



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 août 1955-Skikda

Faculté des Sciences

Département de Physique

N° :...

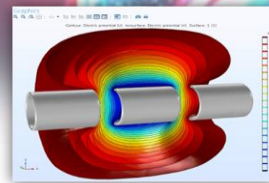
Mémoire de Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables

Thème

*Transfert de chaleur avec nanofluides hybrides
dans un échangeur
de chaleur coaxial de différentes conceptions*



Présenté par :
BOUADILA HICHEM

Soutenu le : 10/09/2023" devant le jury composé de :

Mem. Bourrich Kawter	Dr	Université de Skikda	Présidente
Mebarek Oudina Fateh	Pr	Université de Skikda	L'encadreur
Chlirem Attayeb	Dr	Université de Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023



REMERCIEMENTS

Nos premiers remerciements, vont pour le bon dieu, le tout puissant, qui nous a donné la force et la sagesse d'arriver à ce stade dans nos études.

Nous remercions également nos familles respectives, particulièrement nos parents, pour les sacrifices fournis afin que nous puissions terminer nos études.

*Nous remercions aussi notre encadreur Mr : **Mebarek Oudina Fateh** qui nous a soutenu et aidé à aller au bout de ce sujet.*

*Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury sur tout Mem : **Bourrich Kawter***

*et Mr : **Chlirem Attayeb** pour l'intérêt qu'ils porteront à notre travail, qui on espère sera apprécié.*

*Enfin nous tenons à remercier tous ceux et celles qui de près ou de loin ont contribué à finaliser ce modeste travail Surtout le **Dr.Chabani Ines** ce qui m'a été adressé d'une manière très importante.*

Hichem.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A ceux qui m'ont tant aimée et encouragée, à ceux
qui m'ont épaulée durant les moments difficiles, à
ceux qui m'ont tracée le chemin vers la réussite, à
ceux qui sont la source de mon inspiration et de
mon courage,*

- ◆ *A ma chère mère **Zineb.***
- ◆ *A mon défunt père **Bachir***
- ◆ *A toute ma famille, mes frères et
mes sœurs.*
- ◆ *A ma chère femme **Aya***
- ◆ *A **hdja Nouara***
- ◆ *A belle mère **Nedjet***
- ◆ *A tous ceux que j'aime.*

Hichem

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Table des matières



Nomenclature

u, v	Composantes de vitesse ($m.s^{-1}$)
U, V	Composantes de vitesse adimensionnelles
x, y	Coordonnées cartésiennes (m)
X, Y	Coordonnées cartésiennes adimensionnelles
P	Pression ($N.m^{-2}$)
P	Pression adimensionnelle
ρ	Masse volumique ($Kg.m^{-3}$)
g	Accélération gravitationnelle ($m.s^{-2}$)
T	Temperature (K)
T_{moy}	Temperature moyenne (K)
θ	Temperature adimensionnelle
α	Diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$)
ν	Viscosité cinématique ($m^2.s^{-1}$)
K	Perméabilité ($H.m^{-1}$)
ε	Porosité
σ	Conductivité électrique ($Ohm .m$) ⁻¹
B_0	Densité du champ magnétique ($A. m^{-1}$)
k	Conductivité thermique ($W. K^{-1} .m^{-1}$)
C_p	Chaleur spécifique ($J. K^{-1} .Kg^{-1}$)
β	Dilatation thermique (K^{-1})
μ	Viscosité dynamique ($Kg.m^{-1}.s^{-1}$)
ϕ	Concentration des nanoparticules
c	Chaud
f	Froid
H_2O	Eau

Cu	Cuivre
TiO ₂	Dioxyde de Titane
Hnf	Nanofluid hybride
Bf	Fluid de base
Np	Nanoparticule
max	Maximum
F _c	Coefficient de Forchheimer
Ra	Nombre de Rayleigh
Nu	Nombre de Nusselt
Ha	Nombre de Hartmann
Da	Nombre de Darcy
Pr	Nombre de Prandtl

Liste des Figures

Chapitre 1 : Généralité et revue Bibliographique

Figure 1	<i>Les trois modes du transfert thermique</i>	5
Figure 2	<i>Transfert de chaleur convectif</i>	6
Figure 3	<i>Moyen des nanofluides</i>	9
Figure 4	<i>Géométrie considérée par Zhang et al. [8]</i>	11
Figure 5	<i>Géométrie considérée par Abed et al. [9]</i>	11
Figure 6	<i>Géométrie considérée par Hosseinzadeh et al. [10]</i>	12
Figure 7	<i>Géométrie considérée par Dogonchi et al. [11]</i>	13
Figure 8	<i>Géométrie considérée par Tayebi et al. [12]</i>	13

Chapitre 2 : Modélisation numérique

Figure 1	<i>Configuration du modèle étudié avec différents obstacles</i>	21
Figure 2	<i>Interface du logiciel COMSOL</i>	23

Chapitre 3 : Résultats et discussions

Figure 1	<i>Lignes de courant de différents obstacles à $Ra = 10^5$, $Da = 10^{-1}$ et $\phi = 6\%$</i>	27
Figure 2	<i>Nusselt moyen à $Ra = 10^4$ et $Da = 10^{-1}$</i>	28
Figure 3	<i>Lignes de courant $Da = 10^{-1}$ et $\phi = 2\%$</i>	30
Figure 4	<i>Nusselt moyen à $Ra = 10^4$ et $\phi = 2\%$</i>	31

Liste des Tableaux

Chapitre 2 : Modélisation numérique

Tableau 1	<i>Les conditions aux limites de l'échangeur de chaleur</i>	22
Tableau 2	<i>Propriétés thermo-physiques de l'eau et des nanoparticules</i>	22



Introduction générale



Introduction Générale

L'avancement des technologies dans les domaines de la thermodynamique et du transfert de chaleur a engendré un intérêt croissant pour les matériaux novateurs et les modèles de simulation complexes. Parmi ces développements, les nanofluides se distinguent par leur capacité à améliorer les propriétés thermo-physiques des fluides de base grâce à la dispersion de nanoparticules.

Lorsque ces nanofluides interagissent avec des milieux poreux, l'ensemble devient une interface fascinante pour étudier les phénomènes de convection et de transfert de chaleur. Les échangeurs de chaleur, en tant qu'éléments clés de nombreuses applications industrielles, bénéficient grandement de ces avancées. La combinaison de nanofluides et de milieux poreux offre des opportunités passionnantes pour améliorer l'efficacité de transfert de chaleur dans des systèmes complexes et variés.

Ce mémoire se concentre sur l'exploration de l'interaction complexe entre les nanofluides, les milieux poreux et les échangeurs de chaleur coaxiaux de diverses conceptions. En analysant les modèles mathématiques et en utilisant des simulations numériques, l'étude vise à offrir une compréhension approfondie de la manière dont ces éléments interagissent et influencent le transfert de chaleur dans des systèmes pratiques.

L'utilisation de différentes conceptions coaxiales pour les échangeurs de chaleur permettra d'examiner comment les propriétés thermiques des nanofluides, combinées aux caractéristiques des milieux poreux, peuvent être exploitées pour améliorer l'efficacité de transfert de chaleur dans des applications variées.

L'objectif ultime est de mieux comprendre comment la synergie entre les nanofluides, les milieux poreux et les échangeurs de chaleur peut être exploitée pour améliorer la performance thermique de manière significative, tout en envisageant de nouvelles opportunités pour l'avenir de l'ingénierie thermique et de la science des matériaux.

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Nomenclature	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	
1. Introduction.....	4
2. Transfert de chaleur	4
2.1. Conduction	5
2.2. Convection.....	5
2.3. Rayonnement	6
3. Echangeurs de chaleur	6
4. Nanofluides et milieux poreux	7
4.1 Nanofluides	7
4.1.1. Types de nanofluides.....	8
4.1.2. Avantages des nanofluides.....	8
4.1.3. Application des nanofluides	9
4.2 Milieux poreux.....	10
5. Echangeurs poreux avec nanofluides.....	10
6. Conclusion	14

Chapitre I

*Généralité et revue
Bibliographique*



1. Introduction

Le transfert de chaleur joue un rôle fondamental dans une multitude d'applications industrielles, environnementales et biomédicales. Afin d'améliorer l'efficacité de ce processus capital, de nouvelles approches ont été développées en utilisant des nanofluides et des milieux poreux.

Les nanofluides, qui sont des suspensions de nanoparticules dans un liquide de base, ont démontré des propriétés thermiques améliorées, offrant ainsi des possibilités d'optimisation des performances des échangeurs de chaleur et des dispositifs thermiques. De même, les milieux poreux, ont la capacité de faciliter les échanges thermiques grâce à leur grande surface spécifique.

Ce premier chapitre ainsi se penchera les modes de transfert de chaleur d'abord, suivi par les avantages des nanofluides et des milieux poreux dans le transfert de chaleur convectif, en mettant en évidence leur potentiel pour améliorer l'efficacité énergétique et ouvrir de nouvelles perspectives pour l'ingénierie thermique moderne, particulièrement dans les échangeurs de chaleur.

2. Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur joue un rôle essentiel dans notre univers en permettant aux systèmes d'équilibrer leur température. Ce processus fondamental explique comment la chaleur se déplace entre les objets et les environnements présentant des différences de température.

Les trois principaux types de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et le rayonnement comme illustré que la **Figure 1**. Grâce à ces trois types de transfert de chaleur, les écosystèmes peuvent réguler leur température, les machines peuvent fonctionner de manière optimale, et les phénomènes météorologiques peuvent se développer, contribuant ainsi à l'équilibre et au bien-être de notre environnement[1].

