



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° :D02P2024E

Mémoire de Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables

Thème

L'effet thermique des nanoparticules dans une cavité en zigzag.

Présenté par :

Mamadou Mamadou Issoufou

Soutenu le : 31/06/2024 devant le jury composé de :

Dr. I.Tabet MCA Université de Skikda Président

Pr. M.Oudina MCA Université de Skikda Rapporteur

Dr. K. DhiF MCB Université de Skikda Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement



Ce mémoire est l'aboutissement de plusieurs mois de travail, de recherches et de réflexions. Il n'aurait pu voir le jour sans le soutien et l'assistance de nombreuses personnes que je tiens à remercier chaleureusement.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, Pr. Mebarek-Oudina. Grand scientifique, il a réussi à placer notre université de Skikda en 6ème position parmi tous les établissements éducatifs publics et privés d'Algérie selon le classement mondial des universités/institutions 2024 de "AD Scientific Index". Son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et son soutien constant ont été essentiels à l'aboutissement de cette recherche. Je souhaite également remercier tous ceux qui m'ont aidé de près et de loin.

Je remercie les membres du jury pour leurs suggestions constructives et leurs remarques pertinentes qui ont enrichi ce mémoire.

Dédicace



À ma mère Mariama Elhadji Boukar et à mon père Mamadou Mamadou Mary pour leur amour et leur soutien inconditionnel.

À mes sœurs Zeinan, Fadji, Kadi, Ambalam, Safiya et mes frères Idi, Maïta Gama, Abba, Ali, Bazoum, Garba, Ibrahim pour leur amour et soutien indéfectible durant mes études.

À tous les membres de ma famille et à mes amis.

À tous mes camarades que j'ai connus en Algérie pour leur compagnie amicale qui m'a significativement aidé à m'épanouir.

Nomenclature

➤ Les lettres Grecque

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

β : Coefficient de dilatation thermique [K^{-1}]

σ : Conductivité électrique [$\text{Ohm} \cdot \text{m}$]⁻¹

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

φ : La fraction volumique [%]

ω : Vorticité [s^{-1}]

➤ Les lettres latines

m : Masse [Kg]

V : Volume [m^3]

c_p : Capacité thermique á pression constante [$\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

k : conductivité thermique [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}$]

T_c : Température froide [K]

T_h : Température haude [K]

T_o : Température de référence [K]

R : Rayon [m]

g : Accélération de pesanteur [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

H : Hauteur de transfert de chaleur [m]

x, y : les axes en coordonnée cartésienne [m]

u, v : les composantes de vitesse en coordonnée cartésiennes [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

➤ les Indices

p : Nanoparticule

f : Fluide de base

nf : Nano-fluide

c : pour la température froide

h : pour la température chaude

➤ **Nombre adimensionnels**

Ra : nombre de Rayleigh

Nu : nombre de Nusselt.

Nu_x : nombre de Nusselt local.

Nu_{moy} : nombre de Nusselt moyen.

Liste des figures

Fig. I.1.: La taille des quelques objets [2].	2
Fig. I.2. : Représentation schématique d'un procédé à une seule étape pour la production de nano fluides (Choi [25]).	5
Fig. II.1. : Modélisation de notre cavité en zigzag en 2D.	14
Fig. II.2. : Formalisation du problème.	15
Fig. III.1. : Variation de nombre de Nu moyen en fonction de nombre d'élément.	20
Fig. III.2. : Lignes de courant, lignes isothermes et lignes entropique pour le nano-fluide hybride Al ₂ O ₃ - MgO/eau.	21
Fig. III.3. : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh pour différent valeur de ϕ .	23
Fig. III.4. : iso-courant, isothermes et entropie par variation du Rayons R.	24-25
Fig. III.5. : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh pour différent valeur de R.	26

Listes des tables

Table. I.1 : Les techniques et méthodes de production des nano-fluides.	6
Table. I.2: Propriété thermophysique des quelques nanoparticules [141-145].	9
Table. I.3: Propriété thermophysique des fluides des bases [141-145].	9

Résumé :

Dans notre travail, nous avons étudié numériquement la convection naturelle du nano-fluide hybride $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}/\text{H}_2\text{O}$ de manière intensive afin de comprendre l'effet thermique des nanoparticules lorsqu'elles sont dans une cavité en zigzag. La paroi en zigzag verticale droite est chauffée à une température T_h , tandis que la paroi en zigzag verticale gauche est maintenue à une température T_c tel que $T_c < T_h$. Quant à la paroi horizontale, supérieure et inférieure, elles sont supposées adiabatiques. Après avoir émis quelques hypothèses simplificatrices des équations de l'énergie et de mouvement, nous avons utilisé la technique numérique basée sur les éléments finies à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics. Premièrement, nous avons fait varier le nombre de Rayleigh Ra de 10^4 à 10^6 pour les valeurs de la fraction volumique des nanoparticules Al_2O_3 et MgO comprises dans l'intervalle $0.01 < \phi < 0.04$. Deuxièmement, nous avons fait varier le rayon R de 0,55 à 1,25 pour les mêmes valeurs de Ra et ϕ . Le but de cette étude est de comprendre l'effet thermique des nanoparticules via des paramètres tels que : le nombre de Nusselt, le nombre de Rayleigh et la fraction volumique. Les résultats de simulation numérique montrent que le transfert thermique croît avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique.

Abstract:

In this work, we have numerically studied the natural convection of Al₂O₃-MgO/H₂O hybrid nano-fluid intensively to understand the thermal effect of nanoparticles when they are in a zigzag cavity. The right vertical zigzag wall is heated to a temperature Th, while the left vertical zigzag wall is maintained at a temperature Tc such that Tc < Th. As for the upper and lower horizontal walls, they are assumed to be adiabatic. After having made some simplifying hypotheses of the energy and motion equations, we used the numerical technique based on finite elements with the Comsol Multiphysics software. First, we varied the Rayleigh number Ra from 10⁴ to 10⁶ for the values of the volume fraction of Al₂O₃ and MgO nanoparticles included in the interval 0.01 < φ < 0.04. Second, we varied the radius R from 0.55 to 1.25 for the same values of Ra and φ. The aim of this study is to understand the thermal effect of nanoparticles via various parameters such as: the Nusselt number, the Rayleigh number and the volume fraction. The numerical simulation results show that the heat transfer increases with the increase in the Rayleigh number and the volume fraction.

ملخص :

هنا، قمنا بدراسة عددية للحمل الطبيعي للموائع النانوية الهجينة Al_2O_3-MgO/H_2O

بشكل مكثف من أجل فهم التأثير الحراري للجسيمات النانوية عندما تكون في تجويف متعرج. يتم تسخين الجدار المتعرج العمودي الأيمن إلى درجة حرارة Th ، في حين يتم الحفاظ على الجدار المتعرج العمودي الأيسر عند درجة حرارة cT بحيث $T_c < Th$ أما بالنسبة للجدار الأفقي والعلوي والسفلي، فمن المفترض أن يكون ثابت الحرارة. بعد وضع بعض الفرضيات المبسطة لمعادلات الطاقة والحركة، استخدمنا التقنية العددية المعتمدة على العناصر المحدودة باستخدام برنامج Comsol Multiphysics. أولاً، قمنا بتغيير رقم رايلى Ra من 10^4 إلى 10^6 لقيم الكسر الحجمي للجسيمات النانوية Al_2O_3 و MgO المتضمنة في الفاصل الزمني $0.01 < \phi < 0.04$. ثانياً، قمنا بتغيير نصف القطر R من 0.55 إلى 1.25 لنفس قيم Ra و ϕ . الهدف من هذه الدراسة هو فهم التأثير الحراري للجسيمات النانوية من خلال عوامل مثل: رقم نسلت، رقم رايلى والكسر الحجمي. أظهرت نتائج المحاكاة العددية أن انتقال الحرارة يزداد بزيادة عدد رايلى وكسر الحجم.

Table de Matière

Introduction Générale

Chapitre I : Nanoparticules : bibliographie et applications

<u>Introduction</u>	1
I.1. <u>Nanoparticules : bibliographie et applications</u>	
I.1. <u>Définition et type des nanoparticules</u>	1
I.1.1. <u>Les nano-fluides</u>	2
I.1.2. <u>Méthodes de fabrication des nanoparticules</u>	4
➤ Processus en une seule étape	4
➤ Processus en deux étapes	5
➤ Processus en trois étapes	6
I.2. <u>Domaine d'application des nanoparticules</u>	7
I.2.1. <u>L'énergie</u>	7
I.2.2. <u>L'alimentation</u>	7
I.2.3. <u>Les peintures et revêtements</u>	8
I.2.4. <u>Les textiles</u>	8
I.2.5. <u>Les cosmétiques</u>	8
I.2.6. <u>Le domaine médical</u>	8
I.3. <u>Propriété thermophysique des nano-fluides</u>	9
I.3.1 <u>Masse volumique et Chaleur spécifique</u>	9
I.3.2. <u>Coefficient de dilatation thermique</u>	10
I.3.3. <u>Conductivité thermique</u>	11
I.4. <u>Les échangeurs de chaleurs</u>	11
I.4.1. <u>Les échangeurs de chaleurs sans les nanoparticules</u>	11
I.4.2. <u>Quelques types d'échangeur de chaleur</u>	11
I.5. <u>Les échangeurs de chaleurs avec les nanoparticules</u>	12
<u>Conclusion</u>	12

Chapitre II : Géométrie et modèle mathématique	14
<u>Introduction</u>	14
II.1. <u>Géométrie et modèle mathématique</u>	14
II.1.1. <u>Géométrie</u>	14
II.2. <u>Modèle mathématique</u>	14
II.2.1. <u>Formulation du problème</u>	14
II.2.2. <u>Les équations</u>	16
II.2.2.1. <u>Equation de continuité</u>	16
II.2.2.2. <u>Equation de quantité de mouvement</u>	16
II.2.2.3. <u>Equation d'énergie</u>	16
• Cas du nano-fluide hybride (Al_2O_3 MgO/H ₂ O)	16
II.2.2.4 <u>Conditions initiales</u>	17
II.2.2.5 <u>Conditions aux limites dimensionnelles</u>	18
II.2.2.6 <u>Calcul du nombre de Nusselt</u>	18
• Locale	18
• Moyen	19
<u>Conclusion</u>	19
Chapitre III : Résultats et discussions.	20
<u>Introduction</u>	20
III.1. <u>Effet du Maillage</u>	20
III.2. <u>Résultats et discussion</u>	21
III.2.1. <u>les premiers résultats</u>	21
III.2.1.1. <u>lignes de courant, lignes isothermes et lignes entropiques</u>	21
• Iso-courant	22
• Isothermes	22
• Génération d'entropie	22
III.2.1.2. <u>Variation du nombre de Nusselt Moyen</u>	22
• Influence du nombre de Rayleigh	23

• Influence de la fraction volumique	23
• Effet Combiné	23
III.2.2. <u>Les seconds résultats</u>	24
III.2.2.1. <u>lignes de courant, lignes isothermes et lignes entropiques</u>	24
• Iso-courant	25
• Isothermes	25
• Génération d'entropie	25
III.2.2.2. <u>Variation du nombre de Nusselt moyen</u>	25
• Pour $R=0.55$	26
• Pour $R=0.75$	26
• Pour $R=0.95$	27
• Pour $R=1.15$	27
<u>Conclusion Générale</u>	28
<u>Référence bibliographique</u>	29



Introduction Générale

Introduction générale

Dans un contexte où l'utilisation des nanoparticules est omniprésente dans divers processus technologique, notamment dans les échangeurs de chaleur, la recherche s'est intensifiée autour de l'amélioration du transfert de chaleur à l'aide de nanoparticules. Lorsque les dimensions des objets se rapprochent de l'échelle nanométrique, les propriétés de la matière subissent des changements significatifs [1]. L'utilisation des cavités est très répandue dans de nombreux processus technologiques, tels que la conception thermique des bâtiments, le refroidissement des composants électroniques, les panneaux solaires, les échangeurs de chaleur, etc. De même dans un échangeur de chaleur, l'incorporation de nanoparticules dans les fluides de base, tels que l'eau, augmente leur conductivité thermique d'où une amélioration significative du transfert thermique. Les échangeurs de chaleur sont employés dans divers secteurs permettant un transfert thermique, comme les systèmes de chauffage, de climatisation et de production d'énergie pour récupérer la chaleur produite par les processus et la transférer à un autre fluide qui en a besoin. Ils sont utilisés pour refroidir, réchauffer ou condenser un liquide. Leur efficacité dépend des matériaux utilisés, qu'ils soient métalliques ou non, tels que l'aluminium, le fer, le cuivre, l'acier, le bronze, la céramique, le verre et le graphite. Le coefficient de transfert thermique varie selon le matériau, influençant ainsi la capacité d'échange thermique. En augmentant ce coefficient, on améliore l'échange thermique, ce qui peut être réalisé en modifiant la géométrie des échangeurs thermiques. Leur objectif principal est de préserver l'énergie et de réduire les coûts, ce qui en fait un élément crucial de toute stratégie de gestion énergétique et de protection environnementale. Il existe divers types d'échangeur de chaleur suivant leur domaine d'application. Nous pouvons nous référer aux travaux de recherche antérieurs pour mieux comprendre l'impact thermique des nanoparticules et nano-fluides dans le domaine du transfert thermique [3-20]. La présente étude vise à contribuer à une meilleure compréhension des interactions thermiques dans des cavités en zigzag et à ouvrir de nouvelles voies pour l'amélioration des dispositifs de gestion thermique. Les résultats obtenus pourraient avoir des implications importantes pour le développement de technologies avancées dans divers domaines, tels que les échangeurs de chaleur, les dispositifs de refroidissement électronique et les systèmes énergétiques.

