamics simulation of natural convection in a nanofluid-filled complex wavy porous cavity with inner solid particles,” *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.*, vol. 537, p. 122623, 2020.
- [88] A. Abdulkadhim et al., “Effect of heat generation and heat absorption on natural convection of Cu-water nanofluid in a wavy enclosure under magnetic field,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 120, no. November 2020, 2021, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.105024](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.105024).
- [89] A. I. Alsabery, T. Tayebi, A. J. Chamkha, and I. Hashim, “Natural convection of Al₂O₃-water nanofluid in a non-Darcian wavy porous cavity under the local thermal non-equilibrium condition,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–22, 2020.
- [90] A. S. Dogonchi, A. J. Chamkha, and D. D. Ganji, “A numerical investigation of magneto-hydrodynamic natural convection of Cu–water nanofluid in a wavy cavity using CVFEM,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 135, no. 4, pp. 2599–2611, 2019, doi: [10.1007/s10973-018-7339-z](https://doi.org/10.1007/s10973-018-7339-z).
- [91] M. Mokaddes Ali, R. Akhter, and M. A. Alim, “Hydromagnetic natural convection in a wavy-walled enclosure equipped with hybrid nanofluid and heat generating cylinder,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 60, no. 6, pp. 5245–5264, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.059>.
- [92] M. Shekaramiz, S. Fathi, H. A. Ataabadi, H. Kazemi-Varnamkhasti, and D. Toghraie, “MHD nanofluid free convection inside the wavy triangular cavity considering periodic temperature

- boundary condition and velocity slip mechanisms,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 170, p. 107179, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107179>.
- [93] A. I. Alsabery, R. Mohebbi, A. J. Chamkha, and I. Hashim, “Effect of local thermal non-equilibrium model on natural convection in a nanofluid-filled wavy-walled porous cavity containing inner solid cylinder,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 201, pp. 247–263, 2019.
- [94] A. Abdulkadhim, H. K. Hamzah, F. H. Ali, A. M. Abed, and I. M. Abed, “Natural convection among inner corrugated cylinders inside wavy enclosure filled with nanofluid superposed in porous–nanofluid layers,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 109, no. October, p. 104350, 2019, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104350](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104350).
- [95] H. T. Kadhim, F. A. Jabbar, and A. Rona, “Cu-Al₂O₃ hybrid nanofluid natural convection in an inclined enclosure with wavy walls partially layered by porous medium,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 186, no. June, p. 105889, 2020, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2020.105889](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105889).
- [96] Y. Gupta and P. Rana, “MHD natural convection in inclined wavy annulus utilizing hybrid nanofluid with discrete wavy coolers,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 143, no. 2, pp. 1303–1318, 2021, doi: [10.1007/s10973-020-09920-4](https://doi.org/10.1007/s10973-020-09920-4).
- [97] M. Esmailpour and M. Abdollahzadeh, “Free convection and entropy generation of nanofluid inside an enclosure with different patterns of vertical wavy walls,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 52, pp. 127–136, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.08.019>.
- [98] S. E. Ahmed and Z. Z. Rashed, “MHD natural convection in a heat generating porous medium-filled wavy enclosures using Buongiorno’s nanofluid model,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 14, no. March, p. 100430, 2019, doi: [10.1016/j.csite.2019.100430](https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100430).
- [99] H. R. Ashorynejad and A. Shahriari, “MHD natural convection of hybrid nanofluid in an open wavy cavity,” *Results Phys.*, vol. 9, pp. 440–455, 2018, doi: [10.1016/j.rinp.2018.02.045](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.02.045).
- [100] H. Hamzah, A. Albojamal, B. Sahin, and K. Vafai, “Thermal management of transverse magnetic source effects on nanofluid natural convection in a wavy porous enclosure,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 143, no. 3, pp. 2851–2865, 2021, doi: [10.1007/s10973-020-10246-4](https://doi.org/10.1007/s10973-020-10246-4).
- [101] A. J. Chamkha and F. Selimefendigil, “MHD Free Convection and Entropy Generation in a Corrugated Cavity Filled with a Porous Medium Saturated with Nanofluids,” *Entropy*, vol. 20, no. 11, 2018, doi: [10.3390/e20110846](https://doi.org/10.3390/e20110846).
- [102] E. Suresh Reddy and S. Panda, “Heat transfer of MHD natural convection Casson nanofluid flows in a wavy trapezoidal enclosure,” *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2022, doi: [10.1140/epjs/s11734-022-00609-3](https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00609-3).
- [103] N. Vishnu Ganesh, Q. M. Al-Mdallal, H. F. Öztop, and R. Kalaivanan, “Analysis of natural convection for a Casson-based multiwall carbon nanotube nanofluid in a partially heated wavy enclosure with a circular obstacle in the presence of thermal radiation,” *J. Adv. Res.*, vol. 39, pp. 167–185, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.10.006>.
- [104] C. Sivaraj, S. Gowtham, M. Elango, and M. A. Sheremet, “Analysis of thermo-magnetic convection and entropy generation of Al₂O₃-water nanofluid in a partially heated wavy electronic cabinet,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 133, p. 105955, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105955>.

