

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LARECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 01**

**Faculté de Technologie  
Département de Mécanique**

**Laboratoire d'Etudes et de Recherche en Technologie Industrielle**

**Pour l'obtention du diplôme Doctorat en Mécanique**

**Spécialité : Construction Mécanique**

**THEME :**

**CONTRIBUTION AUX ETUDES THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DES  
EFFETS D'UN CHAMP MAGNETIQUE SUR L'ECOULEMENT D'UN  
NANOFLUIDE AUTOUR D'UN OBSTACLE.**

Présenté par : ROUBI Abdelhak.

Sera soutenue publiquement le 12 /02/ 2024, devant le jury composé de :

Mr./ TEMMAR	Mustapha	Professeur	U.S.D. Blida 1.	Président.
Mr./ ALLALI	Abderrazak	Professeur	U.S.D. Blida 1.	Rapporteur.
Mr./ KHELILI	Yacine	M.C.B.	Académie Cherchell.	Co.Rapporteur.
Mr./ SEMMAR	Djaffar	Professeur	U.S.D. Blida 1	Examineur.
Mr./ SAHRAOUI	Kherris	Professeur	U. Tissemsilt	Examineur.
Mr./ BENNOUD	Salim	M.C.A.	U.S.D. Blida 1.	Examineur.

Année Universitaire : 2023 /2024.

# *Remerciements*

*Je souhaite avant tout remercier mon Directeur de Thèse, le Professeur ALLALI Abderrazak, pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé.*

*L'Enseignement de qualité dispensé par formation Doctorat a également su nourrir mes réflexions et a représenté une profonde satisfaction intellectuelle, merci donc aux Enseignants-Chercheurs.*

*Un grand merci également à Docteur FARES Redouane pour avoir eu la patience de répondre à mes innombrables questions, Et m'accompagner dans la rédaction de mon article scientifique et de recherche.*

*Je ne peux manquer l'occasion de dédier ce travail à mes chers parents ROUBI Mohamed Elbachir et MAOUCHI Noura.*

*J'aimerais exprimer ma gratitude à tous les Chercheurs et Spécialistes, J'adresse mes remerciements à Monsieur TEMMAR Mustapha, Professeur à l'Université de Blida 1 d'avoir accepté de présider le Jury. Mes vives grâtes vont aux Membres du Jury : Monsieur SEMMAR Djaffar, Professeur à l'Université de Blida 1, Monsieur SAHRAOUI Kheriss, Professeur à l'Université de Tissemsilt, Monsieur BENNOUD Salim; Maître de Conférences A à l'Université de Blida 1, qui ont bien voulu examiner ce travail, qui ont pris le temps de discuter de mon sujet. Chacun de ces échanges m'a aidé à faire avancer mon analyse.*

# *Dédicaces*

*Je dédie cette thèse en particulier Au Prophète Mohamed.*

*(صلى الله عليه و سلم).*

*A mon Père et ma très Chère Maman, qui m'ont éclairé le chemin en me donnant la main tout au long de mes années d'étude « Que dieu me les gardes ».*

*A mon frère GOUGAM Amine A mes Frères. À Mes Sœurs. À tous mes amis sans exception, à tous mes Maîtres, à tous ceux qui me sont Chers.*

*Roubi Abdeshak*

## الملخص

يتمثل العمل المقدم في هذه الأطروحة بدراسة رقمية للتدفق الديناميكي والحراري لتأثيرات المجال المغناطيسي على تدفق مائع نانوي حول عائق. يتم تنفيذ المحاكاة العددية عبر جمانرب COMSOL MULTIPHYSICS® بناءً على طريقة العناصر. ةودحمالا

يف الجزء الأول ، درس البحث انتقال الحرارة المختلط ثنائي الأبعاد في ثلاثة تجاويف مختلفة مع فتحة مدخل / مخرج ، يقع مصدر الحرارة على جزء من الجدار السفلي ، عدة معاملات ابرزها :

$$(0,1 \leq Ri \leq 10) , (10 \leq Re \leq 150) , (0,02 \leq \varphi \leq 0,08) , (0 \leq Ha \leq 100)$$