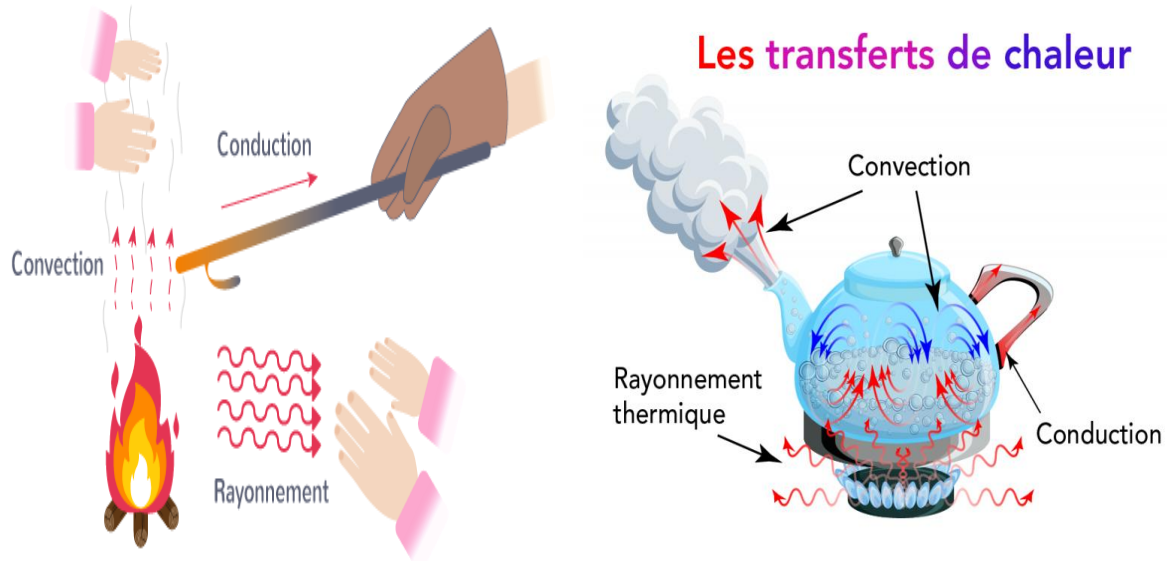


Figure 1. Les trois modes du transfert thermiques

2.1. Conduction

Le transfert de chaleur à travers un matériau solide ou un fluide immobile est connu sous le nom de la conduction. Ce processus augmente la température du matériau à mesure que la chaleur se propage entre ses molécules. La conduction permet aux molécules de transmettre leur énergie thermique de proche en proche, ce qui rend les températures plus uniformes et assure leur homogénéité.

2.2. Convection

La convection se produit dans un fluide en mouvement, comme l'air ou l'eau. Lorsqu'une partie du fluide est chauffée, elle devient moins dense et monte tandis que le fluide plus froid et plus dense descend pour prendre sa place. Ce mouvement crée un flux de chaleur, permettant ainsi le transfert de chaleur à grande échelle, ce qui est connu par la convection naturelle.

En revanche, la convection forcée est le résultat de l'action d'une source externe pour entraîner le mouvement du fluide. Cela peut être accompli à l'aide de ventilateurs, de pompes ou d'autres appareils de transfert de chaleur. L'utilisation de ventilateurs dans les radiateurs ou les climatiseurs pour accélérer l'échange thermique en est un exemple courant.

Ces deux types de convection illustrés par la **Figure 2** sont omniprésents dans de nombreux processus naturels et industriels, jouant un rôle crucial dans la régulation thermique de notre environnement et dans de nombreuses applications technologiques.

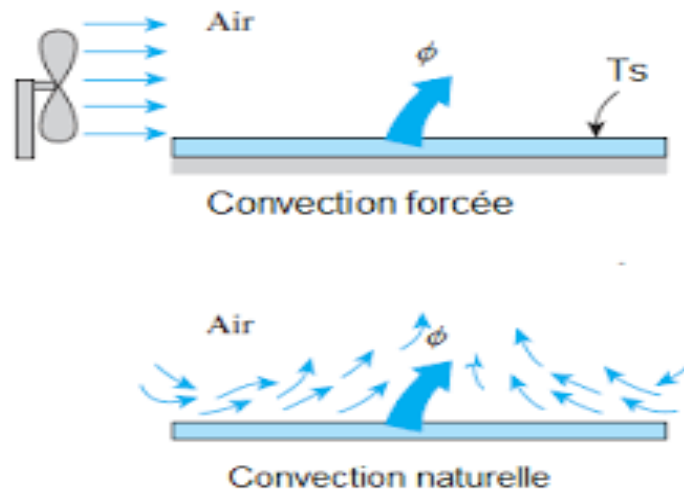


Figure 2. Transfer de chaleur convectif

2.3. Rayonnement

Le rayonnement est le transfert de chaleur par le biais d'ondes électromagnétiques, telle que la lumière infrarouge ou les rayons du soleil. Même dans le vide, le rayonnement de chaleur ne dépend pas d'un milieu matériel pour se propager, contrairement à la convection et à la conduction. Ce mode de transfert joue un rôle crucial principalement dans le réchauffement de notre planète, ainsi que d'autres systèmes thermiques.

3. Echangeurs de chaleur

Dans le domaine du génie thermique, les échangeurs de chaleur avec leurs types différents, jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles et domestiques en permettant le transfert efficace de chaleur entre les fluides. Cependant, malgré leur utilité, ces échangeurs présentent certaines limitations. Parmi elles, on peut citer la formation d'encrassement et de dépôts qui réduisent la conductivité thermique, entraînant ainsi une baisse des performances de l'échangeur. De plus, les gradients de température et de pression à l'intérieur de l'échangeur peuvent provoquer des pertes de charge, générant des inefficacités supplémentaires.

Pour améliorer le transfert de chaleur dans les échangeurs, diverses méthodes sont envisageables. L'une des approches consiste à optimiser la conception géométrique de l'échangeur, en ajustant la surface d'échange ou en introduisant des ailettes pour augmenter la surface de contact et faciliter la convection, ainsi que la modification des formes géométriques des tubes.

Une autre technique consiste à l'utilisation de matériaux à haute conductivité thermique à échelle nanométrique pour améliorer les propriétés thermiques des fluides classiques, que les chercheurs y désignent par les nanofluides, ainsi que l'introduction des milieux poreux. Par ailleurs, l'optimisation des paramètres d'opération tels que la vitesse du fluide, le débit et la température peut également contribuer à une meilleure performance globale de l'échangeur de chaleur[2].

En somme, l'amélioration du transfert de chaleur dans les échangeurs est un enjeu majeur pour garantir l'efficacité énergétique et la durabilité des systèmes thermiques. La recherche continue dans ce domaine est essentielle pour proposer des solutions novatrices et durables, contribuant ainsi à l'optimisation des processus industriels et à la préservation de l'environnement. Ce mémoire de master vise à explorer ces différentes approches pour améliorer le transfert de chaleur dans les échangeurs et à fournir des recommandations pratiques pour l'ingénierie thermique.

4. Nanofluides et milieux poreux

4.1 Nanofluides

Les nanofluides sont des suspensions constituées de nanoparticules solides dispersées de manière homogène dans un liquide de base conventionnel. Ces fluides nanométriques présentent des propriétés thermiques améliorées par rapport aux fluides ordinaires, ce qui suscite un intérêt croissant dans le domaine du transfert de chaleur et autres applications thermiques.

Les nanoparticules incorporées dans les fluides de base sont choisies pour leur haute conductivité thermique et leur stabilité à des températures élevées. Par conséquent, les nanofluides offrent des avantages potentiels tels qu'une conductivité thermique accrue, une augmentation du coefficient de convection et une réduction des pertes de charge, tous susceptibles d'améliorer l'efficacité globale des échangeurs de chaleur.

Toutefois, la préparation, la stabilité et les interactions avec les surfaces d'échange thermique restent des aspects cruciaux qui nécessitent des investigations approfondies et une meilleure compréhension pour exploiter pleinement le potentiel des nanofluides dans les applications thermiques. Malgré les défis associés, l'utilisation des nanofluides offre des perspectives prometteuses pour optimiser le transfert de chaleur dans diverses configurations d'échangeurs de chaleur et ouvrir de nouvelles opportunités d'innovation dans le domaine de l'ingénierie thermique.

4.1.1. Types de nanofluides

Les nanofluides peuvent être classés en deux catégories principales : les nanofluides simples et les nanofluides hybrides.

Nanofluides simples

Les nanofluides simples sont des suspensions colloïdales composées de nanoparticules solides dispersées dans un liquide de base unique. Ces nanoparticules peuvent être constituées de matériaux tels que des oxydes métalliques, des nitrures, des carbures ou des particules de carbone, qui confèrent des propriétés thermiques améliorées au liquide de base (telle que l'eau, l'huile, la glycérine, etc...). Les nanofluides simples sont largement étudiés pour leur capacité à améliorer la conductivité thermique et le transfert de chaleur dans divers systèmes[3].

Nanofluides hybrides

Les nanofluides hybrides, également connus sous le nom de nanofluides composite, sont des suspensions qui contiennent à la fois des nanoparticules hybrides (de deux ou plus) dispersées dans un liquide de base. L'introduction de ces nanostructures permet de combiner les avantages des nanoparticules pour améliorer davantage le transfert de chaleur et d'optimiser les performances des nanofluides[4].

4.1.2. Avantages des nanofluides

Les nanofluides, qu'ils soient simples ou hybrides, sont sujets à une recherche active dans le domaine du transfert de chaleur et des applications thermiques, car ils offrent un potentiel significatif pour améliorer l'efficacité de différentes applications thermiques comme les échangeurs de chaleur, des systèmes de refroidissement, des panneaux solaires et d'autres

dispositifs thermiques dans divers secteurs industriels[5]. Les avantages des nanofluides sont résumés sur la **Figure 3**.