Notre mémoire de fin d'étude est organisé comme suit : la présente introduction générale donne une vue d'ensemble sur les nanoparticules. Puis, le premier chapitre est consacré à la bibliographie et aux applications des nanoparticules. Après le premier chapitre, vient le deuxième chapitre qui porte sur la géométrie et le modèle mathématique de la cavité en zigzag étudiée. Enfin, le troisième chapitre est dédié aux résultats issus des simulations numériques effectuées avec le logiciel COMSOL Multiphysics et leur discussion. Finalement, une conclusion générale englobe tout le travail du mémoire et en donne une interprétation.



Chapitre I

Introduction

Dans le cadre des avancées récentes en science et technologie des matériaux, les nanoparticules ont suscité un intérêt croissant en raison de leurs propriétés thermiques exceptionnelles. Ce premier chapitre se propose d'explorer les bases théoriques et pratiques des nano-fluides ainsi que leurs diverses applications industrielles. En particulier, nous mettrons en lumière l'effet thermique des nanoparticules au sein de structures complexes, telles que des cavités en zigzag, et comment ces effets peuvent améliorer les performances des échangeurs de chaleur. Les nano-fluides, des suspensions de nanoparticules dans des fluides de base, offrent des propriétés thermophysiques supérieures par rapport aux fluides conventionnels. Leur utilisation prometteuse dans divers domaines, allant de la microélectronique à l'industrie énergétique, repose sur leur capacité à améliorer significativement le transfert de chaleur. Dans ce chapitre, nous discuterons en détail des caractéristiques des nano-fluides, des types de nanoparticules couramment utilisées, ainsi que des méthodes de préparation et de stabilisation de ces suspensions. En parallèle, nous aborderons les échangeurs de chaleur, des dispositifs cruciaux pour de nombreuses applications industrielles. Nous comparerons les performances des échangeurs de chaleur traditionnels avec ceux intégrant des nano-liquides, en mettant l'accent sur les gains en efficacité thermique.

Ce chapitre établira ainsi les bases nécessaires pour comprendre les interactions complexes entre les nano-liquides et les structures de transfert de chaleur, préparant le terrain pour une analyse approfondie des effets thermiques des nanoparticules dans des cavités en zigzag.

I. Nanoparticules : bibliographie et applications

I.1. Définition et type des nanoparticules

Une nanoparticule est un objet ou une particule dont les dimensions externe sont dans l'ordre de nanomètre c'est-à-dire une particule dont le diamètre est compris entre 1 et 100 nm. De part leur si petite dimension, ils ont une propriété physique particulier, les nanoparticules peuvent être naturelle ou artificielle est classé en trois catégorie en fonction de leur dimension :

- Lorsqu'une dimension se trouve à l'échelle nanométrique tandis que les deux autres dimensions sont suffisamment grandes, on parle **des nano-plaquettes, des nano-feuillets et des nano-plats, Les films minces**
- **Les nanotubes, les nano-fibres, les nano-filaments ou nano-bâtonnets** c'est lorsque les deux dimensions sont d'échelle nanométrique et uniquement le troisième est plus grand, il s'agit des nano-fibres de polyester, nanotubes de bore ou de carbone ;
- **Les fullerènes** c'est quand toutes les trois dimensions sont de l'ordre de nanomètre, alors nous avons les nanoparticules d'oxyde de zinc, d'alumine, de carbonate de calcium, etc.

On peut illustrer la différence de taille entre la planète terre et une orange en comparant celle entre une orange et une nanoparticule. Ces variations dimensionnelles influent grandement sur les propriétés physiques des matériaux, notamment leur résistance. En effet, à l'échelle nanométrique, une augmentation significative de la proportion d'atomes en surface entraîne une augmentation de l'activité surfacique. Par conséquent, les propriétés d'un même métal diffèrent considérablement entre sa forme macroscopique et sa forme nano.

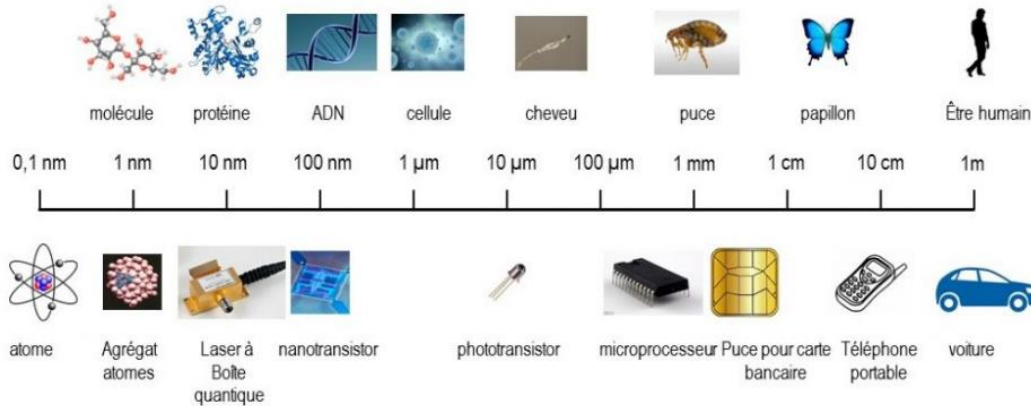


Fig. I.1 : La taille des quelques objets [2]

Les nanomatériaux peuvent être élaborés à partir d'une variété d'éléments chimiques, comprenant des métaux, des soufres, des sélénites, du carbone, des polymères, ainsi que des molécules biologiques comme des lipides, des glucides, des peptides ou encore des acides nucléiques. Il en existe donc une large diversité.

I.1.1. Les nano-fluides

Les nano-fluides sont constitués de particules de taille nanométrique dispersées dans un liquide, formant ainsi des solutions colloïdales. Leurs propriétés thermiques remarquables ont suscité un vif intérêt au cours de la dernière décennie, avec une augmentation significative des échanges qui restent encore largement inexplicables par la phénoménologie existante. Ce transfert de chaleur positionne les nano-fluides comme une technologie prometteuse dans le domaine des transferts thermiques, offrant ainsi la possibilité d'optimiser les performances de divers échangeurs.

Xuan et al. [3] ont mené une étude expérimentale sur le transfert de chaleur par convection ainsi que sur les propriétés d'écoulement des nano-fluides, leurs conclusions indiquent que le coefficient de transfert de chaleur convectif des nano-fluides, ainsi que la fraction volumique des nanoparticules est supérieure à celle de l'eau pure. **Khanafer et al.** [4] ont étudié numériquement le transfert de chaleur par convection naturelle des nano-fluides dans une enceinte, leurs résultats ont montrés que le nombre moyen de Nusselt augmente avec la fraction volumique des nanoparticules pour différents nombres de Grashof. L'étude expérimentale de **Das et al.** [5] a montré que la conductivité thermique des nano-fluides augmente avec la température. **Kwon et al.** [6] ont démontré que l'utilisation de nanoparticules de ZnO et d'Al₂O₃ entraîne une augmentation du coefficient de transfert de

chaleur jusqu'à 30 % lorsque la concentration d' Al_2O_3 atteint 6 %. **Albadr et al. [7]** ont examiné le transfert de chaleur à travers un échangeur de chaleur en utilisant la nanoparticule Al_2O_3 à différentes concentrations, observant que le coefficient de transfert de chaleur par convection forcée est légèrement supérieur à celui du liquide de base aux mêmes températures et débit massique. **Asadi et al. [8]** ont mené une étude expérimentale sur les performances de transfert thermique du nano-fluide hybride Al_2O_3 -MWCNT (à base d'huile), constatant une amélioration du transfert thermique. **Ghazanfari et al. [9]** ont réalisé une analyse numérique des performances globales d'un échangeur de chaleur de type coque à tubes torsadés utilisant des nanoparticules d' Al_2O_3 , observant une amélioration du transfert de chaleur de 20 % et une augmentation de la chute de pression jusqu'à 40 %. **Raza et al. [10]**, ont étudié le flux magnétohydrodynamique de fluide Nano Williamson généré par étirement de plaque avec plusieurs glissements, leur résultat montrent que le profil de température dans le flux diminue avec la caractéristique de la conductivité thermique. **Mebarek-Oudina et al. [11]**, ont étudié l'effet de l'emplacement de la source de chaleur sur la convection flottante des nano-fluides dans un anneau, leur résultat indique que la fraction volumique des nanoparticules influence également le transfert de chaleur dans la géométrie annulaire. **Khan et al. [12]** ont étudié le flux magnéto-convectif mixte des nanoparticules hydriques (MWCNT/ Fe_3O_4) à travers un coin d'étirement/rétrécissement vertical, le résultat révèle que l'hybridité des nanoparticules augmente les profils de température et de concentration. **Dadheech et al. [13]** ont fait une analyse comparative du transfert de chaleur des nano-fluides $\text{MoS}_2/\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ et $\text{MoS}_2\text{-SiO}_2/\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ avec convection naturelle et champ magnétique incliné, leur étude montre que si on augmente le paramètre de convection, le profil de vitesse augmente et un effet opposé est observé pour le profil de température des deux nano-fluides. **Pushpa et al. [14]**, ont étudié le flux convectif flottant et dissipation thermique des nano-liquides $\text{Cu-H}_2\text{O}$ dans un anneau à travers un déflecteur mince, les résultats montrent que la longueur du déflecteur ayant 20% de la largeur annulaire placée à 80% de la hauteur annulaire semble produire des taux de transfert thermique plus élevés par rapport à d'autres choix de longueurs et de positions de déflecteur. **Dhif et al. [15]** ont fait une analyse thermique du système de stockage de collecteur solaire à l'aide d'un nano-fluide hybride avec $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ comme nanoparticules, les résultats concluent que la meilleure performance est obtenue pour un espacement de 0,04 à 0,06 mm entre les tubes. **Prasad et al. [16]** ont étudié le flux convectif magnétohydrodynamique instable d'un nano-liquide via une zone de Riga étirée radialement via la méthode d'analyse d'homotopie optimale, les résultats montrent essentiellement une amélioration du profil de vitesse pour les valeurs croissantes du nombre de Hartman. **Chabani et al. [17]** ont étudié le flux MHD d'un nano-fluide hybride dans une enceinte triangulaire avec des zigzags et un obstacle elliptique, les résultats révèlent que l'augmentation de la concentration du fluide de travail de 0,02 à 0,08 améliore l'indice de Nusselt de 19%. Et de même l'amélioration du nombre de Rayleigh accélère également le flux et renforce le champ de vitesse. **Asogwa et al. [18]** ont fait une étude comparative sur les nanoparticules d' Al_2O_3 à base d'eau via des nanoparticules de CuO à base d'eau sur une surface de plaque de Riga radiative à accélération exponentielle via le transfert de chaleur, leur résultats montrent que le nombre de Hartmann modifié améliorent le nano-fluide CuO/eau par rapport au nano-fluide

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$ en raison de la force de Lorentz. De même la densité plus élevée du nano-fluide CuO/eau est améliorée par l'augmentation de la fraction volumique de nanoparticules par rapport à l' $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$ grâce à une diminution de la distribution de vitesse. **Mebarek-Oudina et Chabani [19]** ont travaillé sur les applications des nano-fluides et les techniques d'amélioration du transfert de chaleur dans différentes enceintes, l'étude montre que les nano-fluides et les propriétés des milieux poreux ont une relation proportionnelle avec l'amélioration de l'écoulement, en particulier en ce qui concerne des nano-fluides hybrides qui peuvent offrir des effets remarquables d'augmentation du transfert de chaleur. **Marzougui et al. [20]**, ont étudié la génération d'entropie et transfert de chaleur du nano-liquide Cu -eau dans une cavité poreuse entraînée par un couvercle via un champ magnétique, les résultats indiquent que la génération totale d'entropie diminue lorsque Darcy, Hartmann et la fraction volumique des nanoparticules augmentent. Et de même le nombre de Rayleigh et la fraction volumique des nanoparticules peuvent être considérés comme des caractéristiques cruciales dans la modulation de la convection.