- [105] B. A. . Bendrer, A. Abderrahmane, S. E. Ahmed, and Z. A. S. Raizah, “3D magnetic buoyancy-driven flow of hybrid nanofluids confined wavy cubic enclosures including multi-layers and heated obstacle,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 126, p. 105431, Jul. 2021, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105431](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105431).
- [106] A. I. Alsabery, M. A. Ismael, A. J. Chamkha, I. Hashim, and H. Abulkhair, “Unsteady flow and entropy analysis of nanofluids inside cubic porous container holding inserted body and wavy bottom wall,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 193, no. October 2020, p. 106161, 2021, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2020.106161](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106161).
- [107] R. Parveen and T. R. Mahapatra, “Numerical simulation of MHD double diffusive natural convection and entropy generation in a wavy enclosure filled with nanofluid with discrete heating,” *Heliyon*, vol. 5, no. 9, p. e02496, 2019, doi: [10.1016/j.heliyon.2019.e02496](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02496).
- [108] J. Shaik, B. A. R. Polu, M. Mohamed Ahmed, and R. Ahmed Mohamed, “Characteristics of moving hot block and non-Fourier heat flux model on sinusoidal wavy cavity filled with hybrid nanofluid,” *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 137, no. 1, p. 131, 2022, doi: [10.1140/epjp/s13360-022-02361-y](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-02361-y).
- [109] J. Fereidooni, “The effect of fins and wavy geometry on natural convection heat transfer of TiO₂–water nanofluid in trash bin-shaped cavity,” *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2022, doi: [10.1140/epjs/s11734-022-00590-x](https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00590-x).
- [110] M. J. Uddin, S. K. Rasel, J. K. Adewole, and K. S. Al Kalbani, “Finite element simulation on the convective double diffusive water-based copper oxide nanofluid flow in a square cavity having vertical wavy surfaces in presence of hydro-magnetic field,” *Results Eng.*, vol. 13, p. 100364, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100364>.
- [111] N. Vishnu Ganesh, Q. M. Al-Mdallal, G. Hirankumar, R. Kalaivanan, and A. J. Chamkha, “Buoyancy-driven convection of MWCNT – Casson nanofluid in a wavy enclosure with a circular barrier and parallel hot/cold fins,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 4, pp. 3249–3264, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.055>.
- [112] D. K. Mandal, N. Biswas, N. K. Manna, R. S. R. Gorla, and A. J. Chamkha, “Magneto-hydrothermal performance of hybrid nanofluid flow through a non-Darcian porous complex wavy enclosure,” *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2022, doi: [10.1140/epjs/s11734-022-00595-6](https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00595-6).
- [113] A. I. Alsabery, A. Hajjar, Z. A. S. Raizah, M. Ghalambaz, I. Hashim, and A. J. Chamkha, “Energy transport of wavy non-homogeneous hybrid nanofluid cavity partially filled with porous LTNE layer,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 208, p. 109655, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109655>.
- [114] T. Tayebi and H. F. Öztop, “Entropy production during natural convection of hybrid nanofluid in an annular passage between horizontal confocal elliptic cylinders,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 171, 2020, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2019.105378](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105378).
- [115] J. Boussinesq, “Theorie analytique de la chaleur vol 2 (paris: Gauthier-villars),” *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press Cambridge, UK, 1903.
- [116] J. D. Anderson, “Ludwig Prandtl’s boundary layer,” *Phys. Today*, vol. 58, no. 12, pp. 42–48, 2005.

[117] X. Shan and D. Montgomery, “On the role of the Hartmann number in magnetohydrodynamic activity,” *Plasma Phys. Control. fusion*, vol. 35, no. 5, p. 619, 1993.

[118] MC .BELLAKHDAR and al “Hydrothermal and Entropy Investigation of Nanofluid Mixed Convection in Triangular Cavity with Wavy Boundary Heated from below and Rotating Cylinders” *Nanomaterials* 2022, 12, <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/9/1469>