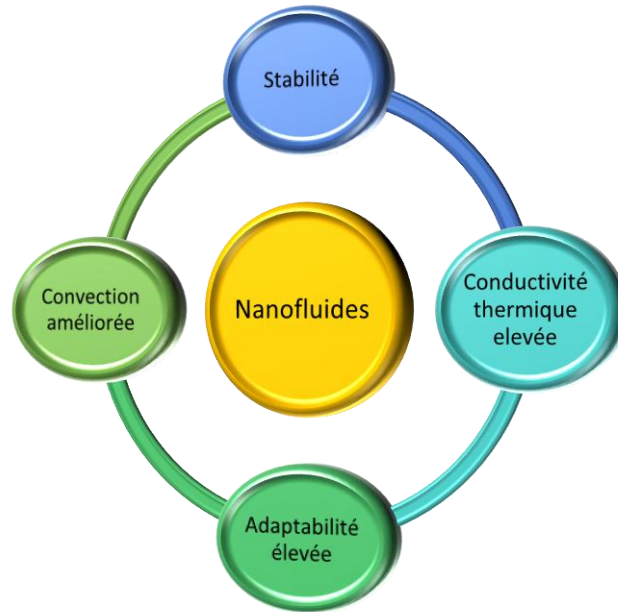


Figure 3. Avantage des nanofluides

4.1.3. Application des nanofluides

Les nanofluides trouvent de nombreuses applications dans divers domaines en raison de leurs propriétés thermiques améliorées et de leur capacité à faciliter le transfert de chaleur[6].

Quelques-unes des applications des nanofluides comprennent :

1. Systèmes de refroidissement électronique :

Les nanofluides sont utilisés pour améliorer l'efficacité du refroidissement des composants électroniques tels que les processeurs, les puces et les circuits intégrés, permettant ainsi de prévenir les problèmes de surchauffe et d'augmenter la durée de vie des appareils électroniques.

2. Échangeurs de chaleur :

Les nanofluides sont utilisés comme fluides de travail dans les échangeurs de chaleur pour optimiser le transfert de chaleur entre les fluides chauds et froids, améliorant ainsi l'efficacité globale des systèmes de chauffage, de climatisation et de réfrigération.

3. Énergie solaire :

Les nanofluides sont employés dans les systèmes de conversion solaire pour absorber et transférer efficacement l'énergie solaire, augmentant ainsi l'efficacité des panneaux solaires et des collecteurs solaires thermiques.

4. Stockage thermique :

Les nanofluides sont utilisés dans les systèmes de stockage thermique pour augmenter la capacité de stockage d'énergie et faciliter le transfert de chaleur pendant la charge et la décharge des systèmes de stockage d'énergie thermique.

4.2 Milieux poreux

Les milieux poreux sont des matériaux contenant des espaces vides à l'échelle microscopique ou nanoscopique, formant des réseaux interconnectés. Ils jouent un rôle crucial dans le transfert de chaleur en raison de leur grande surface spécifique, favorisant les échanges thermiques entre fluides et surfaces.

Les milieux poreux présentent plusieurs avantages dans les applications liées au transfert de chaleur. Leurs pores offrent une grande surface d'échange, améliorant ainsi l'efficacité du transfert thermique. Ils favorisent la convection et permettent une distribution homogène du flux de chaleur. La taille et la structure des pores, ainsi que leurs perméabilités peuvent être adaptées pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application[7].

5. Echangeurs poreux avec nanofluides

Dans le travail numérique de Zhang et al. [8], un échangeur de chaleur poreux conçu de deux cylindres coaxiaux de base circulaire fonctionnant avec du nanofluide est étudié. Les résultats montrent comment la concentration du nanofluide et le domaine poreux ont une influence importante sur le transfert de chaleur, tout en variant le nombre de Rayleigh.

Ils ont conclu que le taux de transfert de chaleur convectif global est amélioré lorsque la fraction volumique des nanoparticules augmente, et l'effet est plus évident lorsque les nombres de Rayleigh et de Darcy sont élevés. La configuration est présentée par la **Figure 4**.

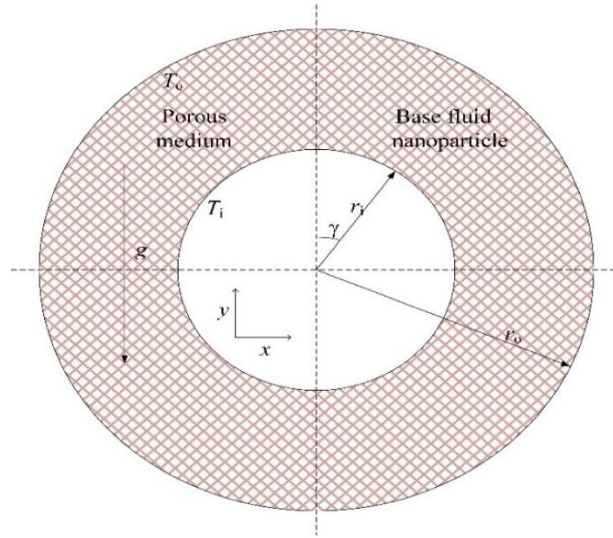


Figure 4. Géométrie considérée par Zhang et al. [8]

Par contre, Abed et al. [9] ont choisi de modifier la conception géométrique de l'échangeur en considérant un tube intérieur différent du cercle classique, sous forme d'une étoile pour étudier convection naturelle. L'échangeur est de suite rempli d'un nanofluid hybride, tout en considérant un milieu poreux, le cylindre interne est supposé chaud, tandis que l'extérieur est froid. Il a été constaté que lorsque le nombre de Darcy diminuait de 10^{-2} à 10^{-5} en maintenant Ra élevé, cela réduisait le nombre de Nusselt de 70 %. La configuration est présentée sur la **Figure 5**.

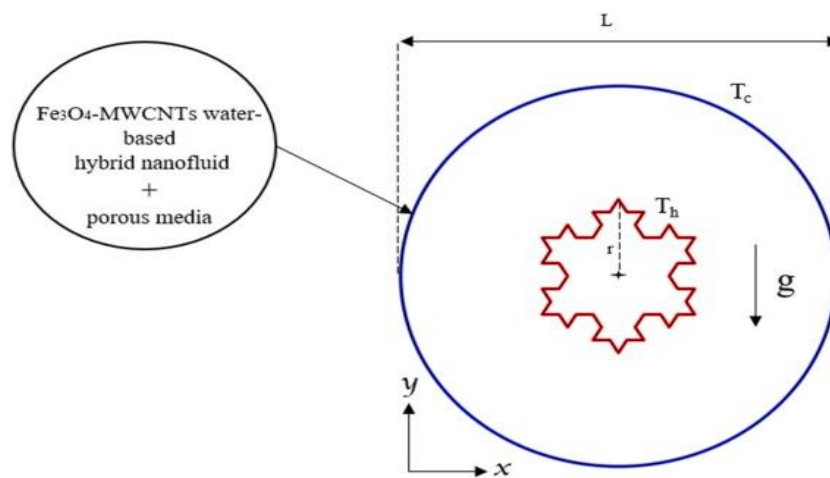


Figure 5. Géométrie considérée par Abed et al. [9]

Dans le travail de Hosseinzadeh et al. [10], les auteurs ont choisie considérer des formes uniques pour les tubes internes et externes, un octogone et une ellipse pour les tubes externe et interne avec des conditions aux limites froide et chaude respectivement, l'échangeur de chaleur poreux est rempli d'un nanofluide hybride. Les résultats sont présentés comme des fonctions de la porosité, la concentration du nanofluide, ainsi que l'altération de l'emplacement de l'ellipse. Ainsi, ils ont déduit que la disposition elliptique horizontale offre de meilleures conditions pour l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur, particulièrement pour un des concentrations et porosité élevées. La configuration est présentée sur la **Figure 6**.

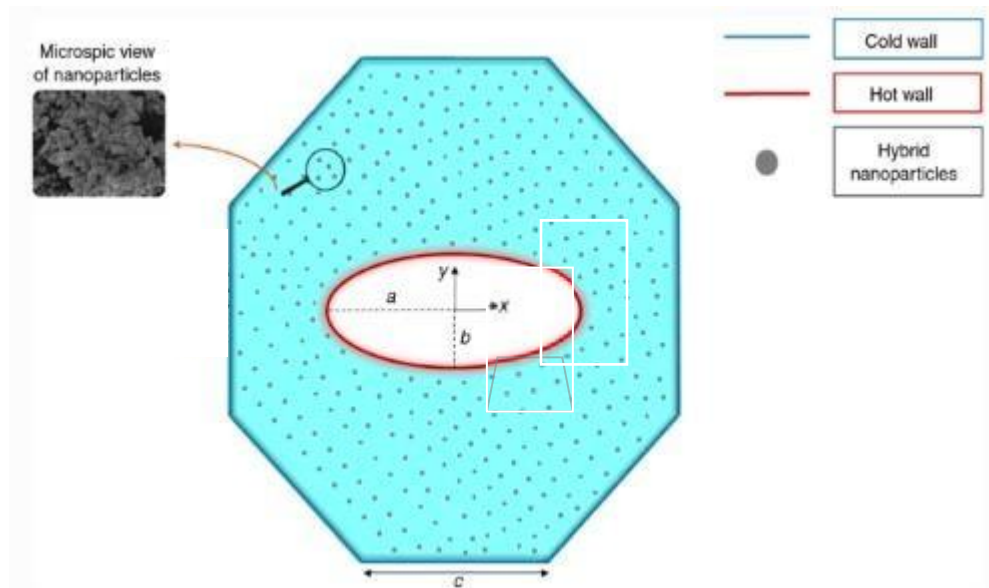


Figure 6. Géométrie considérée par Hosseinzadeh et al. [10]

Dogonchi et al.[11] ont étudié la convection naturelle dans un anneau conçu d'un carré froid extérieur et d'une forme ondulée qui représente le tube intérieur de l'échangeur. Le vide est rempli d'un nanofluide chauffé par le cylindre interne. Ils ont remarqué que le taux d'échange de chaleur accroît lorsque la concentration des nanoparticules augmente pour des nombres de Rayleigh grand, ce qui fortifie la convection naturelle.