I.1.2. Méthodes de fabrication des nanoparticules

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour la préparation des nano-fluides, parmi lesquelles on prend en compte le processus d'évaporation en une seule étape, le processus en deux et trois étapes, la méthode de mélange direct ainsi que plusieurs autres approches. Elles sont brièvement discutées ci-dessous.

➤ **Processus en une seule étape**

Cette méthode, appelée le procédé d'évaporation à une seule étape, a été présentée comme une méthode efficace pour produire des nano-fluides stables. Elle implique la dispersion directe des nanoparticules dans un liquide de base. Cette technique a été mise en œuvre à l'Argonne National Laboratory aux États-Unis. Dans leurs expériences, **Eastman et al. [21]** ont utilisé des nano-poudres de CuO et Al_2O_3 . Le schéma de principe de ce procédé est illustré dans la Figure ci-dessous. Cette même approche a été adoptée par **Lee et al. [22]**, ainsi que par **Choi et Eastman [23]**, et **Choi et al. [24]**.

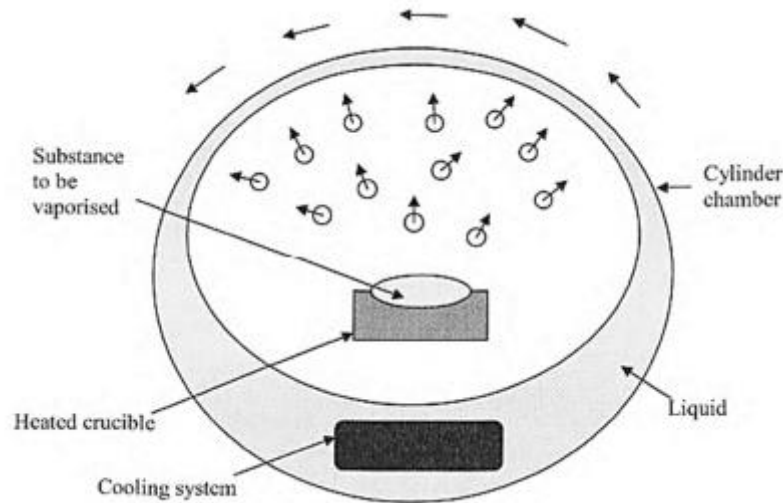


Fig. I.2 : Représentation schématique d'un procédé à une seule étape pour la production de nano-fluides (Choi [25]).

Zhu *et al.* [26] ont réussi à préparer des nano-fluides de cuivre en faisant réagir du $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ et du $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dans de l'éthylène glycol. Cette réaction a été réalisée sous irradiation par micro-ondes, permettant d'obtenir une suspension stable et sans agglomération.

➤ Processus en deux étapes

Dans le procédé en deux étapes, les nanoparticules sont d'abord produites sous forme de poudre sèche à l'aide de la méthode de condensation de gaz inerte. Ensuite, ces nanoparticules sont dispersées dans le liquide de base. Cette méthode de condensation de gaz présente des avantages par rapport à d'autres techniques, notamment la production de particules dans des conditions plus propres. Les nano-fluides obtenues par cette méthode peuvent présenter une bonne stabilité et homogénéité (Li et Xuan [27]). Cependant, ce procédé est coûteux et peut ne pas satisfaire les exigences pratiques. De nombreuses autres techniques ont été utilisées pour produire des nanoparticules, telles que la synthèse chimique (Gleiter [28]), la pulvérisation, les aérosols et l'atomisation (Ashly [29]), ainsi que la condensation de vapeur métallique (Andres *et al.* [30]). Les nanotubes de carbone, quant à eux, sont produits par diverses techniques, y compris la méthode de décharge à arc (Iijima [31]), l'ablation laser (Scott *et al.* [32]), un procédé catalytique (Hernadi [33]) et le dépôt chimique en phase vapeur (Pan *et al.* [34]). Un autre procédé en deux étapes, reconnu et couramment utilisé pour la production de nano-fluides, est la méthode VEROS (Vacuum Evaporation on Running Oil Substrate), introduite par Yatsuya *et al.* [35]. Par cette technique, les nanoparticules sont produites par évaporation directe sous vide sur la surface de l'huile en mouvement. Cette méthode permet d'obtenir une distribution de taille des particules étroite et un rendement en particules par unité de temps supérieur à celui de la technique d'évaporation de gaz. Toutefois, elle n'est pas adaptée pour les particules composées telles que les oxydes métalliques, et il est difficile de séparer les particules du fluide pour obtenir une poudre sèche. La technique VEROS a été utilisée par Eastman *et al.* [36] pour disperser des nanoparticules de cuivre, avec certaines modifications : l'huile en mouvement a été remplacée par de l'éthylène glycol

immobile. Les nanoparticules obtenues par cette méthode sont très petites, avec un diamètre moyen inférieur à 10 nm, et présentent très peu d'agglomération.

➤ **Processus en trois étapes**

Wang et al. [37] ont introduit une méthode en trois étapes pour produire des nano-fluides d' Al_2O_3 . La première étape consiste à utiliser un mélange mécanique suivi d'un bain à ultrasons. Les nano-fluides obtenus à ce stade contiennent des particules individuelles ainsi que des agglomérations de plusieurs particules. La deuxième étape implique le revêtement des particules avec un polymère. Enfin, la troisième étape consiste à appliquer une filtration pour enlever les particules agglomérées.

Le tableau ci-dessous présente différentes méthodes de fabrication des nano-fluides :

Date	Auteurs	Nanoparticules	Méthode de production
1996	Esumi et al. [38]	CNT	Traitement chimique
1996	Eastman et al. [21]	Cu, CuO et Al_2O_3	Méthode de condensation de gaz et méthode de VEROS
1999	Shaffer et Windle [39]	CNTs	Traitement par oxydation acide
2000	Xuan et Li [27]	Cu	Vibration ultrasonique
2001	Choi et al. [25]	CNTs	Dépôt chimique en phase vapeur
2001	Choi et al. [25]	Cu, CuO, Al_2O_3	Méthode de condensation de gaz inerte et méthode de VEROS
2001	Hirai et Yakura [40]	Pd	Méthode de réduction d'alcool
2002	Bandyopadhyaya [41]	CNTs	Méthode de sonication
2002	Choi et al. [42]	Cu	Méthode d'évaporation direct
2002	Kinloch et al. [43]	CNTs	Traitement par oxydation acide
2002	Li et Xuan [44]	Cu	Vibration ultrasonique
2002	Putra [45]	CuO et Al_2O_3	Vibration ultrasonique
2002	Saito et al. [46]	CNTs	Traitement chimique
2002	Xie et al. [47]	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Ultrasonication
2002	Yerushalmi-Rozen, et Regev [48]	CNTs	Vibration ultrasonique
2003	Islam et al. [49]	CNTs	Sonication
2003	Jiang et al. [50]	CNTs	Traitement par oxydation acide
2003	Xie et al. [51]	CNTs	Traitement d'acide
2004	Assael et al. [52]	CNTs	Ultrasonication
2004	Wen et Ding [53]	CNTs, Al_2O_3	Mélange par cisaillement
2004	Gibson et al. [54]	CNTs	Ultrasonication
2005	Bang et Chang [55]	Al_2O_3	Ultrasonication
2005	Bonnemann et al. [56]	Cu et Ag	Cu : Peptisation ; Ag : Décomposition thermique
2005	Manna et al. [57]	$\text{Al}_{70}\text{Cu}_{30}$	Processus en deux étapes
2005	Wang et al. [58]	CNTs	Supercritique CO_2
2006	Chopkar et al. [59]	CNTs	Processus en deux étape
2006	Lee et al. [60]	$\text{Al}_{70}\text{Cu}_{30}$	Traitement Acide alcalin
2006	Wen et Ding [61]	Cu	Mélange direct et traitement par Acide

Table. I.1 : Les techniques et méthodes de production des nano-fluides.

I.2. Domaine d'application des nanoparticules

Les nanoparticules se retrouvent dans de nombreux objets du quotidien. Voici quelques domaines où elles sont couramment utilisées : l'énergie, l'électronique, les revêtements, les textiles, les articles de sport, les cosmétiques, les applications pharmaceutiques, les applications agroalimentaires, l'aéronautique, l'automobile, la chimie, la construction, la cosmétique, et l'optique. Aujourd'hui, elles sont intégrées dans plus d'un millier de produits. On peut citer des domaines tels que :

I.2.1. L'énergie

Les nanotechnologies permettent de fabriquer des panneaux solaires à couches minces en utilisant beaucoup moins de silicium. Pour les panneaux « organiques » à cellules en plastique, le silicium est même complètement éliminé. Selon leurs promoteurs, les nanotechnologies rendront le photovoltaïque compétitif face aux sources d'énergie fossiles en améliorant le rendement de conversion de l'énergie lumineuse, en élargissant les possibilités d'installation des panneaux solaires et en réduisant les coûts de production. Une avancée majeure a été l'introduction de l'impression « de rouleau à rouleau », permettant de déposer des nano-composants photovoltaïques sur des feuilles métalliques ou des films plastiques. Cette technique offre une plus grande flexibilité que les procédés traditionnels de fabrication des cellules solaires en silicium. Les films souples sont également présentés comme étant moins chers à produire, bien que de nombreuses entreprises n'indiquent pas leur coût par watt. Cependant, le prix des panneaux en silicium a récemment diminué, et les défauts de fabrication sont plus fréquents avec l'impression de rouleau à rouleau. Les substrats en plastique ou en feuille métallique utilisés pour certains modules photovoltaïques souples permettent de se passer des châssis encombrants en aluminium ou en verre des panneaux en silicium. Ces films peuvent être intégrés à une variété de supports construits et même à des objets comme des bagages ou des ordinateurs. Selon les entreprises qui vendent des modules solaires nano-technologiques aux centrales photovoltaïques, leur principal avantage réside dans leur rapidité de mise en œuvre. En matière de solaire thermique, les nanotechnologies sont principalement utilisées dans trois domaines : les revêtements pour améliorer la capacité de collecte des capteurs solaires à concentration, l'amélioration des propriétés thermiques des fluides de stockage de la chaleur, et le développement de convertisseurs thermoélectriques efficaces.

I.2.2. L'alimentation

Aujourd'hui, les nanoparticules sont couramment présentes dans notre alimentation. Elles sont utilisées pour modifier la couleur, l'odeur, le goût, la fluidité, la texture, et la conservation des aliments. En outre, elles peuvent être incorporées dans les emballages pour améliorer la conservation, la traçabilité et le recyclage des produits. Par exemple, les nanoparticules d'oxyde de silice sont ajoutées au sel, aux soupes, au lait, au chocolat, aux crèmes en poudre et aux hamburgers pour améliorer les émulsions. Le dioxyde de titane sous

forme nanométrique est utilisé comme agent blanchissant pour les glaçages et les enrobages de bonbons, ce qui empêche l'oxygène et l'humidité d'altérer le produit, prolongeant ainsi sa durée de conservation.

I.2.3. Les peintures et revêtements

Les nanoparticules représentent un atout supplémentaire pour les fabricants de peintures et de revêtements. Utilisées comme additifs, elles augmentent la résistance à l'abrasion, aux rayures et à la corrosion, tout en offrant une protection contre les UV et en améliorant la durabilité des produits. De plus, elles possèdent des propriétés hydrofuges, antimicrobiennes et autonettoyantes, sans altérer la texture ni l'application des formulations.

I.2.4. Les textiles

L'industrie textile utilise souvent les nanoparticules pour améliorer ses produits, en leur conférant des propriétés thermiques et anti-plis, ainsi qu'une résistance accrue à l'eau, au feu et à l'abrasion. Par exemple, certains vêtements de sport et chaussettes intègrent des nanoparticules métalliques, notamment d'argent, dans les fibres afin de conférer au tissu des propriétés bactéricides et de lutter contre les mauvaises odeurs.