أظهرت النتائج اختلافا في وجود المجال المغناطيسي، لاحظنا أن الزيادة في قيمة عدد رينولدز تؤدي إلى انخفاض سرعة التدفق الحراري. ثالثا و لوالا فيوجتلا يف اييسن اضفخنم بقبي امنيب .نوسدراشثير ددع ةدايز عم 30% نتح نسحتي و يناثلا فيوجتلا يف بصقلال هدح بلا تلسن مقر طسوتط لصي، بينما تكون منخفضة في التجويف الأول والثالث. بالإضافة إلى تحسين تلسين طسوتم مقر في التجويف الثاني للجدار الأيمن وهو مطوي إلى الداخل. تحسين  $Ha$  و يحسن نقل الحرارة بالحمل الحراري. علاوة على ذلك، مع زيادة تركيز السوائل النانوية، زاد متوسط عدد نسلت في التجاويف الثلاثة. من المأمول أن تكون هذه النتائج مفيدة لتحسين الحمل الحراري، فهذه النتائج متوافقة مع الأدبيات المنشورة.

يف الجزء الثاني، يركز العمل على قياس الانتروبيا العامة والتبادلات الحرارية التي تحدث داخل تجويف مربع الشكل عن طريق تغيير الجدار البارد والساخن في أربع حالات مليئة بسائل نانوي هجين ( $Al_2O_3-Ag/eau$ ). تم تركيب اسطوانة في الداخل. بعد التحقق من النموذج. قمنا بتحليل العديد من المعلمات مثل ( $10^3 < Ra < 10^6$ )، ( $0 < Ha < 100$ ) ، ( $0,2 < \varepsilon < 0,8$ )، ( $0,02 < \varphi < 0,08$ ) ، ( $10^{-5} < Da < 10^{-2}$ ) نأخذ في الاعتبار أن المائع النانوي هو صفحي وغير قابل للضغط. لقد قمنا بحل مشكلة التدفق في شكل بلا أبعاد للمعادلات الحاكمة حيث تم حلها باستخدام طريقة الحجم المحدود. تم حل معادلات الطاقة والحركة والاستمرارية باستخدام برنامج الكمبيوتر COMSOL MULTIPHYSICS®.

يتم قياس انتقال الحرارة بالحمل المختلط من خلال حسابات عدد نسلت. تم عرض النتائج برقم رايلي أعلى، يتحسن متوسط عدد نسلت وتوليد الإنتروبيا  $10^5$  يليار مقر عافترا دنع 20% بلا لصت، بغض النظر عن موضع الجدار الساخن في العلبة ، بينما يكون أعلى مقارنة بالبقايا في الحالة الثالثة. من خلال استخدام المجال المغناطيسي، يمكن التحكم في حرارة معدل نقل الحرارة (HTR) بشكل جيد. الملاحظة المهمة من خلال هذا العمل هي عملية توليد الإنتروبيا في التجويف الثالث، حيث يتوسط الجدار الساخن الجدار الأيمن.

**الكلمات المفتاحية:** الموائع النانوية ، انتقال الحرارة ، التدفقات ، المجال المغناطيسي ، العوائق.

## *Résumé*

Le présent travail de thèse vise à caractériser numériquement l'effet d'un champ magnétique sur l'écoulement d'un nanofluide autour d'un obstacle. La simulation numérique est réalisée à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS®, basé sur la méthode des éléments finis.

La première partie de cette recherche se concentre sur l'étude du transfert de chaleur mixte bidimensionnel dans trois cavités distinctes, chacune avec une ouverture d'entrée/sortie. La source de chaleur est positionnée sur une partie de la paroi inférieure, avec plusieurs paramètres variant tels que nombre de Reynolds, nombre de Richardson, nombre de Hartmann, volume fraction, ( $10 \leq Re \leq 150$ ), ( $0,1 \leq Ri \leq 10$ ), ( $0 \leq Ha \leq 100$ ), et ( $0,02 \leq \phi \leq 0,08$ ). Les résultats obtenus mettent en évidence des variations significatives en présence d'un champ magnétique. Nous avons observé qu'une augmentation du nombre de Reynolds entraîne une diminution de la vitesse du flux de chaleur. Le nombre de Nusselt moyen atteint un maximum dans la deuxième cavité et améliorée jusqu'à 30 % avec l'augmentation de nombre de Richardson, tandis qu'elle reste relativement faible dans la première et la troisième cavité. De plus, une amélioration du nombre de Nusselt moyen est constatée dans la deuxième cavité, particulièrement le long de la paroi droite repliée vers l'intérieur. L'augmentation des valeurs de Ha (nombre de Hartmann) et de  $\phi$  (concentration de nanoparticules) contribue à améliorer le transfert de chaleur par convection. Par ailleurs, une concentration accrue de nanofluides se traduit par une augmentation du nombre moyen de Nusselt dans l'ensemble des trois cavités. Ces résultats s'alignent avec la littérature publiée et offrent des perspectives prometteuses pour optimiser les processus de convection. Nous espérons que ces conclusions seront précieuses pour de futures recherches dans ce domaine.