La configuration est présentée sur la **Figure 7**.

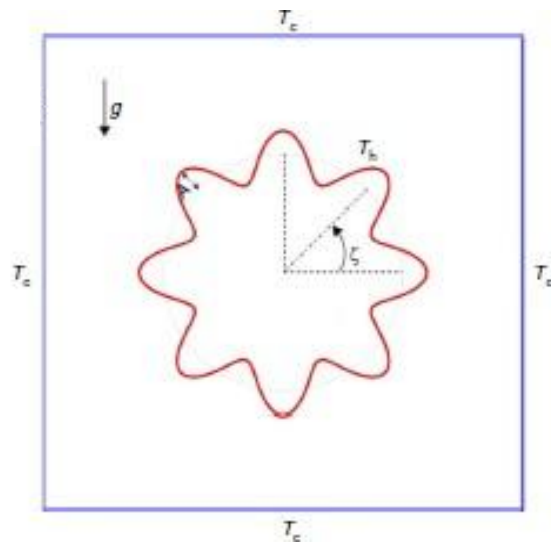


Figure 7. Géométrie considérée par Dogonchi et al. [11]

Quant à Tayebi et al. [12], ils ont choisi un anneau cylindrique entre deux ellipses, fonctionnant avec du nanofluide hybride pour étudier la performance du transfert de chaleur. L'intensité maximale de l'écoulement se produit lorsqu'ils ont augmenté la concentration du nanofluide et de Rayleigh. La configuration est présentée sur la **Figure 8**.

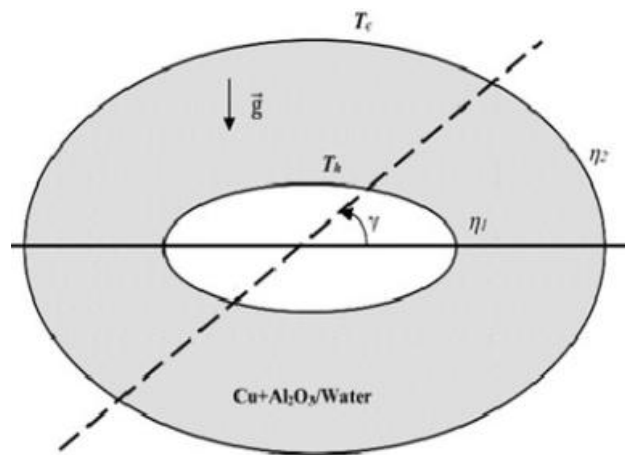


Figure 8. Géométrie considérée par Tayebi et al. [12]

En combinant les nanofluides et les milieux poreux, avec la modification des formes géométriques des tubes de l'échangeur de chaleur, de nouvelles possibilités d'optimisation des dispositifs thermiques émergent, avec un potentiel considérable pour améliorer l'efficacité énergétique, la durabilité et les performances des systèmes de transfert de chaleur.

6. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a mis en évidence l'importance des nanofluides et des milieux poreux dans le domaine du transfert de chaleur et de l'ingénierie thermique. Les nanofluides, présentent des propriétés thermiques améliorées qui offrent un potentiel significatif pour optimiser l'efficacité du transfert de chaleur dans divers systèmes, spécialement les échangeurs de chaleur.

De même, les milieux poreux, caractérisés par leurs espaces vides interconnectés, permettent une augmentation de la surface d'échange thermique et favorisent les échanges thermiques avec les fluides.

En somme, ce chapitre a mis en lumière le rôle clé des nanofluides et des milieux poreux dans l'optimisation du transfert de chaleur, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour l'ingénierie thermique moderne et le développement de technologies innovantes dans les échangeurs de chaleur.

Table des matières

1. Introduction.....	17
2. Propriétés des nanofluides hybrides.....	17
2.1. Masse volumique	18
2.2. Chaleur spécifique	18
2.3. Dilatation thermique	18
2.4. Conductivité thermique	18
2.5. Diffusivité thermique.....	18
2.6. Viscosité.....	18
3. Modèle mathématique.....	18
3.1. Equations dimensionnelles.....	19
3.1.1. Continuité	19
3.1.2. Energie.....	19
3.1.3. Conservation de masse	19
3.2. Equations adimensionnelles.....	20
3.2.1. Continuité	20
3.2.2. Energie.....	20
3.2.3. Conservation de masse	20
4. Modèle physique.....	21
4.1. Géométries.....	21
4.2. Conditions aux limites et simplifications.....	22
4.3. Propriétés thermo-physiques du nanofluide hybride	22
5. Logiciel de simulation	23
6. Conclusion	23

Chapitre II

Modélisation Numérique



1. Introduction

Le chapitre à venir explore en profondeur le domaine passionnant de la modélisation mathématique des nanofluides, en mettant en avant les paramètres fondamentaux, les équations clés et la géométrie étudiée. Les nanofluides, résultant de la dispersion de nanoparticules dans des liquides de base, ont suscité un intérêt croissant en raison de leurs propriétés thermo-physiques exceptionnelles.

Pour comprendre et prédire leur comportement, la modélisation mathématique joue un rôle essentiel. Ce chapitre offre d'abord un aperçu approfondi des différentes propriétés qui influencent le comportement des nanofluides, tels que la viscosité, conductivité thermique, masse volumique, dilatation thermique, et chaleur spécifique. Les équations qui décrivent les interactions entre les composants du nanofluide, ainsi que les lois régissant le transfert de chaleur et de masse, seront examinées en détail en deuxième partie.

De plus, dans la dernière portion du chapitre, les géométries du système étudié qui s'agit un échangeur de chaleur revêt une importance cruciale. En comprenant ces aspects fondamentaux de la modélisation des nanofluides hybrides, on sera mieux équipé pour exploiter leur potentiel.

2. Propriétés des nanofluides hybrides

Les nanofluides hybrides se distinguent par leurs propriétés thermo-physiques remarquables, résultant de la combinaison synergique de nanoparticules et de fluides de base. Ces matériaux présentent une conductivité thermique nettement améliorée par rapport aux fluides traditionnels, grâce à la haute surface spécifique et à la dispersion homogène des nanoparticules.

Cette caractéristique les rend idéaux pour le transfert de chaleur efficace dans les applications de refroidissement, allant des moteurs automobiles aux composants électroniques. De plus, les nanofluides hybrides peuvent afficher des comportements de viscosité contrôlée, facilitant le déplacement fluide dans des systèmes à petite échelle, comme les micro-canaux. Leur capacité à améliorer la performance thermique tout en maintenant une viscosité raisonnable les rend très prometteurs pour la conception de dispositifs thermiques avancés [13].

2.1. Masse volumique

$$\rho_{hnf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np} \quad (1)$$

2.2. Chaleur spécifique

$$(\rho C_p)_{hnf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_{bf} + \varphi(\rho C_p)_{np} \quad (2)$$

2.3. Dilatation thermique

$$(\rho\beta)_{hnf} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_{bf} + \varphi(\rho\beta)_{np} \quad (3)$$

2.4. Conductivité thermique

$$\frac{k_{hnf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n - 1)k_{bf} - (n - 1)(k_{bf} - k_{np})\varphi}{k_{np} + (n - 1)k_{bf} - (k_{bf} - k_{np})\varphi} \quad (4)$$

2.5. Diffusivité thermique

$$\alpha_{hnf} = \frac{k_{hnf}}{(\rho C_p)_{hnf}} \quad (5)$$

2.6. Viscosité

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (6)$$

3. Modèle mathématique

Pour flux convectif laminaire bidimensionnel, la continuité et la distribution d'énergie dans les coordonnées cartésiennes, avec les équations de Navier-Stokes, qui caractérisent l'écoulement du nanofluide hybride, sont décrites sont exprimées comme suit [13-14].

3.1. Equations dimensionnelles

3.1.1. Continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

3.1.2. Energie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{hnf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right); \quad (8)$$

3.1.3. Conservation de masse

Axe des x

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{1}{\rho_{hnf}} \frac{\partial p}{\partial x} - \vartheta_{hnf} \frac{u}{K} - \frac{F_c}{\sqrt{K}} u|u| + \frac{\vartheta_{hnf}}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right); \quad (9)$$

Axe des y

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = & - \frac{1}{\rho_{hnf}} \frac{\partial p}{\partial y} - \vartheta_{hnf} \frac{v}{K} + \beta_{hnf} g(T - T_{moy}) + \\ & \frac{\sigma_{hnf} B_0^2}{\rho_{hnf}} v - \frac{F_c}{\sqrt{K}} v|u| + \frac{\vartheta_{hnf}}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right); \end{aligned} \quad (10)$$

Avec K qui représente la perméabilité, F_c le coefficient de Forchheimer, $|u|$ pour la vitesse d'amplitude, et T_{moy} pour la température moyenne.