I.2.5. Les cosmétiques

Dans le domaine cosmétique, les nanoparticules de dioxyde de titane et d'oxyde de zinc sont largement utilisées. Elles sont particulièrement présentes dans les produits solaires, où elles agissent en tant qu'écrans solaires minéraux, facilitant ainsi l'application et le confort d'utilisation des produits. Ces nanoparticules sont également présentes dans diverses crèmes, émulsions pour la peau, produits de maquillage et dentifrices. Leur utilisation principale est en tant que colorants, épaississants, dispersants ou filtres UV.

I.2.6. Le domaine médical

Dans le domaine médical, les nanotechnologies ont permis d'apporter d'importantes innovations, notamment dans le développement de prothèses plus résistantes et biocompatibles. La médecine moderne fonde de grands espoirs dans les applications des nanotechnologies, en particulier dans le traitement des cancers. En 2012, des chercheurs britanniques ont réalisé une avancée significative en mettant au point un test à base de nanoparticules d'or permettant de détecter visuellement les premiers stades de maladies ou d'infections telles que le cancer de la prostate ou le VIH. Ce détecteur, composé de nanoparticules d'or déposées sur une base en plastique, analyse le sérum contenu dans le sang du patient. En présence de marqueurs biologiques spécifiques à une maladie, tels que le p24 associé au VIH ou l'antigène prostatique spécifique (PSA) utilisé pour diagnostiquer le cancer de la prostate, les nanoparticules d'or réagissent en donnant une teinte bleue caractéristique à la solution. En l'absence de ces marqueurs, les particules se séparent pour former de petites boules qui confèrent une coloration rougeâtre à la solution. Selon les inventeurs, ce prototype présente une sensibilité dix fois supérieure aux méthodes actuelles et est dix fois moins

coûteux à produire, ce qui pourrait être particulièrement bénéfique pour les pays à faibles ressources.

I.3. Propriété thermophysiques des nano-fluides

L'ajout de nanoparticules modifie profondément les propriétés thermophysiques des solutions, notamment la conductivité thermique, la viscosité dynamique et cinématique, la capacité thermique massique, etc. Un grand nombre de paramètres peuvent influencer cette modification, tels que le matériau des nanoparticules, leur taille, leur rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu, etc. Voici quelques-unes de ces propriétés :

Table. I.2: Propriété thermophysiques des quelques nanoparticules [62-66] :

Nanoparticules	k (W/mK)	ρ [Kg/m ³]	C _p [J/Kg.K]	$\beta \times 10^{-5}$ [K ⁻¹]
Cu	401	8933	385	1.67
Ag	429	10500	235	1.89
TiO ₂	8.9538	4250	686.2	0.9
Al ₂ O ₃	40	3970	765	0.85
CNT	3500	1350	650	4.2

Table. I.3: Propriété thermophysique des fluides des bases [62-66] :

Fluides de bases	k (W/mK)	ρ [Kg/m ³]	C _p [J/Kg.K]	$\beta \times 10^{-5}$ [K ⁻¹]	μ [Kg/s.m ²]
L'eau	0.613	997.1	4179	21	10 ⁻³
Ethylène-glycol(EG)	0.26	1109	2400	65	0.799
Huile	0.144	884	1910	0.7	0.486
Glycérine	0.286	1259.9	2427	0.48	0.0157

I.3.1 Masse volumique et Chaleur spécifique

Les nano-fluides sont habituellement définis en fonction de leur fraction volumique de particules, généralement représentée par le symbole φ . Cette fraction volumique des particules dépasse rarement 8% dans la littérature.

$$\varphi = \frac{\text{volume des particules}}{\text{volume total de la solution}} \quad (I.1)$$

La masse volumique et la chaleur spécifique des nano-fluides est estimée sur la base de la règle du mélange comme.

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} = \frac{\rho_f V_f + \rho_p V_p}{V_f + V_p} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (I.2) :$$

$$(\rho C_p)_{nf} = \rho_{nf} \left(\frac{Q}{m\Delta} \right)_{nf} = \rho_{nf} \frac{Q_f + Q_p}{(m_f + m_p)\Delta T} \quad (I.3)$$

$$= \rho_{nf} \frac{(\rho C_p)_f V_f + (\rho C_p)_p V_p}{\rho_f V_f + \rho_p V_p} \quad (I.4)$$

D'où:

$$C_{p_{nf}} = \frac{(1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p}{(1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p} \quad (I.5)$$

I.3.2. Coefficient de dilatation thermique

La variation de la masse volumique d'un matériau sous l'influence de la température est caractérisée par le coefficient de dilatation thermique β , également appelé coefficient de dilatabilité.

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_\rho \quad (I.6)$$

Nous avons l'équation (I.2) :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p$$

Par analogie, on déduit que :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_p \quad (I.7)$$

Avec β_f et β_p respectivement les coefficients de dilatabilité du fluide porteur et celle des nanoparticules.

En supposant que l'on travaille avec des fluides porteurs incompressibles et que les nanoparticules ainsi que la différence de température imposée aux nanoparticules restent modérées, on peut écrire que la masse volumique du nano-fluide et de ses constituants s'exprime de manière linéaire en fonction de la température par:

$$\begin{aligned} \rho_{nf} &= \rho_{0,nf} \left(1 - \beta_{nf}(T - T_0) \right)_{pf} = \rho_{o,f} \left(1 - \beta_f(T - T_0) \right) \rho_p \\ &= \rho_{o,p} \left(1 - \beta_p(T - T_0) \right) \end{aligned} \quad (I.8)$$

De la première équation, on en déduit l'expression de :

$$\beta_{n.f} = -\frac{(\rho_{nf} - \rho_{o,nf})}{\rho_{o,nf}(T - T_0)} \quad (I.9)$$

En remplaçant ρ_{nf} et $\rho_{o,nf}$ par leur valeur tirée de l'équation (I.2) on en déduit :

$$\beta_{nf}\rho_{o,nf} = (1 - \varphi)\beta_f\rho_{o,f} + \varphi\beta_p\rho_{o,p} \quad (I.10)$$

Cette relation donnant le β_{nf} du nano-fluide et distincte de celle habituellement utilisée dans les travaux sur les nano-fluides conduit.

I.3.3. Conductivité thermique

L'évaluation de la conductivité thermique est cruciale pour comprendre le comportement du transfert de chaleur dans un matériau. La première expression théorique de la conductivité thermique d'un fluide contenant des particules a été établie en 1904 par **Maxwell [67]** (équation (11)).

Les particules étudiées sont sphériques et la concentration volumique maximale des particules était de 1%. Selon **Maxwell [67]**, la conductivité thermique d'un mélange liquide/particule ne dépendrait que de la conductivité thermique de la particule, du fluide de base et de la concentration volumique des particules.

$$\frac{k_{nf}}{k_n} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\varphi}{k_p + 2k_f + (k_p - k_f)\varphi} \quad (I.11)$$

En 1962, **Hamilton et Crosser [68]** ont repris cette expression (équation I.12) pour la forme des particules, en introduisant le facteur de forme des particules noté "n".

$n = \frac{3}{\psi}$ avec les ψ est la sphéricité de particule (pour des particules cylindriques $\psi = 0,5$ et pour les particules sphérique $\psi = 1$)

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{\frac{k_p}{k_f} + (n-1) - (n-1)\left(1 - \frac{k_p}{k_f}\right)}{\frac{k_p}{k_f} + (n-1) + \left(1 - \frac{k_p}{k_f}\right)\varphi} \quad (I.12)$$

I.4. Les échangeurs de chaleurs

I.4.1. Les échangeurs de chaleurs sans les nanoparticules

Un échangeur de chaleur est un appareil conçu pour transférer de la chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid. Les deux fluides n'échangent pas de manière directe, mais le fluide chaud cède une partie de sa chaleur au fluide froid à travers une paroi de séparation appelée "surface d'échange". Il n'y a pas de mélange direct entre les deux fluides. La principale caractéristique d'un échangeur est donc la surface de la paroi qui sépare les deux fluides et à travers laquelle le transfert de chaleur s'effectue.

I.4.2. Quelques types d'échangeur de chaleur

Il existe différents classements des échangeurs de chaleur en fonction des critères utilisés. Le classement peut être envisagé en fonction de:

❖ La configuration de l'écoulement :

- Échangeurs à co-courant : les deux fluides s'écoulent dans la même direction.
- Échangeurs à contre-courant : les fluides s'écoulent dans des directions opposées, ce qui maximise le transfert de chaleur.
- Échangeurs à flux croisés : les fluides s'écoulent perpendiculairement les uns aux autres.

❖ Le type de surface d'échange :

- Échangeurs à surface plane : utilisent des plaques planes pour transférer la chaleur.
- Échangeurs à surface tubulaire : utilisent des tubes pour séparer les fluides et transférer la chaleur.
- Échangeurs à ailettes : augmentent la surface d'échange de chaleur grâce à des ailettes fixées aux plaques ou aux tubes.

❖ Le mouvement des fluides :

- Échangeurs à circulation forcée : utilisent des pompes ou des ventilateurs pour faire circuler les fluides.
- Échangeurs à circulation naturelle : utilisent les différences de densité pour faire circuler les fluides.

Chaque type d'échangeur de chaleur a ses propres avantages et inconvénients, et le choix dépend des spécificités de l'application, des propriétés des fluides, et des conditions de fonctionnement.

I.5. Les échangeurs de chaleurs avec les nanoparticules

Bouselsal et al [69] ont étudié l'effet des nano-fluides dans la performance des échangeurs de chaleur, leur résultats montrent que l'utilisation d'un fluide conventionnel et un nano-fluide dans un échangeur de chaleur peut être conclu ainsi :

- Le transfert de chaleur croît avec la croissance de la fraction volumique du nano-fluide.
- L'échangeur de chaleur est plus performant lorsqu'on utilise du nano-fluide.

D'autres études ont montré que l'ajout de nanoparticules à une matrice liquide porteur peut augmenter le transfert de chaleur par rapport à un fluide assemblé pur, ou que les nano-fluides hybrides ont des propriétés physiques et chimiques particulières telles qu'une conductivité thermique élevée [70-74].

Conclusion

Ce premier chapitre a fourni une vue d'ensemble essentielle des nano-fluides et de leurs applications potentielles. Nous avons mis en évidence les propriétés uniques des nano-fluides, notamment leur capacité à améliorer le transfert thermique grâce à l'ajout de nanoparticules. Les diverses méthodes de préparation et de stabilisation des nano-fluides ont

été abordées, soulignant les défis et les solutions possibles pour garantir leur efficacité et leur stabilité dans des applications pratiques. Nous avons également exploré les échangeurs de chaleur, en comparant les performances des systèmes traditionnels avec ceux améliorés par l'utilisation de nano-fluides. Ces éléments sont cruciaux pour comprendre comment les nano-fluides interagissent avec des structures complexes et pour identifier les facteurs qui influencent leur performance.

Les connaissances acquises ici serviront de fondation pour les chapitres suivants, où nous approfondirons l'analyse du phénomène thermique spécifique et de performance de système utilisant le nano-fluide hybride Al_2O_3 dans une cavité en zigzag.

Introduction

Dans ce deuxième chapitre de notre étude sur l'effet thermique des nanoparticules dans une cavité en zigzag, nous nous concentrerons sur la description détaillée de la géométrie de la cavité ainsi que sur les modèles mathématiques utilisés pour analyser les phénomènes thermiques. La complexité de la cavité en zigzag, nécessite une modélisation précise afin de capturer les interactions thermiques et fluidiques des nanoparticules. Ce chapitre commencera par une définition rigoureuse de la géométrie étudiée, suivie de la formulation des équations régissant le transfert de chaleur et la dynamique des fluides dans ce contexte particulier. L'accent sera mis sur les hypothèses simplificatrices pour résoudre ces équations. Cette approche permettra de poser des bases solides pour l'analyse des résultats et l'interprétation des effets thermiques observés dans les chapitres suivants.

II.1. Géométrie et modèle mathématique

II.1.1. Géométrie

Nous avons utilisé le logiciel **Comsol Multiphysics** utilisant la méthode d'élément fini pour confectionner notre modèle physique (géométrie) de cavité en zigzag (en 2D). Les nanoparticules $Al_2O_3 - MgO$ interagissent avec l'eau considérée comme fluide de base dans la cavité en zigzag.