La deuxième partie de ce travail se concentre sur la mesure de l'entropie générale et des échanges thermiques à l'intérieur d'une cavité de forme carrée, en modifiant les parois froide et chaude dans quatre configurations remplies d'un nanofluide hybride ( $Al_2O_3$ -Ag/eau). À l'intérieur de la cavité, un cylindre est installé. Après la validation du modèle, nous avons analysé divers paramètres, nombre de Rayleigh, nombre de Hartmann, porosité, volume fraction, ( $10^3 < Ra < 10^6$ ), ( $0 < Ha < 100$ ), ( $10^{-5} < Da < 10^{-2}$ ), ( $0,02 < \phi < 0,08$ ), et ( $0,2 < \varepsilon < 0,8$ ). Il est important de noter que le nanofluide est considéré comme laminaire et incompressible. Nous avons résolu le problème de l'écoulement sous une forme adimensionnelle pour les équations gouvernantes, en utilisant la méthode des éléments finis.

Les équations pour l'énergie, le mouvement et la continuité sont résolues à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS®. Le transfert de chaleur par convection mixte est mesuré en calculant le nombre de Nusselt. Les résultats montrent qu'avec un nombre de Rayleigh  $Ra$  plus élevé, le nombre de Nusselt moyen et la génération d'entropie s'améliorent jusqu'à 20 % au nombre de Rayleigh élevée  $10^5$ , quelle que soit la position de la paroi chauffée, bien que le troisième cas présente une amélioration encore plus marquée par rapport aux autres. L'utilisation d'un champ magnétique permet un contrôle efficace du taux de transfert de chaleur (HTR). Une observation significative de ce travail concerne le processus de génération d'entropie dans la troisième cavité, où la paroi chaude influe sur la paroi droite.

**Mots clés :** Nanofluide, transfert de chaleur, écoulements, champ magnétique, obstacle.

## *Abstract*

The present work consists in a numerical characterization of the effects of a magnetic field on the flow of a nanofluid around an obstacle. The numerical simulation is implemented using the COMSOL MULTIPHYSICS® software based on the finite element method.

In the first part, the research studied the two-dimensional mixed heat transfer in three different cavities with inlet/outlet opening, The heat source is located on a part of the bottom wall, Several parameters such as number of Reynolds, number of Richardson, number of Hartmann, volume fraction, ( $10 \leq Re \leq 150$ ), ( $0,1 \leq Ri \leq 10$ ), ( $0 \leq Ha \leq 100$ ), ( $0,02 \leq \varphi \leq 0,08$ ). The results showed a difference in the presence of the magnetic field, and we noticed that an increase in the Reynolds number value leads to a decrease in the heat flow rate. The nombre of average nusselt increases in the second cavity to give a maximum value, while it is low in the first and third cavities. Also, improvement of  $Nu_{avg}$  in the second cavity of the right wall, which is folded inward. The improvement of  $Ha$  and  $\varphi$  improves the convective heat transfer. In addition, with the increase in nanofluid concentration, the average Nusselt number in the three cavities increased. It is hoped that these results will be useful in optimizing convection; these results are consistent with the published literature.

In the second part, work focuses on measuring the general entropy and heat exchange that occurs inside a square shaped cavity by changing the cold and hot wall in four cases filled with a hybrid nano-liquid ( $Al_2O_3$ -Ag/water). A cylinder is installed inside. After validation of the model. We analyzed several parameters such as ( $10^3 < Ra < 10^6$ ), ( $0 < Ha < 100$ ), ( $10^{-5} < Da < 10^{-2}$ ), ( $0,02 < \varphi < 0,08$ ), ( $0,2 < \varepsilon < 0,8$ ). We consider the fact that the nanofluid is laminar and incompressible. We solved the flow problem in dimensionless form for the governing equations as solved using the finite element method. The equations for energy, motion and continuity were solved using the COMSOL MULTIPHYSICS® softwar. Heat transfer by mixed convection is measured by Nusselt number calculations. The results are presented with higher Rayleigh number  $Ra$ , average Nusselt number and entropy generation improve up to 20% at high Rayleigh number  $10^5$ , regardless of the position of the heated wall in the case, while it is higher compared to the rest in the third case. Through the use of the magnetic field, the heat of the Heat Transfer Rate (HTR) can be well controlled. The important observation through this work is the entropy generation process in the third cavity, where the hot wall mediates the straight wall.