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_m^2}{150(1 - \varepsilon)^2}, F_c = \frac{b}{\sqrt{a}\varepsilon^3} \text{ avec } (a = 150, b = 1.75), |u| = \sqrt{u^2 + v^2}, T_{moy} = \frac{T_c + T_f}{2}$$

Les nombres adimensionnels et variables suivantes sont utilisés pour générer les équations adimensionnelles

Les nombres adimensionnels sont comme suit :

$$Ra = \frac{\beta_{bf} g(T_c - T_f)L^3}{\alpha_{bf} \vartheta_{bf}}, Ha = LB_0 \sqrt{\frac{\sigma_{bf}}{\mu_{bf}}}, Da = \frac{K}{L^2}, Pr = \frac{\vartheta_{bf}}{\alpha_{bf}}$$

Les paramètres adimensionnels sont comme suit :

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_f - T_c}, Y = \frac{y}{L}, X = \frac{x}{L}, V = \frac{vL}{\alpha_{bf}}, U = \frac{uL}{\alpha_{bf}}, P = \frac{(p + \rho_{bf} g_y)L^2}{\alpha_{bf}^2 \rho_{bf}}$$

3.2. Equations adimensionnelles

3.2.1. Continuité

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0; \quad (11)$$

3.2.2. Energie

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{hnf}}{\alpha_{bf}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right); \quad (12)$$

3.2.3. Conservation de masse

Axe des x

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\rho_{hnf}}{\rho_{bf}} \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} - \frac{\vartheta_{hnf}}{\vartheta_{bf}} \frac{P_r}{D_a \sqrt{R_a}} U - \frac{F_C}{\sqrt{D_a}} U|U| \right. \\ \left. + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\vartheta_{hnf}}{\vartheta_{bf}} \frac{P_r}{\sqrt{R_a}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \right); \end{aligned} \quad (13)$$

Axe des y

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\rho_{hnf}}{\rho_{bf}} \left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} - \frac{\vartheta_{hnf}}{\vartheta_{bf}} \frac{P_r}{D_a \sqrt{R_a}} V + P_r \frac{\beta_{hnf}}{\beta_{bf}} g \theta + \right. \\ \left. \frac{\sigma_{hnf}}{\rho_{hnf}} \frac{\rho_{bf}}{\rho_{hnf}} \frac{P_r}{\varepsilon} \frac{H_a^2}{\sqrt{R_a}} V - \frac{F_C}{\sqrt{D_a}} V|U| + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\vartheta_{hnf}}{\vartheta_{bf}} \frac{P_r}{\sqrt{R_a}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \right); \end{aligned} \quad (14)$$

4. Modèle physique

4.1. Géométries

Cette étude offre un aperçu numérique de la convection naturelle, grâce à l'écoulement convectif d'un nanofluide hybride dans une configuration elliptique poreuse décrite par le modèle de Darcy-Forchheimer-Brinkmann.

La configuration présente un échangeur de chaleur avec un tube extérieur fixé pour une forme elliptique, et un tube intérieur de forme variable entre un trapézoïde, une forme ondulée et un cylindre de forme pentagonale au centre de la géométrie.

La **Figure 1** indique l'équipement poreux rempli avec du nanofluide hybride Cu-TiO₂/eau, dont ses propriétés sont décrites dans le **Tableau 2**. Le cylindre extérieur est froid avec une température fixe T_f , tandis que la paroi intérieure du cylindre est fixée à une source de chaleur et réglée à T_c . Ces conditions sont résumées dans le **Tableau 1**.

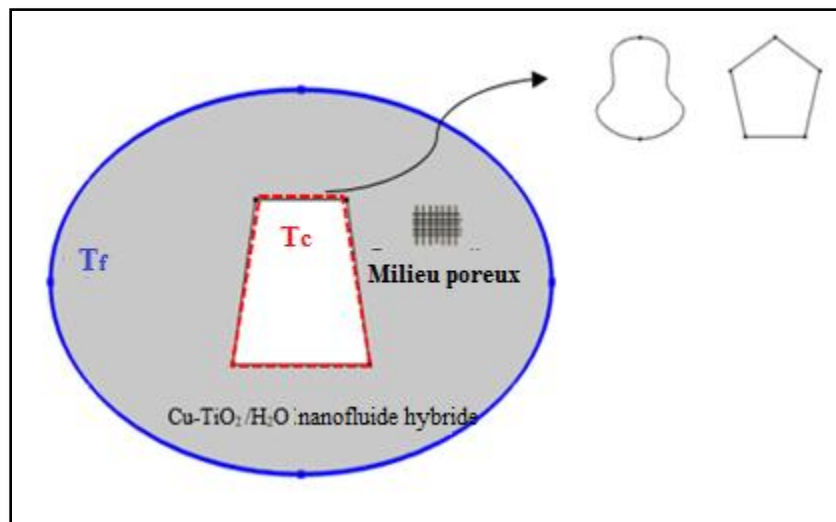


Figure 1. Configuration du modèle étudié avec différents obstacles.

4.2. Conditions aux limites et simplifications

Les simplifications sont comme suit :

- ✚ L'écoulement est supposé stationnaire et laminaire.
- ✚ L'écoulement est traité dans le cas bidimensionnel pour les géométries.
- ✚ Le nanofluide hybride considéré est un fluide Newtonien et incompressible,
- ✚ Les propriétés thermo-physiques du nanofluide hybride sont supposées constantes.

Tandis que les conditions aux limites sont présentées sur le tableau suivant :

	Les conditions dynamiques	Les conditions thermiques
<i>Cylindre extérieur</i>	$u=v=0$	$T=T_f$
<i>Cylindre intérieur</i>	$u=v=0$	$T=T_c$

Tableau 1. Les conditions aux limites de l'échangeur de chaleur

4.3. Propriétés thermo-physiques du nanofluide hybride

Les Propriétés thermo-physiques du nanofluide hybride sont présentées par le tableau suivant :

	Eau	Cu	TiO ₂
C_p (J. K ⁻¹ .Kg ⁻¹)	4179	385	686.2
ρ (Kg.m ⁻³)	997.1	8933	4250
k (W. K ⁻¹ .m ⁻¹)	0,613	401	8,95
β (K ⁻¹)	21×10^{-5}	$1,67 \times 10^{-5}$	$0,9 \times 10^{-5}$

Tableau 2. Propriétés thermo-physiques de l'eau et des nanoparticules

5. Logiciel de simulation

Le logiciel de modélisation et de simulation numérique **COMSOL Multiphysics** est largement utilisé dans les domaines scientifiques et d'ingénierie. En utilisant une approche de simulation Multiphysics, il permet aux utilisateurs de créer des modèles complexes et réalistes de phénomènes physiques.

COMSOL permet la résolution d'équations différentielles couplées qui décrivent une variété de phénomènes physiques, tels que la mécanique des fluides. Il offre une interface conviviale qui permet la construction géométrique, la déclaration des conditions aux limites, la sélection des équations à résoudre et l'analyse des résultats [15]. La **Figure 2** illustre l'interface du COMSOL.



Figure 2.Interface du logiciel COMSOL.

Les étapes à suivre pour exécuter un programme de simulation sur COMSOL sont les suivantes :

- ✚ Dessin des géométries
- ✚ Choix des modèles
- ✚ Conditions aux limites
- ✚ Maillage
- ✚ Exécution du programme numérique

6. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a plongé dans le domaine complexe et captivant de la modélisation mathématique des nanofluides, en mettant en lumière les paramètres clés, les équations fondamentales et les géométries étudiées.

La compréhension des paramètres influençant le comportement des nanofluides, est crucial pour prédire et optimiser leurs performances. Les équations qui régissent le transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement fournissent un cadre solide pour modéliser ces systèmes complexes. De plus, les géométries étudiées pour l'échangeur de chaleur étudié jouent un rôle déterminant dans la modélisation précise des nanofluides en contexte réel.

Table des matières

1. Introduction.....	27
2. Impact des différents obstacles	27
3. Impact du nombre de Rayleigh	30
4. Impact du nombre de Darcy	31
5. Conclusion	32
Conclusion Générale.....	34
Références.....	35
RESUME.....	37
Abstract.....	38
الملخص.....	39

Chapitre III

Résultats et discussions



1. Introduction

Dans ce chapitre dédié à la discussion des résultats, nous aborderons les enjeux cruciaux liés à l'impact de la concentration des nanoparticules, ainsi que du type de tube interne de l'échangeur thermique. Les résultats de cette analyse révèlent des liens entre ces facteurs et les performances d'échange de chaleur.

En outre, nous explorons l'influence des nombres de Rayleigh et de Darcy sur les processus de convection thermique et de circulation des fluides. Ces paramètres adimensionnels fournissent des informations cruciales sur la convection naturelle et la performance générale du système.

Notre discussion se concentre sur l'interprétation des données et conditions aux limites, ainsi que les résultats de simulation numérique. Ces conclusions éclairantes orienteront les perspectives de recherche future.

2. Impact des différents obstacles

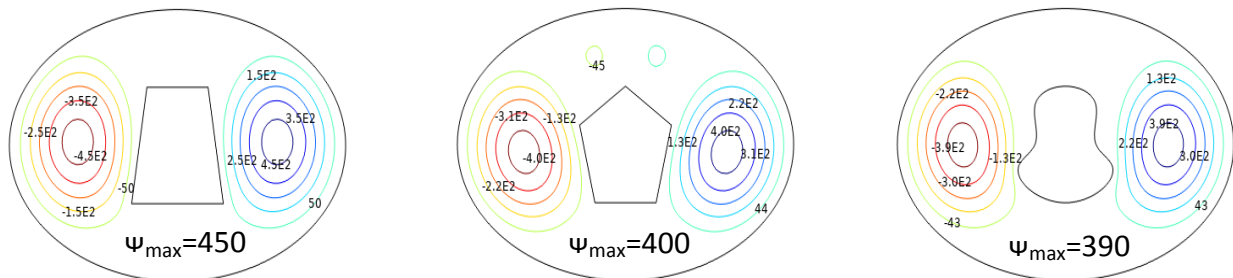


Figure 1. Lignes de courant de différents obstacles à $Ra = 10^5$, $Da = 10^{-1}$ et $\phi = 6\%$.