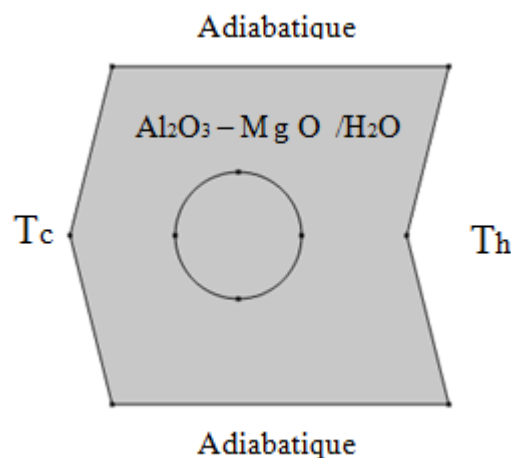


Fig. II.1. : Modélisation de notre cavité en zigzag en 2D

II.2. Modèle mathématique

II.2.1. Formulation du problème

Nous avons formalisé le problème comme illustré la figure 4. Les parois horizontales à savoir : supérieure et inférieure, sont supposées adiabatiques. La paroi en zigzag droite est chauffée à une température T_h , tandis que la paroi en zigzag gauche est à une température T_c tel que $T_c < T_h$.

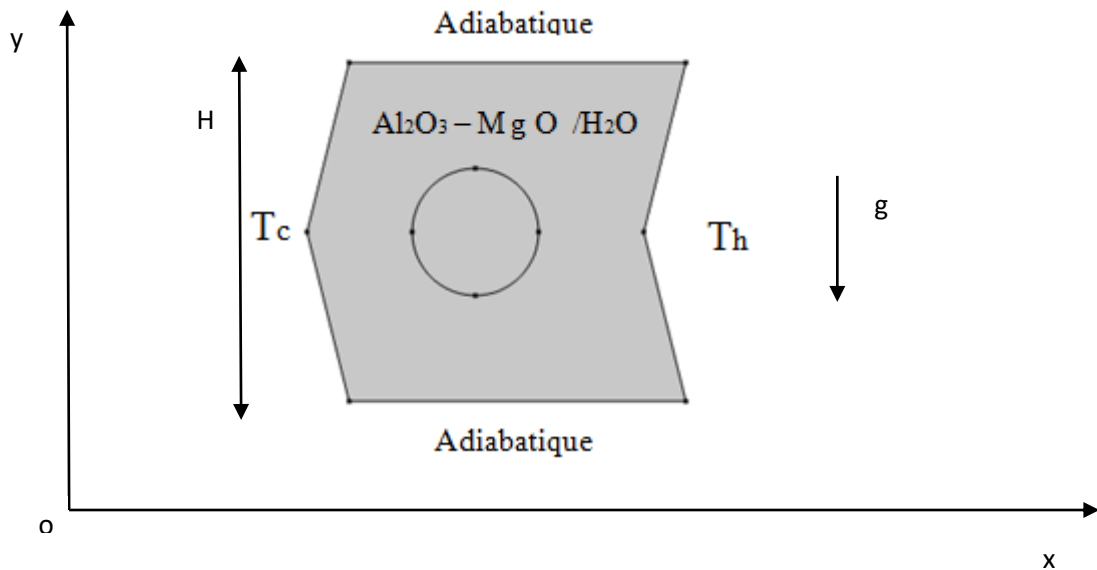


Fig. II.2. : Formalisation du problème

Pour simplifier les équations, nous allons poser certaines hypothèses :

- Le nano-fluide hybride $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO/eau}$ est considéré comme newtonien et incompressible.
- L'écoulement est supposé laminaire et bidimensionnel.
- Il n'y a ni sources ni puits de chaleur dans la cavité en zigzag.
- L'approximation de Boussinesq est adoptée pour la densité du nano-fluide hybride $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO/eau}$, ce qui signifie que la densité est considérée comme constante (égale à sa valeur de référence) dans tous les termes des équations de transfert, à l'exception du terme gravitationnel, où elle est traitée comme une variable en fonction de la température et s'exprime de la manière suivante:

$$(\rho_{nf} - \rho_0) = -\rho_0 g \beta_{nf} (T - T_0) \quad (\text{II.1})$$

- Les propriétés physiques du nano-fluide Hybride $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO/eau}$ sont considérées comme constantes.
- Les nanoparticules $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ et le fluide de base H_2O sont en équilibre thermique.
- La puissance volumique dissipée est considéré négligeable.
- Le flux de dissipation visqueuse de la chaleur est également considéré négligeable.
- Il n'y a pas d'échange par rayonnement au sein du fluide H_2O .
- Modèle monophasé : Bien que le nano-fluide hybride $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO/eau}$ soit un mélange solide-liquide, l'approche classique adoptée dans la majorité des études sur la convection naturelle traite les nano-fluides comme une seule phase homogène.
- En supposant un équilibre thermique local, le mélange solide-liquide des particules peut être approximé comme un fluide monophasique classique, avec des propriétés évaluées en fonction de celles des composants.
- En raison de la taille extrêmement petite et de la faible concentration des nanoparticules en suspension, il est supposé que les particules se déplacent à la même vitesse que le fluide.

II.2.2. Les équations

En tenant compte des hypothèses de simplification mentionnées, les équations générales régissant l'écoulement de convection naturelle laminaire dans la cavité en zigzag, exprimées dans le système de coordonnées cartésiennes, sont les suivantes:

II.2.2.1. Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.2})$$

II.2.2.2. Equation de quantité de mouvement

- Suivant x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left[\frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} \right] = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu_{nf} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad (\text{II.3})$$

- Suivant y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left[\frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} \right] = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu_{nf} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + (T - T_1) \frac{g(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} \quad (\text{II.4})$$

II.2.2.3. Equation d'énergie

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left[\frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} \right] = \alpha_{nf} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] \quad (\text{II.5})$$

- Cas du nano-fluide hybride (Al_2O_3 $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$)

$$\varphi = \varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \varphi_{\text{MgO}} \quad (\text{II.6})$$

$$\rho_{np} = \frac{\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \varphi_{\text{MgO}} \rho_{\text{MgO}}}{\varphi} \quad (\text{II.7})$$

$$(C_p)_{np} = \frac{\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} (C_p)_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \varphi_{\text{MgO}} (C_p)_{\text{MgO}}}{\varphi} \quad (\text{II.8})$$

$$\beta_{np} = \frac{\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} \beta_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \varphi_{\text{MgO}} \beta_{\text{MgO}}}{\varphi} \quad (\text{II.9})$$

$$k_{np} = \frac{\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} k_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \varphi_{\text{MgO}} k_{\text{MgO}}}{\varphi} \quad (\text{II.10})$$

$$\sigma_{np} = \frac{\varphi_{Al_2O_3} \sigma_{Al_2O_3} + \varphi_{MgO} \sigma_{MgO}}{\varphi} \quad (\text{II.11})$$

Nous avons :

$$\sigma_{hnf} = (1 - \varphi) \sigma_{bf} + \varphi \sigma_{np} \quad (\text{II.12})$$

$$\rho_{hnf} = (1 - \varphi) \rho_{bf} + \varphi \rho_{np} \quad (\text{II.13})$$

$$(\rho\beta)_{hnf} = (1 - \varphi) (\rho\beta)_{bf} + \varphi (\rho\beta)_{np} \quad (\text{II.14})$$

$$(\rho C_p)_{hnf} = (1 - \varphi) (\rho C_p)_{bf} + \varphi (\rho C_p)_{np} \quad (\text{II.15})$$

$$\alpha_{hnf} = \frac{k_{hnf}}{(\rho C_p)_{hnf}} \quad (\text{II.16})$$

$$\frac{k_{hnf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)(k_{bf} - k_{np})\varphi}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + (k_{bf} - k_{np})\varphi} \quad (\text{II.17})$$

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_{bf}}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (\text{II.18})$$

$$\frac{\sigma_{hnf}}{\sigma_{bf}} = 1 + \frac{3(\sigma_{np} - \sigma_{bf})\Phi}{(\sigma_{np} + 2\sigma_{bf}) - (\sigma_{np} - \sigma_{bf})\Phi} \quad (\text{II.19})$$

Ceci est notre description mathématique du nano-fluide hybride Al_2O_3 -MgO/eau dans la cavité en zigzag.

II.2.2.4 Conditions initiales

Nous avons :

$$0 < x < H ; 0 < y < H \quad \text{Et} \quad T = 0$$

$$u = v = \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.20})$$

$$\omega = 0 \quad (\text{II.21})$$

II.2.2.5 Conditions aux limites dimensionnelles

Nous avons suivant l'axe oy :

$$0 < y < H$$

$$x = 0 ; u = v = 0 ; T = T_c$$

$$x = H ; u = v = 0 ; T = T_c$$

Nous avons suivant l'axe ox :

$$0 < x < H ;$$

$$y = 0 ; u = 0 ; v = 0 ; T = T_h$$

$$y = H ; u = 0 ; v = 0 ; \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_H = 0$$

II.2.2.6 Calcul du nombre de Nusselt

D'une manière générale, le nombre de Nusselt est le rapport entre le transfert de chaleur convectif et le transfert de chaleur conductif à travers une couche de fluide. En d'autres termes, il mesure l'efficacité de la convection par rapport à la conduction dans un transfert de chaleur. Il est définie par :

$$Nu = \frac{hH}{k} \quad (\text{II.22})$$

- **Locale**

Le nombre de Nusselt locale á chaque point d'une surface est définie par :

$$Nu_x = \frac{hx}{k} \quad (\text{II.23})$$

Dans notre étude le nombre de Nusselt locale pour la paroi droite en zigzag chaude est définie par la relation suivante :

$$Nux = \left(-\frac{k_{nf}}{k} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (\text{II.24})$$

- **Moyen**

Le nombre de Nusselt locale pour la paroi droite en zigzag chaude est défini par la relation suivante :

$$Nu_{moy} = \frac{\sum_{nœud} Nu}{\text{Nombre des nœuds}} \quad (\text{II.25})$$

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la construction et la formalisation du modèle physique et mathématique pour l'étude de l'effet thermique des nanoparticules dans une cavité en zigzag. En utilisant le logiciel Comsol Multiphysics utilisant la méthode des éléments finis, nous avons développé un modèle en deux dimensions qui représente fidèlement la géométrie de la cavité étudiée. Nous avons défini les conditions aux limites spécifiques à notre problème : les parois horizontales (supérieure et inférieure) sont supposées adiabatiques, tandis que la paroi en zigzag droite est maintenue à une température élevée T_h et la paroi en zigzag gauche à une température plus basse T_c ($T_c < T_h$). Ces conditions créent un gradient thermique essentiel pour l'étude des effets thermiques des nanoparticules. Pour simplifier les équations de mouvement et d'énergie, nous avons fait des hypothèses appropriées qui permettent de réduire la complexité mathématique tout en conservant la pertinence physique du modèle. La résolution de ces équations nous a permis de caractériser le comportement thermique de la cavité en présence de nanoparticules. Enfin, la validation de notre modèle a été réalisée en le comparant avec des études antérieures. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec les travaux existants, confirmant la fiabilité et l'exactitude de notre approche modélisée. Ainsi, ce chapitre a permis d'établir une base solide pour l'étude des effets thermiques des nanoparticules dans une cavité en zigzag, en combinant une modélisation géométrique rigoureuse et des formulations mathématiques validées. Ces éléments constituent le socle indispensable pour les analyses et les résultats présentés dans le chapitre suivant du mémoire.

Introduction

Ce chapitre se consacre à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus sur l'effet thermique des nanoparticules dans une cavité en zigzag. Grâce à la simulation effectuée avec le logiciel **COMSOL Multiphysics**, nous avons pu étudier en détail les lignes de courant, les lignes isothermes et les lignes entropiques dans diverses zones de la cavité. Ces résultats offrent une vision approfondie des dynamiques thermiques et fluidiques, permettant de comprendre comment les nanoparticules influencent la distribution de la chaleur et l'efficacité du transfert thermique. La discussion portera sur l'interprétation des configurations les plus optimales pour un contrôle thermique précis et efficace. Le but de cette études est d'étudier l'effet thermique de la nature des nano-fluides hybrides en considérants des paramètres tel que la fraction volumique des nanoparticules et la variation du nombre de Rayleigh. Enfin, ce chapitre met en évidence les avantages et les défis de l'utilisation des simulations numériques pour l'étude des phénomènes thermiques à l'échelle nanométrique et propose des perspectives pour des travaux futurs.

III.1. Effet du Maillage

L'effet du maillage ci-dessous de notre géométrie a été réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics.