L'analyse comparative des trois formes de tubes internes dans l'échangeur thermique révèle des tendances intrigantes et significatives. Les résultats démontrent que la forme trapézoïdale se distingue nettement en offrant les performances les plus élevées pour les lignes de courant, atteignant une valeur impressionnante de 450. Cette observation suggère que la géométrie trapézoïdale favorise un flux de fluides plus efficace, créant ainsi des conditions optimales pour les transferts de chaleur.

D'autre part, le tube en forme de **pentagone** affiche des performances légèrement moins élevées, avec une valeur de 400 pour les lignes de courant. Bien que légèrement inférieurs à ceux de la forme trapézoïdale, ces résultats demeurent considérables et méritent d'être analysés en profondeur. Il pourrait être intéressant d'examiner les spécificités de la géométrie pentagonale qui pourraient entraîner ces performances notables.

Enfin, la forme **ondulée** se place en troisième position avec une valeur de 390 pour les lignes de courant. Bien que légèrement moins performante que les deux autres formes de tubes, cette géométrie conserve néanmoins une efficacité relative dans la promotion des transferts de chaleur.

En somme, ces résultats suggèrent que la **géométrie trapézoïdale** offre une conception optimale pour maximiser les performances de l'échangeur thermique en ce qui concerne les lignes de courant. Cependant, les performances notables des **formes pentagonale et ondulée** indiquent que d'autres facteurs pourraient également être à l'œuvre dans la promotion des transferts de chaleur. Cette interprétation ouvre des perspectives passionnantes pour des investigations futures visant à élucider les mécanismes sous-jacents à ces observations et à les appliquer à des contextes pratiques.

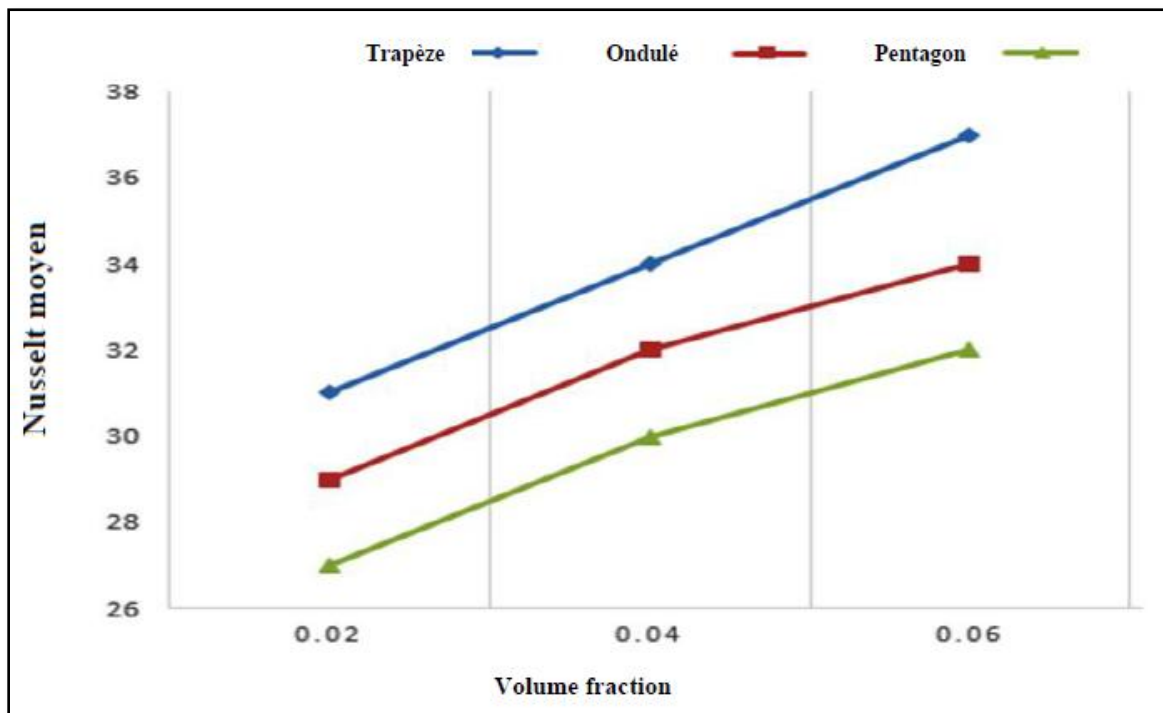


Figure 2. Nusselt moyen à $Ra = 10^4$ et $Da = 10^{-1}$.

L'exploration du **nombre de Nusselt moyen** dans le contexte de **l'augmentation de la concentration** du nanofluide offre des éclairages cruciaux sur les dynamiques thermiques de l'échangeur. Les résultats obtenus mettent en évidence une tendance frappante : à mesure que la concentration des nanoparticules dans le fluide croît, les valeurs du nombre de Nusselt augmentent de manière significative. Cette observation reflète le rôle **catalyseur** des nanoparticules dans l'amélioration des transferts de chaleur à l'intérieur du système.

Plus spécifiquement, la forme trapézoïdale se révèle la plus réactive à cette **augmentation de concentration**, affichant les valeurs les plus **élevées de nombre de Nusselt moyen**. Cette conclusion suggère que la géométrie trapézoïdale, combinée à une concentration accrue de nanoparticules, crée des conditions favorables pour une augmentation remarquable des flux de chaleur à travers l'échangeur thermique.

La forme **ondulée et le pentagone**, bien que **moins réactifs** que la forme **trapézoïdale**, montrent également une réponse positive à **l'augmentation de la concentration** du nanofluide. Bien que leurs performances soient relativement inférieures, elles confirment néanmoins l'effet bénéfique de l'ajout de nanoparticules sur les transferts thermiques.

En synthèse, ces constats suggèrent que l'augmentation de la concentration du nanofluide exerce une influence significative sur le nombre de Nusselt moyen, avec la forme trapézoïdale se démarquant comme le choix optimal pour des performances thermiques accrues. Ces résultats présentent des implications importantes pour la conception et l'optimisation d'échangeurs thermiques améliorés, en mettant en avant le potentiel des nanoparticules pour renforcer l'efficacité des transferts de chaleur.

3. Impact du nombre de Rayleigh

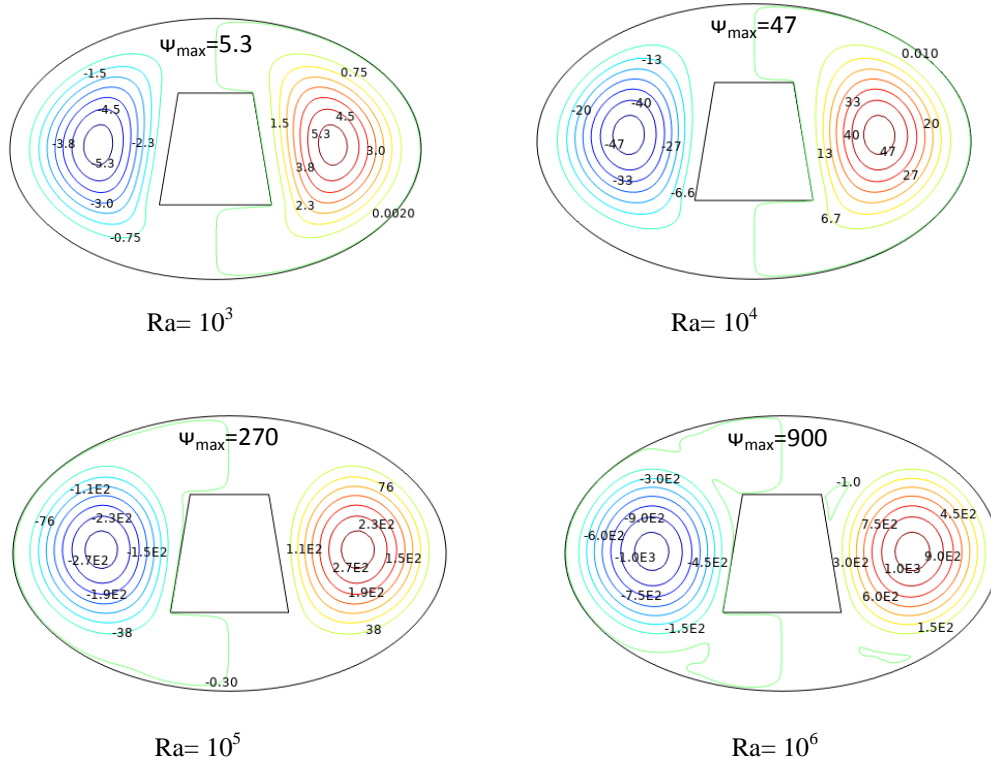


Figure 3. Lignes de courant $Da = 10^{-1}$ et $\phi = 2\%$.

L'analyse des lignes de courant en relation avec la variation du nombre de Rayleigh ouvre une fenêtre fascinante sur l'effet de la convection naturelle sur le déplacement du nanofluide à l'intérieur de l'échangeur thermique. Les résultats obtenus soulignent une tendance nette : à mesure que le **nombre de Rayleigh augmente**, les lignes de courant s'intensifient de manière significative. Cette observation met en avant le rôle clé joué par l'intensification des forces de convection naturelle dans la création d'un mouvement fluide plus dynamique et rapide.

Plus précisément, l'augmentation du nombre de Rayleigh entraîne une **amplification des forces de convection**, qui à leur tour renforcent la vitesse de déplacement du nanofluide à travers le système. Cette augmentation de la vitesse favorise un transfert convectif plus efficace, ce qui explique la corrélation directe entre les lignes de courant plus marquées et les valeurs plus élevées du nombre de Rayleigh.

Ces constatations soulignent le rôle clé de la convection naturelle dans le processus de transfert de chaleur, en particulier dans le contexte des fluides nanofluides. L'augmentation du nombre de Rayleigh n'est pas simplement une conséquence de la variation des paramètres, mais plutôt une manifestation tangible de l'intensification des forces de convection qui entraînent des améliorations significatives dans le mouvement et le transfert de chaleur du nanofluide.

De plus, il est intéressant de noter que l'effet du nombre de Rayleigh varie de manière non linéaire. Lorsque le nombre de Rayleigh passe de 10^3 à 10^4 , les changements observés sont relativement modestes. Ce pendant, une transformation plus marquée se produit lorsque le **nombre de Rayleigh** augmente de 10^4 à 10^5 , entraînant une augmentation significative des lignes de courant, **passant de 47 à 270**.

Cette croissance remarquable se poursuit à mesure que le **nombre de Rayleigh** franchit le seuil de 10^5 à 10^6 , avec une augmentation exponentielle des lignes de courant, **passant de 270 à 900**. Cette transition non linéaire met en **évidence les seuils critiques** où les effets de la **convection naturelle** se manifestent de manière plus prononcée, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des interactions complexes au sein du système.

4. Impact du nombre de Darcy

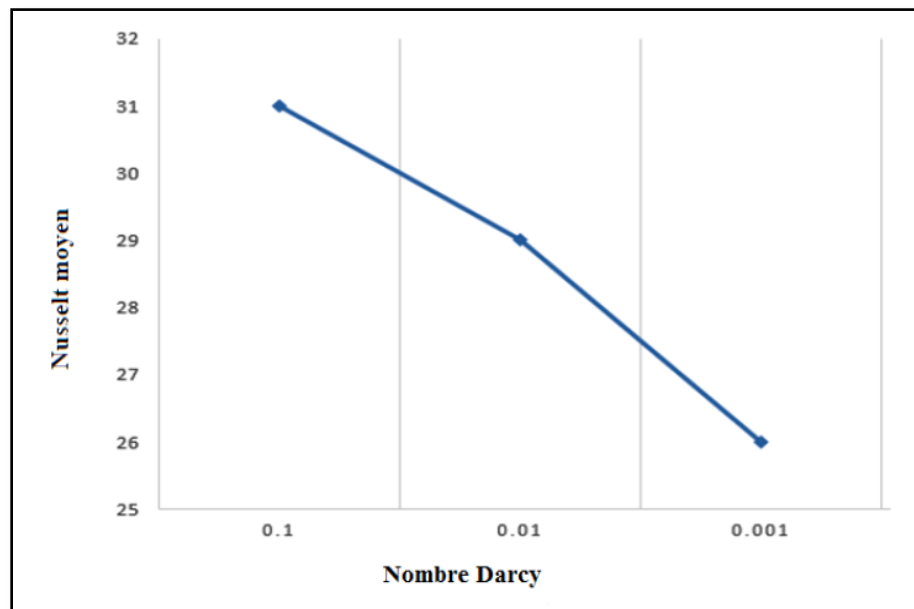


Figure 4. Nusselt moyen à $Ra = 10^4$ et $\phi=2\%$.

L'analyse du **nombre de Nusselt moyen** en fonction de la variation du **nombre de Darcy** offre une perspective éclairante sur l'influence de **la perméabilité du milieu** sur les performances d'échange thermique. Les résultats obtenus dévoilent une tendance claire : à mesure que le **nombre de Darcy augmente**, les valeurs du **nombre de Nusselt moyen augmentent** également de manière significative. Cette observation suggère que **l'accroissement de la perméabilité** du milieu engendre une amélioration substantielle des transferts de chaleur à l'intérieur du système.

Plus spécifiquement, en **augmentant le nombre de Darcy de 0.001 à 0.1**, nous observons une **augmentation progressive** des valeurs du **nombre de Nusselt moyen**. Cette relation ascendante entre le nombre de Darcy et le nombre de Nusselt reflète l'effet positif de **la perméabilité** accrue du milieu sur les mouvements fluides, favorisant ainsi un échange thermique plus efficace.

Ces constatations soulignent l'importance de la perméabilité du milieu dans la dynamique des transferts thermiques, en particulier dans le contexte des échangeurs thermiques à nanoparticules. L'augmentation du nombre de Darcy n'est pas seulement un facteur d'ajustement, mais plutôt un catalyseur pour des améliorations significatives dans la fluidité et l'efficacité des transferts de chaleur du nanofluide.

En résumé, cette interprétation révèle comment le nombre de Darcy influe sur le nombre de Nusselt moyen, en illustrant comment la perméabilité du milieu agit comme un moteur essentiel dans les mécanismes de transfert de chaleur. Ces résultats enrichissent notre compréhension des **interactions entre la perméabilité et les transferts thermiques**, contribuant ainsi à la conception et à l'optimisation plus précises d'échangeurs thermiques avancés.

5. Conclusion

En conclusion, les résultats de cette étude apportent des éclairages significatifs sur les mécanismes complexes régissant les performances d'échange thermique dans un système à nanoparticules. Les comparaisons entre différentes formes de tubes internes ont révélé que la **géométrie trapézoïdale surpasse** les autres en termes de lignes de courant, tandis que **l'augmentation de la concentration** des nanoparticules favorise des **valeurs élevées de Nusselt**, en particulier pour cette géométrie.

De plus, l'influence du nombre de Rayleigh sur les lignes de courant démontre comment l'intensification des forces de convection naturelle renforce le mouvement du nanofluide. De même, l'impact du nombre de Darcy sur le nombre de Nusselt moyen souligne l'importance cruciale de la perméabilité du milieu dans les transferts thermiques. L'évolution non linéaire de ces paramètres adimensionnels souligne la complexité des interactions sous-jacentes.

Ces découvertes collectives ouvrent de nouvelles avenues pour la conception et l'optimisation de systèmes d'échange thermique avancés, tout en offrant une base solide pour des recherches futures visant à approfondir notre compréhension de ces processus clés.

Conclusion Générale

En conclusion, cette étude approfondie de l'interaction entre les nanofluides hybrides, les milieux poreux et les échangeurs de chaleur coaxiaux de différentes conceptions a révélé des informations cruciales pour l'ingénierie thermique moderne. En particulier, l'exploration de la conception trapézoïdale pour le tube interne de l'échangeur de chaleur a démontré des avantages significatifs en termes d'amélioration du transfert de chaleur.

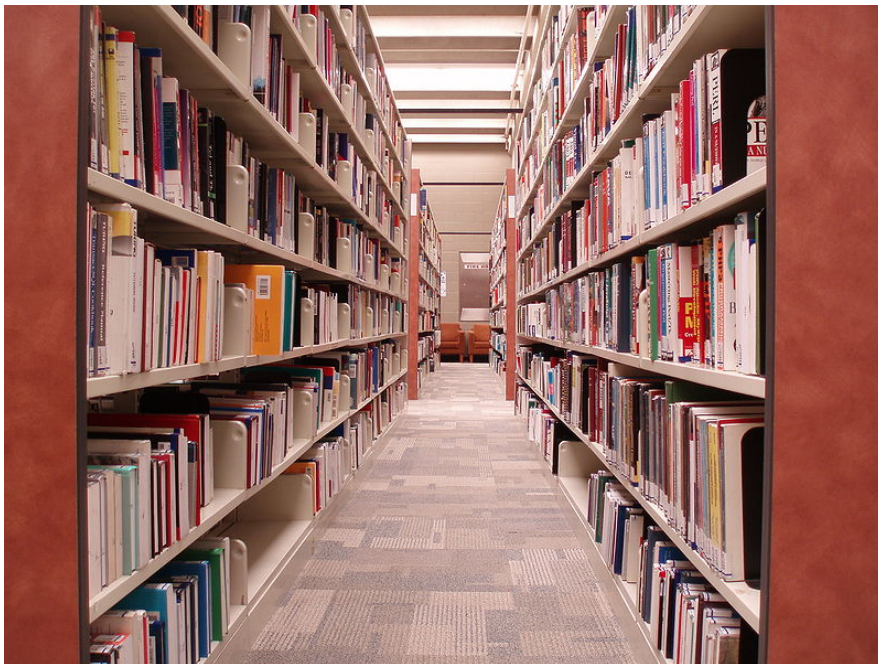
Les propriétés thermiques améliorées des nanofluides hybrides, combinées à une concentration élevée et à une forte porosité des milieux poreux, ont clairement contribué à cette amélioration. Ces découvertes ouvrent la voie à de nouvelles stratégies de conception pour des échangeurs de chaleur plus performants dans divers domaines d'application.

Cette recherche souligne également l'importance de la modélisation mathématique et des simulations numériques pour éclairer les mécanismes complexes qui régissent le transfert de chaleur dans ces systèmes. Les interactions subtiles entre les caractéristiques du fluide, de la géométrie et du milieu poreux nécessitent une approche globale pour une compréhension approfondie. En exploitant des concentrations élevées de nanofluides hybrides, ainsi qu'une porosité importante, il est possible d'optimiser considérablement les performances thermiques des échangeurs de chaleur coaxiaux.

En fin de compte, cette étude met en évidence le potentiel prometteur de l'utilisation des nanofluides hybrides et des milieux poreux dans les conceptions d'échangeurs de chaleur novatrices. En tirant parti de cette synergie complexe, il est possible de façonner l'avenir de l'ingénierie thermique avec des solutions qui dépassent les limites actuelles.

Cette conclusion marque le début de nouvelles opportunités de recherche et d'applications pratiques pour améliorer l'efficacité énergétique, la durabilité et les performances des systèmes thermiques dans une variété de secteurs industriels.

Références



Références

Les résultats de ce travail ont été obtenu en collaborant avec l'équipe de recherche de mon encadreur.