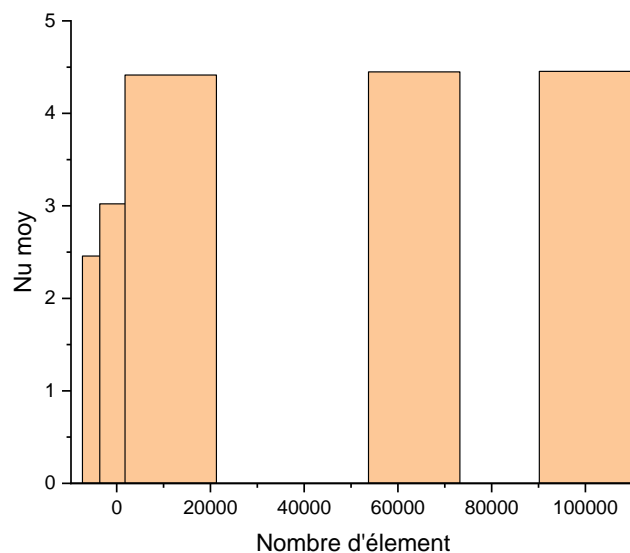


Fig. III.1 : variation de nombre de Nu moyen en fonction de nombre d'élément.

Le graphique montre plusieurs résolutions de maillage, allant de 0 (cas très grossier) à des résolutions plus fines jusqu'à 10^6 éléments. D'après le graphique, on peut conclure que pour des simulations de l'effet thermique des nanoparticules dans notre cavité en zigzag, un maillage d'au moins 50000 éléments est nécessaire pour obtenir des résultats convergents et

précis. Au-delà de ce seuil, augmenter la résolution du maillage n'apporte pas de gains significatifs en précision, ce qui permet d'optimiser les ressources computationnelles.

III.2. Résultats et discussion

III.2.1. les premiers résultats

III.2.1.1. lignes de courant, lignes isothermes et lignes entropiques

Ces premiers résultats ont été obtenue en faisant varié le nombre de Rayleigh $Ra=10^4$; $Ra=10^5$; $Ra=10^6$ pour des valeurs de $\varphi=0.01$; $\varphi=0.02$; $\varphi=0.03$; $\varphi=0.04$. L'objectif de cette étude est de voir l'effet de la fraction volumique φ du nanofluide hybride Al_2O_3 - MgO /eau et du nombre de Rayleigh dans notre cavité en zigzag.

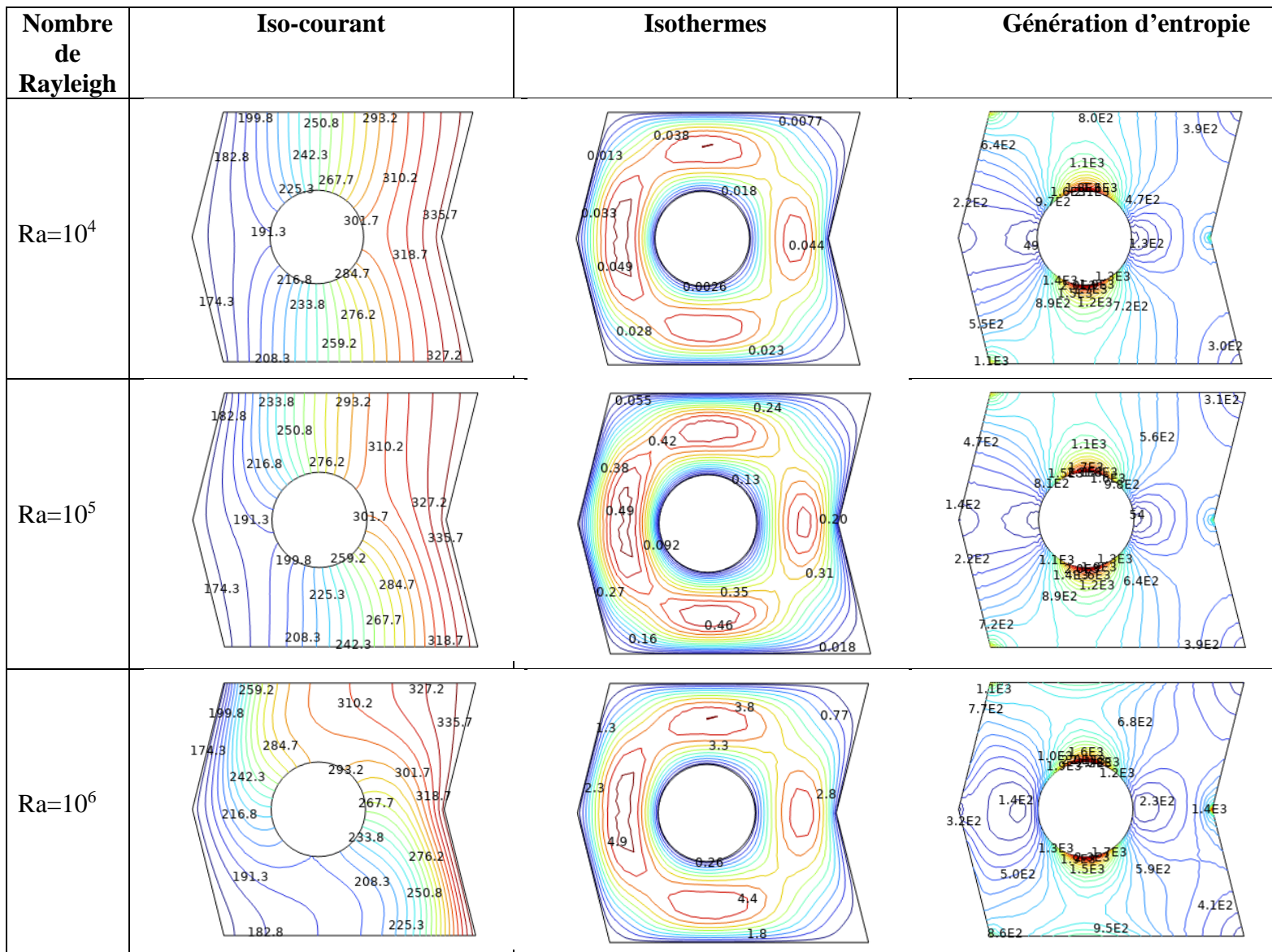


Fig. III.2. : Lignes de courant, lignes isothermes et lignes entropique pour le nano-fluide hybride Al_2O_3 - MgO /eau.

- **Iso-courant**

Les figures montrent l'effet du nombre de Rayleigh Ra sur les lignes de courant et la distribution de la température du nano-fluide hybride Al_2O_3 - MgO /eau pour différent fraction volumique φ compris entre 0.01 à 0.04. Les vitesses de circulation sont presque les mêmes lorsque $Ra=10^4$ et $Ra=10^5$, on remarque juste une petite déformation pré du cylindre de la cavité. Tandis que lorsque $Ra=10^6$ l'influence du nombre de Rayleigh pour cette valeur devient nettement différent que les deux autre valeurs.

- **Isothermes**

Les figures montrent tout d'abord que la vitesse de circulation augmente avec l'augmentation de la fraction volumique. On remarque que l'effet du nombre Rayleigh sont quasiment les mêmes pour $Ra=10^4$ et $Ra=10^6$. Cependant lorsque Ra a pour valeur 10^5 l'allure des isothermes sont carrément différent.

- **Génération d'entropie**

On constate d'après les figures que la production d'entropie est trop petite pour les valeurs de φ plus faible qui croit du centre aux parois de la cavité. On remarque également l'allure de la génération entropique sont presque les mêmes pour $Ra=10^4$ et 10^5 , mais $Ra=10^6$ on obtient une déformation remarquable pour $\varphi =0.03$ et $\varphi =0.04$.

III.2.1.2. Variation du nombre de Nusselt Moyen

La Figure ci-dessous présente la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh pour le nano-fluide hybride Al_2O_3 - MgO /eau. Les résultats sont présentés pour le cas de $\varphi=0.01$; $\varphi= 0.02$; $\varphi=0.03$; $\varphi=0.04$. On constate que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de nombre de Rayleigh.

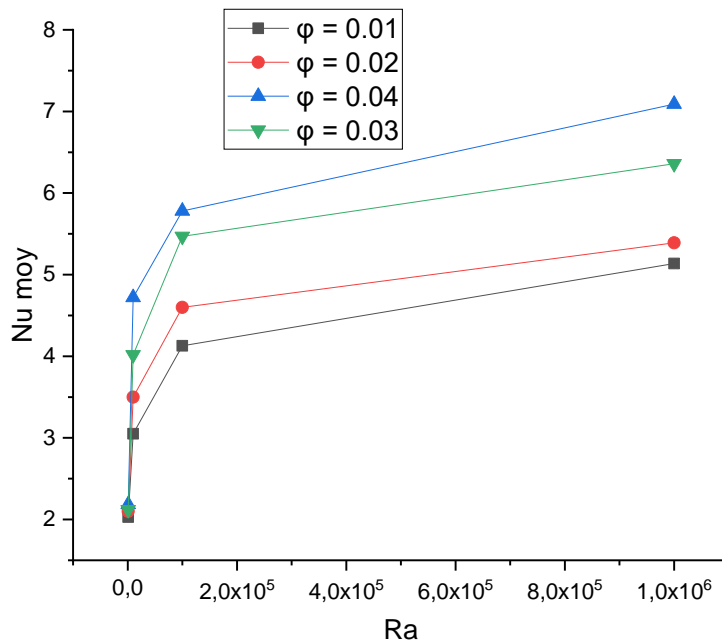


Fig. III.3. : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes valeurs de ϕ .

On observe qu'à des nombres de Rayleigh plus bas, l'augmentation de Nu est plus remarquable avec l'augmentation de Ra et la différence entre les courbes de différentes valeurs de ϕ est plus marquée. Par exemple, $\phi = 0.04$ montre un Nu significativement plus élevé que $\phi = 0.01$. Lorsque $10^4 < Ra < 10^5$, Nu continue d'augmenter avec Ra, mais le taux de cette augmentation diminue comparativement aux faibles valeurs de Ra. Et lorsque $Ra > 10^5$ les courbes de Nu semblent se rapprocher d'un plateau, indiquant que l'augmentation de Ra au-delà d'un certain point n'améliore pas significativement Nu. Et la différence entre les courbes pour différentes valeurs de ϕ diminue, mais $\phi=0.04$ reste supérieur aux autres fractions volumiques. L'interprétation de la courbe peut se faire de manière suivante :

❖ **Influence du nombre de Rayleigh :**

- Le nombre de Nusselt moyen augmente avec le nombre de Rayleigh, ce qui est attendu puisque Ra représente la force de convection thermique. Une plus grande valeur de Ra signifie une convection plus forte et donc un meilleur transfert de chaleur.

❖ **Influence de la fraction volumique (ϕ) :**

- Une augmentation de la fraction volumique de nanoparticules améliore le transfert de chaleur pour une valeur donnée de Ra.

❖ **Effet Combiné :**

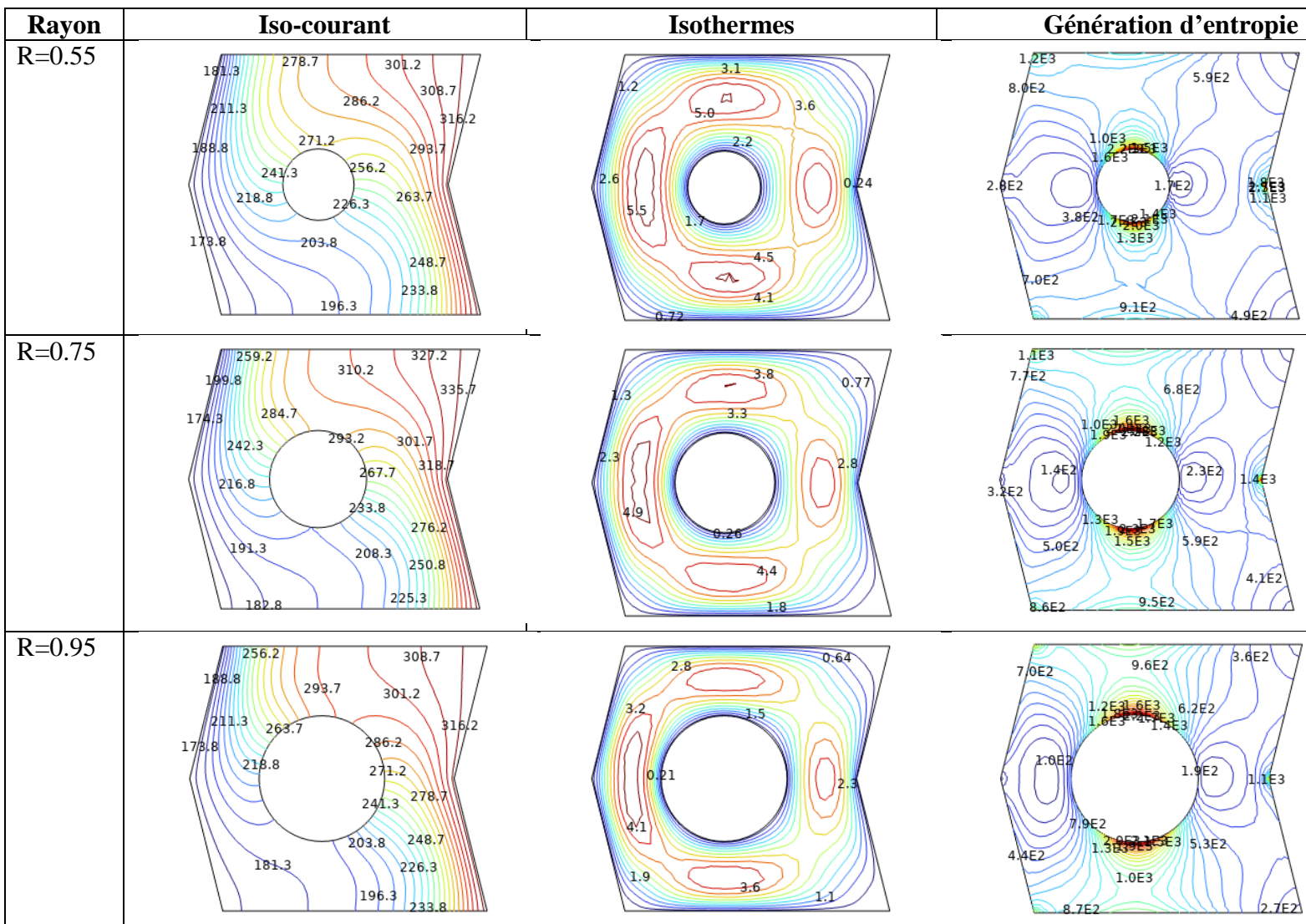
- La combinaison d'une grande fraction volumique (ϕ) et d'un nombre élevé de Rayleigh (Ra) optimise le transfert de chaleur par convection dans la cavité en zigzag.