- [1] M. Bouselsal, F. Mebarek-Oudina, N. Biswas, A.I. Ismail, Heat Transfer Enhancement Using Al₂O₃-MWCNT Hybrid-Nanofluid inside a Tube/Shell Heat Exchanger with Different Tube Shapes. *Micromachines* 14 (5), 1072 (2023). <https://doi.org/10.3390/mi14051072>
- [2] F. Mebarek-Oudina, I. Chabani, Review on Nano Enhanced PCMs: Insight on nePCM Application in Thermal Management/Storage Systems. *Energies*. 2023; 16(3):1066. <https://doi.org/10.3390/en16031066>
- [3] K. Ramesh, F. Mebarek-Oudina, A. I. Ismail, B. R. Jaiswal, A. S. Warke, R. K. Lodhi and T. Sharma, Computational analysis on radiative non-Newtonian Carreau nanofluid flow in a microchannel under the magnetic properties, *Scientia Iranica*, 2023, 30 (2), 376-390.
- [4] F. Mebarek-Oudina, Preeti , A. S. Sabu, H. Vaidya, R. W. Lewis, S. Areekara, A. Mathew and A. I. Ismail, Hydromagnetic flow of magnetite-water nano-fluid utilizing adapted Buongiorno model, *International Journal of Modern Physics B*, 2023, 2450003. <https://doi.org/10.1142/S0217979224500036>
- [5] I. Chabani, F. Mebarek-Oudina, H. Vaidya, and A. I. Ismail, Numerical analysis of magnetic hybrid Nano-fluid natural convective flow in an adjusted porous trapezoidal enclosure, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 564 (2), 170142. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170142>
- [6] J. Raza, F. Mebarek-Oudina and L. Ali Lund, The flow of magnetised convective Casson liquid via a porous channel with shrinking and stationary walls, *Pramana - Journal of Physics*, 2022, 96, 229. <https://doi.org/10.1007/s12043-022-02465-1>
- [7] F. Mebarek-Oudina, H. Laouira, A. K. Hussein, M. Omri, A. Aissa, L. Kolsi and U. Biswal, Mixed Convection inside a Duct with an Open Trapezoidal Cavity

Equipped with Two Discrete Heat Sources and Moving Walls, *Mathematics*, 10(6)(2022)929; <https://doi.org/10.3390/math10060929>

[8] Mebarek-Oudina, F. & Chabani, I., Review on Nano-fluids applications and heat transfer enhancement techniques in different enclosures, *Journal of Nanofluids*, 11(2),155-168, 2022. <https://doi.org/10.1166/jon.2022.1834>

[9] F. Mebarek-Oudina, R. Fares, R. Choudhari Convection Heat Transfer of MgO-Ag /Water Magneto-Hybrid Nanoliquid Flow into a Special Porous Enclosure. *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, 2020, 2(2), 84-95. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2020.2.2.1>

[10] F. Mebarek-Oudina, Convective Heat Transfer of Titania Nanofluids of different base fluids in Cylindrical Annulus with discrete Heat Source, *Heat Transfer-Asian Research*, 48(2019) 135-147. <https://doi.org/10.1002/htj.21375>

[11] F. Mebarek-Oudina, Numerical Modeling of the Hydrodynamic Stability in Vertical annulus with Heat Source of different Lengths, *Engineering Science and Technology*, 20(4)(2017)

[12] <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/1258>

RESUME

L'étude du transfert de chaleur amélioré avec l'utilisation d'un nano-fluide hybride Cu-TiO₂/eau dans une enceinte poreuse avec plusieurs obstacles chauffés a révélé des résultats prometteurs. Voici les principales conclusions de cette recherche :

Amélioration significative du transfert de chaleur : L'incorporation du nano-fluide hybride Cu-TiO₂/eau a considérablement amélioré le transfert de chaleur par rapport à l'utilisation d'un fluide conventionnel. Les propriétés thermiques améliorées du nano-fluide, notamment sa conductivité thermique accrue, ont favorisé une dissipation de chaleur plus efficace.

Effets de la géométrie poreuse : La structure poreuse de l'enceinte a joué un rôle crucial dans l'efficacité du transfert de chaleur. Les interactions complexes entre le fluide, les obstacles chauffés et les pores ont influencé la convection, la conduction et la diffusion thermique, contribuant ainsi aux performances améliorées observées.

Réduction de la résistance thermique : L'utilisation du nano-fluide hybride a permis de réduire la résistance thermique à l'interface fluide-obstacles, facilitant ainsi un transfert de chaleur plus fluide et rapide.

Potentiel d'application : Les résultats de cette étude ouvrent la voie à de nombreuses applications potentielles. Parmi celles-ci, citons le refroidissement efficace des composants électroniques, la gestion thermique améliorée dans l'industrie et les possibilités d'applications médicales et environnementales nécessitant un contrôle précis de la température.

Besoin de recherches complémentaires : Malgré les résultats positifs, des recherches complémentaires sont nécessaires pour explorer davantage les effets de la concentration des nano-particules, de leur taille et d'autres paramètres sur le transfert de chaleur. De plus, des études expérimentales pour valider les simulations numériques sont essentielles.

En résumé, l'utilisation du nano-fluide hybride Cu-TiO₂/eau offre un potentiel prometteur pour améliorer le transfert de chaleur dans des environnements poreux avec des obstacles chauffés. Cette étude élargit notre compréhension des mécanismes sous-jacents et ouvre la voie à des avancées technologiques significatives dans le domaine de la gestion thermique. Elle incite également à approfondir la recherche pour optimiser davantage cette approche et la mettre en pratique dans diverses applications industrielles et scientifiques

Mots clés: Nano-fluides hybrides ; flux convectif; enceintes poreuses; chauffage discret

Abstract

The study of enhanced heat transfer with the use of a Cu-TiO₂/water hybrid nano-fluid in a porous enclosure with several heated obstacles revealed promising results. Here are the main conclusions of this research:

Significant improvement in heat transfer : The incorporation of the Cu-TiO₂/water hybrid nano-fluid has significantly improved heat transfer compared to the use of a conventional fluid. The improved thermal properties of the nano-fluid, including its increased thermal conductivity, promoted more efficient heat dissipation.

Effects of Porous Geometry : The porous structure of the enclosure played a crucial role in the heat transfer efficiency. The complex interactions between the fluid, the heated obstacles and the pores influenced convection, conduction and thermal diffusion, thus contributing to the improved performance observed.

Reduced thermal resistance : The use of the hybrid nano-fluid has reduced thermal resistance at the fluid-barrier interface, facilitating smoother and faster heat transfer.

Application potential : The results of this study open the way to many potential applications. These include efficient cooling of electronic components, improved thermal management in industry, and possibilities for medical and environmental applications requiring precise temperature control.

Need for further research: Despite the positive results, further research is needed to further explore the effects of nanoparticle concentration, size and other parameters on heat transfer. Moreover, experimental studies to validate numerical simulations are essential.

In summary, the use of the Cu-TiO₂/water hybrid nano-fluid offers promising potential to improve heat transfer in porous environments with heated obstacles. This study expands our understanding of the underlying mechanisms and paves the way for significant technological advances in the field of thermal management. It also encourages further research to further optimize this approach and put it into practice in various industrial and scientific applications

Keywords: Hybrid Nano-fluids; convective flow; porous enclosures; discrete heating

كشفت دراسة النقل الحراري المعزز باستخدام سائل نانوي هجين Cu-TiO₂/ ماء في حاوية مسامية مع العديد من العوائق الساخنة عن نتائج واعدة. وفيما يلي الاستنتاجات الرئيسية لهذا البحث:

تحسن كبير في نقل الحرارة : أدى دمج السائل النانوي الهجين Cu-TiO₂/الماء إلى تحسين نقل الحرارة بشكل كبير مقارنة باستخدام السوائل التقليدية. إن الخصائص الحرارية المحسنة للسائل النانوي، بما في ذلك زيادة التوصيل الحراري، عززت تبديد الحرارة بشكل أكثر كفاءة.

تأثيرات الهندسة المسامية : لعب الهيكل المسامي للعلبة دورًا حاسمًا في كفاءة نقل الحرارة. أثرت التفاعلات المعقدة بين السائل والعوائق الساخنة والمسام على الحمل الحراري والتوصيل والانتشار الحراري، مما ساهم في تحسين الأداء الملحوظ.

انخفاض المقاومة الحرارية : أدى استخدام السائل النانوي الهجين إلى تقليل المقاومة الحرارية عند واجهة حاجز السائل، مما يسهل نقل الحرارة بشكل أكثر سلاسة وأسرع.

إمكانات التطبيق : نتائج هذه الدراسة تفتح الطريق أمام العديد من التطبيقات المحتملة. ويشمل ذلك التبريد الفعال للمكونات الإلكترونية، وتحسين الإدارة الحرارية في الصناعة، وإمكانات التطبيقات الطبية والبيئية التي تتطلب التحكم الدقيق في درجة الحرارة.

الحاجة إلى المزيد من الأبحاث : على الرغم من النتائج الإيجابية، هناك حاجة إلى المزيد من الأبحاث لمواصلة استكشاف آثار تركيز الجسيمات النانوية وحجمها وغيرها من المعالم على نقل الحرارة. علاوة على ذلك، فإن الدراسات التجريبية للتحقق من صحة عمليات المحاكاة العددية ضرورية.

باختصار، يوفر استخدام السائل النانوي الهجين Cu-TiO₂/الماء إمكانات واعدة لتحسين نقل الحرارة في البيئات المسامية ذات العوائق الساخنة. تعمل هذه الدراسة على توسيع فهمنا للآليات الأساسية وتمهد الطريق لتحقيق تقدم تكنولوجي كبير في مجال الإدارة الحرارية. كما يشجع على إجراء المزيد من الأبحاث لتحسين هذا النهج ووضع موضع التنفيذ في مختلف التطبيقات الصناعية والعلمية.

الكلمات المفتاحية : سائل النانو الهجين ؛ التدفق الحراري ؛ العوائق المسامية ؛ تدفئة منفصلة .