Ces résultats montrent l'importance de considérer à la fois le nombre de Rayleigh et la fraction volumique des nanoparticules pour maximiser l'efficacité du transfert de chaleur dans des systèmes de convection naturelle.

III.2.2. Les seconds résultats

III.2.2.1. lignes de courant, lignes isothermes et lignes entropiques

Elles ont été obtenues en faisant varier les valeurs du nombre de Rayleigh Ra et celui du rayon R.



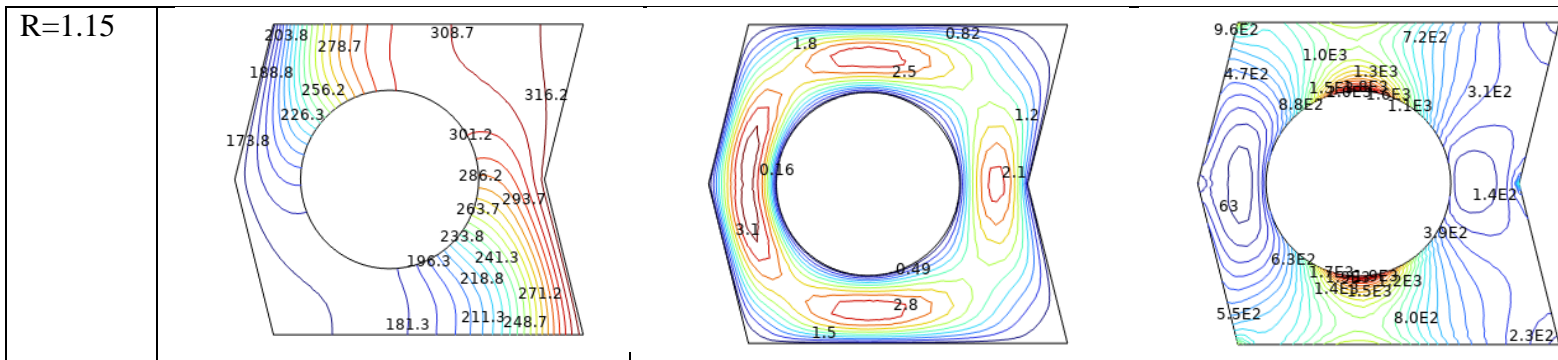


Fig. III.4. : iso-courant, isothermes et entropie par variation du Rayons R.

- **Iso-courant**

On Remarque que les allures des lignes du courant sont différentes pour chaque variation du rayon du cylindre. A chaque fois que le rayon augmente, nous avons une déformation significatif des contours des vitesses.

- **Isothermes**

Les lignes isothermes sont également dans une situation où la variation du rayon influence grandement leurs allures. On remarque que la vitesse de circulation diminue à chaque fois que le rayon augmente. On constate également que les contours des vitesses ne sont pas les mêmes près de chaque paroi de la cavité.

- **Génération d'entropie**

Nous remarquons aussi que la génération d'entropie est grandement influencée par les variations du rayon du cylindre. Les vitesses des circulations on une forme aléatoire du côté de la paroi en zigzag droit, tandis qu'au niveau de la paroi en zigzag gauche la circulation á un forme qui pourrait être définie.

III.2.2.2. Variation du nombre de Nusselt moyen

La Figure ci-dessous présente la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh pour le nano-fluide hybride Al_2O_3 - MgO /eau. Les résultats sont présentés pour le cas de $R=0.55$; $R= 0.75$; $R=0.95$; $R=1.15$. On constate que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de nombre de Rayleigh et la variation du rayon R influence le transfert thermique.

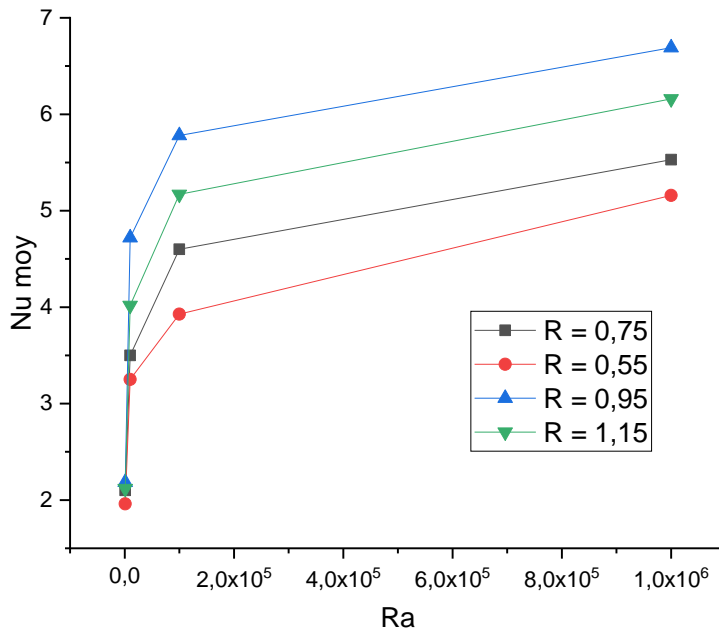


Fig. III.5. : Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes valeurs de R.

On remarque que pour toutes les valeurs de R (0,55, 0,75, 0,95, 1,15), on observe une augmentation du nombre de Nusselt moyen à mesure que le nombre de Rayleigh augmente. Cela s'explique par le fait qu'un nombre de Rayleigh plus élevé correspond à une plus grande différence de température, ce qui intensifie la convection naturelle et donc le transfert de chaleur. De même pour un nombre de Rayleigh donné, le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation du rayon du cylindre. Par exemple, pour un $Ra=10^5$, la courbe avec $R=1,15$ a le nombre de Nusselt le plus élevé, suivie par $R=0,95$, $R=0,75$, et $R=0,55$. Cela indique que des cylindres de plus grand rayon améliorent le transfert de chaleur dans la cavité contenant des nanoparticules en convection naturelle. Un cylindre de plus grand rayon peut perturber davantage le flux de convection, augmentant ainsi le transfert thermique global.

Compte tenu de ces observations, nous avons pour :

❖ **R=0,55 :**

- La courbe rouge montre une faible augmentation du nombre de Nusselt avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, indiquant une efficacité de transfert de chaleur relativement faible pour les petits rayons.

❖ **R=0,75 :**

- La courbe noire montre une meilleure performance par rapport à $R=0,55$, mais reste inférieure aux valeurs plus élevées de R.

❖ R=0,95 :

- La courbe bleue indique une augmentation notable de l'efficacité de transfert thermique, avec des valeurs de Nusselt nettement plus élevées que celles pour les rayons plus petits.

❖ R=1,15 :

- La courbe verte montre la plus grande augmentation du nombre de Nusselt pour tous les nombres de Rayleigh, suggérant que le plus grand rayon maximise l'efficacité du transfert de chaleur.

En conclusion, l'augmentation du rayon du cylindre dans la cavité en zigzag contenant des nanoparticules en convection naturelle améliore significativement le nombre de Nusselt moyen, et donc l'efficacité du transfert de chaleur. Cette observation est importante pour la conception de systèmes de refroidissement et de chauffage utilisant des nanoparticules et des géométries de la cavité en zigzag étudié.

Conclusion générale

Notre étude sur l'effet thermique des nanoparticules dans une cavité en zigzag met en évidence l'importance des nano-fluides hybrides et de leur utilisation dans la gestion thermique des systèmes. Le premier chapitre a présenté une vue d'ensemble des nano-fluides, mettant en avant leurs propriétés uniques et leurs applications potentielles dans l'amélioration du transfert thermique. Le deuxième chapitre a développé un modèle physique et mathématique rigoureux du nano-fluide hybride $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO/eau}$ pour étudier l'effet thermique des nanoparticules dans une cavité en zigzag, démontrant la fiabilité et l'exactitude de l'approche modélisée. Enfin, le troisième chapitre a analysé les résultats de simulation pour comprendre les dynamiques thermiques et fluidiques dans la cavité en zigzag, mettant en lumière l'impact significatif des paramètres tels que le nombre de Rayleigh et la fraction volumique de nanoparticules.

À l'issue de cette étude, on a trouvé que :

1. La fraction volumique et le nombre de Rayleigh sont des excellents paramètres pour étudier la convection naturelle des nanoparticules.
2. Le transfert thermique croît avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique.
3. L'augmentation du rayon du cylindre dans la cavité en zigzag contenant des nanoparticules en convection naturelle améliore l'efficacité du transfert de thermique.
4. Le transfert thermique peut être amélioré d'avantage en ayant plusieurs zigzags des parois.

Globalement, les conclusions obtenues fournissent des informations cruciales pour optimiser les performances thermiques des systèmes utilisant des nano-fluides hybrides, ouvrant la voie à une meilleure gestion thermique dans diverses applications pratiques.

Références bibliographiques

1. Claude Ostiguy (IRSST), Brigitte Roberge (IRSST), Luc Ménard (CSST), Charles-Anica Endo (Nano-Québec), Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse [archive], Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Québec, Canada, 2008 (ISBN 978-2-89631-317-4) (version imprimée) (ISBN 978-2-89631-318-1) [PDF], 73 p. (ISSN 0820-8395). Publication évaluée par des pairs.
2. <https://www.asef-asso.fr/production/les-nanoparticules-la-synthese-de-lasef/>
3. N. Putra, W. Roetzel and S.K. Das, 'Natural Convection of Nanofluids', Heat Mass Transfer, Vol. 39, pp. 775 – 784, 2003.
4. K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, 'Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids', International Journal Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 3639 - 3653, 2003.
5. S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen and W. Roetzel, 'Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids', Journal of Heat Transfer, Vol. 125, N°4, pp. 567 – 574, 2003.
6. Kwon, Y.H.; Kim, D.; Li, C.G. ;Lee, J.K. Heat transfer and pressure drop characteristics of Nanofluids in a plate heat exchanger. J. Nano Sci. Nanotechnol.2011,11,5769–5774.
7. Albadr, J.; Tayal, S.; Alasadi, M. Heat transfer through heat exchanger using Al₂O₃ nanofluid at different concentration. Case Stud. Therm. Eng. 2013, 1, 38–44.
8. Asadi, A.; Asadi, M.; Rezaniakolaei, A.; Rosendahl, L.A.; Afrand, M.; Wongwises, S. Heat transfer efficiency of Al₂O₃- MWCNT/ thermal oil hybrid nanofluids as a cooling fluid in thermal and energy management applications: An experimental and theoretical investigation. Int. J. Heat Mass Transf. 2018,117,474–486.
9. Ghazanfari, V.; Imani, M.; Shadman, M.M.; Amini, Y.; Zahakifar, F. Numerical study on the thermal performance of the shell and tube heat exchanger using twisted tubes and Al₂O₃ nanoparticles. Prog. Nucl. Energy 2023,155,104526.
10. F. Mebarek-Oudina, Transfert de chaleur par convection de nanofluides Titania de différents fluides de base dans un anneau cylindrique avec source de chaleur discrète, Heat Transfer-Asian Research, 48(2019) 135-147. <https://doi.org/10.1002/htj.21375>
11. J. Raza, F. Mebarek-Oudina et B. Mahanthesh, Flux magnétohydrodynamique de fluide Nano Williamson généré par étirement de plaque avec plusieurs glissements", Modélisation multidisciplinaire des matériaux et des structures, 15 (5) (2019) 871-894. <https://doi.org/10.1108/MMMS-11-2018-0183>
12. F. Mebarek-Oudina, N. Keerthi Reddy et M. Sankar, Effets de l'emplacement de la source de chaleur sur la convection flottante des nanofluides dans un anneau, Advances in Fluid Dynamics, Notes de cours en génie mécanique, pp. 923-937, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4308-1_70
13. PK Dadheech, P. Agrawal, F. Mebarek-Oudina, N. Abu-Hamdeh, A. Sharma, Analyse comparative du transfert de chaleur de MoS₂ / C₂H₆O₂ et MoS₂ -

- SiO₂ / C₂H₆ Nanofluides O₂ avec convection naturelle et champ magnétique incliné, *Journal of Nanofluids*, 9 (3) 161-167, 20 20, <https://doi.org/10.1166/jon.2020.1741>
14. BV Pushpa, M. Sankar, F. Mebarek-Oudina, Flux convectif flottant et dissipation thermique de nanoliquides Cu-H₂O dans un anneau à travers un mince déflecteur, *Journal of Nanofluids*, 10 (2) (2021) 292-304 ; <https://doi.org/10.1166/jon.2021.1782>
 15. K. Dhif, F. Mebarek-Oudina, S. Chouf, H. Vaidya et Ali J. Chamkha, Analyse thermique du système de stockage de sperme de collecteur solaire à l'aide de nanofluides hybrides, *Journal of Nanofluids*, 10 (4), (2021) 634-644 ; <https://doi.org/10.1166/jon.2021.1807>
 16. KV Prasad, C. Rajashekhar, F. Mebarek-Oudina, IL Animasaun, OD Makinde, K. Vajravelu, Hanumesh Vaidya, DL Mahendra, Flux convectif magnétohydrodynamique instable d'un nanoliquide via une zone de Riga étirée radialement via la méthode d'analyse d'homotopie optimale, *Journal of Nanofluides*, 11, (1), 2022, 84-98. <https://doi.org/10.1166/jon.2022.1818>
 17. Chabani, I., Mebarek Oudina, F., Ismail, AI MHD Flux d'un nano-fluide hybride dans une enceinte triangulaire avec des zigzags et un obstacle elliptique, *Micromachines*, 13 (2), 224, 2022. <https://doi.org/10.3390/mi13020224>
 18. Asogwa, K., Mebarek-Oudina, F. et Animasaun, I., Enquête comparative sur les nanoparticules d'Al₂O₃ à base d'eau via des nanoparticules de CuO à base d'eau sur une surface de plaque de Riga radiative à accélération exponentielle via le transport de chaleur, *Arabian Journal for Science et l'ingénierie*, 47 (7), 8721-8738, 2022, <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06355-3>
 19. Mebarek Oudina, F. & Chabani, I., Revue sur les applications des nano-fluides et les techniques d'amélioration du transfert de chaleur dans différentes enceintes, *Journal of Nanofluids*, 11(2), 155-168, 2022. <https://doi.org/10.1166 /jon.2022.1834>
 20. S. Marzougui, F. Mebarek-Oudina, A. Mchirgui et M. Magherbi, Génération d'entropie et transport de chaleur de nanoliquides Cu-eau dans une cavité poreuse entraînée par un couvercle à travers un champ magnétique , *Journal international des méthodes numériques pour la chaleur et les flux de fluides*, 32 (6), 2022, 2047-2069. <https://doi.org/10.1108/HFF-04-2021-0288>
 21. Eastman, J., et al. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. in *MRS proceedings*. 1996. Cambridge Univ Press.
 22. Lee, S., et al., Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *Journal of Heat transfer*, 1999. 121(2): p. 280-289.
 23. Choi, S.U. and J.A. Eastman, Enhanced heat transfer using nanofluids. 2001, Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, IL.
 24. Choi, S., et al., Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Applied physics letters*, 2001. 79(14): p. 2252-2254.
 25. Choi, S., Nanofluids could help open door to advanced truck designs. *TransForum Research Review*, 2002 3(4), 5.
 26. Zhu, H.-t., Y.-s. Lin, and Y.-s. Yin, A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. *Journal of colloid and interface science*, 2004. 277(1): p. 100-103.

27. Li, Q. and Y. Xuan, Experimental investigation on transport properties of nanofluids. *Heat transfer science and technology*, 2000. 2000: p. 757-762.
28. Gleiter, H., Nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 1989. 33(4): p. 223-315.
29. Ashley, S., Small-scale structure yields big property payoffs. *Mechanical Engineering*, 1994. 116(2): p. 52.
30. Bowles, R., et al., Generation of molecular clusters of controlled size. *Surface Science*, 1981. 106(1): p. 117-124.
31. Iijima, S., Helical microtubules of graphitic carbon. *nature*, 1991. 354(6348): p. 56-58.
32. Scott, C.D., et al., Growth mechanisms for single-wall carbon nanotubes in a laser-ablation process. *Applied Physics A*, 2001. 72(5): p. 573-580.
33. Hernadi, K., Catalytic synthesis of multiwall carbon nanotubes from methylacetylene. *Chemical physics letters*, 2002. 363(1): p. 169-174. [24]. Pan, Z., et al., Direct growth of aligned open carbon nanotubes by chemical vapor deposition. *Chemical Physics Letters*, 1999. 299(1): p. 97-102.
34. Pan, Z., et al., Direct growth of aligned open carbon nanotubes by chemical vapor deposition. *Chemical Physics Letters*, 1999. 299(1): p. 97-102.
35. Yatsuya, S., et al., Preparation of extremely fine particles by vacuum evaporation onto a running oil substrate. *Journal of Crystal Growth*, 1978. 45: p. 490-494.
36. J.A. Eastman, et al., Novel Thermal Properties of Nanostructured Materials, *Materials Science Forum*, 1999. 312-314, p. 629-634.
37. Wang, X., X. Xu, and S.U. S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 1999. 13(4): p. 474-480.
38. Esumi, K., et al., Chemical treatment of carbon nanotubes. *Carbon*, 1996. 34(2): p. 279-281.
39. Shaffer, M. and A. Windle, Analogies between polymer solutions and carbon nanotube dispersions. *Macromolecules*, 1999. 32(20): p. 6864-6866.
40. Hirai, H. and N. Yakura, Protecting polymers in suspension of metal nanoparticles. *Polymers for Advanced Technologies*, 2001. 12(11-12): p. 724-733.
41. Bandyopadhyaya, R., et al., Stabilization of individual carbon nanotubes in aqueous solutions. *Nano Letters*, 2002. 2(1): p. 25-28.
42. Choi, S.U., et al. Nanofluids can take the heat. in *DOE/BES Symposium on Energy Engineering Sciences*. 2002. Citeseer.
43. Kinloch, I.A., S.A. Roberts, and A.H. Windle, A rheological study of concentrated aqueous nanotube dispersions. *Polymer*, 2002. 43(26): p. 7483-7491.
44. Li, Q. and Y. Xuan, Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid. *Science in China Series E: Technological Science*, 2002. 45(4): p. 408-416.
45. Putra, N. Heat transfer in dispersed media. University der Bundeswehr, Hamburg. PhD Dissertation, 2002. [36]. Saito, T., K. Matsushige, and K. Tanaka, Chemical treatment and modification of multi-walled carbon nanotubes. *Physica B: Condensed Matter*, 2002. 323(1): p. 280-283.
46. Saito, T., K. Matsushige, and K. Tanaka, Chemical treatment and modification of multi-walled carbon nanotubes. *Physica B: Condensed Matter*, 2002. 323(1): p. 280-283.

47. Xie, H., et al., Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *Journal of Applied Physics*, 2002. 91(7): p. 4568-4572.
48. Yerushalmi-Rozen, R., and Regev, O. Method for the preparation of stable suspensions and powders of single carbon nanotubes. *International Patent*, 2002. WO 02076888A1.
49. Islam, M., et al., High weight fraction surfactant solubilization of single-wall carbon nanotubes in water. *Nano letters*, 2003. 3(2): p. 269-273.
50. Jiang, L., L. Gao, and J. Sun, Production of aqueous colloidal dispersions of carbon nanotubes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003. 260(1): p. 89-94.
51. Xie, H., et al., Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. *Journal of Applied Physics*, 2003. 94(8): p. 4967-4971.
52. Assael, M., et al., Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water. *International Journal of Thermophysics*, 2004. 25(4): p. 971-985.
53. Wen, D. and Y. Ding, Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids). *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2004. 18(4): p. 481-485.
54. Lin-Gibson, S., et al., Elastic flow instability in nanotube suspensions. *Physical review letters*, 2004. 92(4): p. 048302.
55. Bang, I.C. and S.H. Chang, Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nanofluids from a plain surface in a pool. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005. 48(12): p. 2407-2419.
56. Bönnemann, H., et al., Monodisperse copper-and silver-nanocolloids suitable for heat-conductive fluids. *Applied organometallic chemistry*, 2005. 19(6): p. 768-773.
57. Manna, I., M. Chopkar, and P. Das, Nanofluid-A new concept in heat transfer and thermal management. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2005. 58(6): p. 1045-1055.
58. Wang, X., et al., Nanofluids in carbon nanotubes using supercritical CO₂: a first step towards a nanochemical reaction. *Applied Physics A*, 2005. 80(3): p. 637-639.
59. Chopkar, M., P.K. Das, and I. Manna, Synthesis and characterization of nanofluid for advanced heat transfer applications. *Scripta Materialia*, 2006. 55(6): p. 549-552.
60. Lee, D., J.-W. Kim, and B.G. Kim, A new parameter to control heat transport in nanofluids: surface charge state of the particle in suspension. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006. 110(9): p. 4323-4328.
61. Wen, D. and Y. Ding, Natural convective heat transfer of suspensions of titanium dioxide nanoparticles (nanofluids). *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2006. 5(3): p. 220-227.
62. Pop, E., et al., Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature. *Nano letters*, 2006. 6(1): p. 96-100.
63. Zhang, S., et al., Specific heat of single-walled carbon nanotubes. *Physical Review B*, 2003. 68(7): p. 075415.
64. Abu-Nada, E., Z. Masoud, and A. Hijazi, Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008. 35(5): p. 657-665.
65. Bejan, A., *Convection heat transfer* John wiley & sons, New York, N., 3rd ed, 2004.

66. Faghri, A., Y. Zhang, and J.R. Howell, Advanced heat and mass transfer. 2010: Global Digital Press.
67. Maxwell, J.C., A treatise on electricity and magnetism. Oxford University Press, 1904. ed.
68. Hamilton, R. and O. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, 1962. 1(3): p. 187-191.
69. Bouselsal, M.; Mebarek-Oudina, F.; Biswas, N.; Ismail, A.I. Heat Transfer Enhancement Using Al₂O₃-MWCNT Hybrid-Nanofluid inside a Tube/Shell Heat Exchanger with Different Tube Shapes. *Micromachines* **2023**, *14*, 1072. <https://doi.org/10.3390/mi14051072>
- Das, D. ; Roy, M. ; Basak, T. Études sur la convection naturelle dans des enceintes de formes diverses (non carrées) – Une revue. *Int. J. Transfert de masse thermique*. 2017, 106, 356-406.
70. Teamah, MA ; Shehata, A.I. Convection naturelle magnétohydrodynamique à double diffusion dans des cavités trapézoïdales. *Alex. Ing. J.*2016, 55, 1037-1046.
71. Mebarek-Oudina, F. ; Keerthi Reddy, N. ; Sankar, M. Effets de l'emplacement de la source de chaleur sur la convection flottante des nanofluides dans un anneau. Dans *Advances in Fluid Dynamics, notes de cours en génie mécanique* ; Springer : Cham, Suisse, 2021 ; pp. 923-937.
72. Chang, BH ; Mills, A.F. Effet du rapport d'aspect sur le transfert de chaleur par convection forcée des cylindres. *Int. J. Transfert de masse thermique*. 2004, 47, 1289-1296.
73. Muthamilselvan, M. ; Sureshkumar, S. Impact du rapport d'aspect sur une enceinte poreuse saturée de nanofluides. *Mécanique. Ind.*2017, 18, 501.