**Key words:** Nanofluid, heat transfer, flows, magnetic field, obstacle.

## Sommaire

REMERCIEMENTS .....	I
DEDICACE .....	II
ملخص .....	III
RESUME .....	IV
ABSTRACT.....	VI
INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b><i>CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DES TRAVAUX ELABORES DANS CE DOMAINE DE RECHERCHE.</i></b>	
I.1. INTRODUCTION .....	4
I.2. ETAT DE L'ART .....	4
I.3. DEFINITION D'UN NANOFLUIDE .....	16
I.4. FLUIDES DE BASE .....	16
I.5. TYPES DE NANOPARTICULE.....	17
I.6. NANOPARTICULES PLUS UTILISEES POUR OBTENIR DES NANOFLUIDES.....	17
I.7. SYNTHESE DE NANO FLUIDES .....	18
I.8. PREPARATION DES NANOFLUIDES .....	19
I.9. MAGNETISME .....	25
I.10. DEFINITION DE CHAMP MAGNETIQUE.....	25
I.11. EFFET DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LA GENERATION D'ENTROPIE DANS LES NANOFLUIDES.....	25
I.12. EFFET MAGNUS.....	26
I.13. ECOULEMENT AUTOUR D'UN CYLINDRE.....	27

I.14.	ECOULEMENT AROUND D'UN CYLINDRE FIXE.....	27
I.15.	DIFFERENTS TYPES D'ECOULEMENTS .....	28
I.16.	TRANSFERT DE CHALEUR [54].....	36
I.17.	CONCLUSION .....	38

***CHAPITRE II : MISE EN EQUATION DU PHENOMENE PHYSIQUE D'UN  
NANOFLUIDE AROUND D'UN OBSTACLE.***

II.1.	INTRODUCTION .....	40
II.2.	MISE EN EQUATIONS DU PROBLEME .....	40
II.3.	CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DES NANOFLUIDES .....	43
II.4.	FORMULATION ADIMENSIONNELLE DU PROBLEME .....	50
II.5.	MODELE DE TURBULENCE .....	55
II.6.	EQUATIONS AUXILIAIRES .....	56
II.7.	EQUATIONS REPRESENTATIVES D'ECOULEMENT .....	58
II.8.	METHODES NUMERIQUES .....	58
II.9.	EQUATIONS REPRESENTATIVES DE NANO FLUIDE.....	62
II.10.	NOMBRE SANS DIMENSION.....	63
II.11.	CONCLUSION .....	64

***CHAPITRE III : MODELISATION MATHEMATIQUE DU SYSTEME ET  
CONDITIONS AUX LIMITES DE LA CONFIGURATION A ETUDIER.***

III.1.	INTRODUCTION .....	66
III.2.	SIMULATIONS NUMERIQUES EN 2D .....	66
III.3.	PRESENTATION DU LOGICIEL COMSOL.....	67
III.4.	METHODE DES VOLUMES FINIS.....	67

<b>III.5. SIMULATION NUMERIQUE SUR UNE CAVITE D'UN TRIANGLE.....</b>	<b>68</b>
<b>III.6 SIMULATION NUMERIQUE SUR UNE CAVITE CARRE.....</b>	<b>72</b>
<b>III.7. CONCLUSION.....</b>	<b>78</b>

***CHAPITRE IV : SIMULATIONS NUMERIQUES ET COMPARAISON DES  
RESULTATS A L'AIDE D'UNE EXPERIENCE DATA SCHOW.***

<b>IV.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>80</b>
<b>IV.2. DISCUSSION DES RESULTATS D'UNE SIMULATION NUMERIQUE SUR UNE CAVITE D'UN TRIANGLE.....</b>	<b>81</b>
<b>IV.3. DISCUSSION DES RESULTATS D'UNE SIMULATION NUMERIQUE SUR UNE CAVITE CARRE.....</b>	<b>95</b>
<b>IV.4. COMPARAISON ENTRE DEUX RESULTATS D'ETUDES EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE.....</b>	<b>117</b>
<b>IV.5. CONCLUSION.....</b>	<b>126</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>130</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>134</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Échelle des dimensions (1 nanomètre = $10^{-9}$ m = $10^{-6}$ $\mu$ m = $10^{-3}$ mm).....	16
<b>Figure I.2.</b> Images des nanoparticules de silice à facteur de forme obtenues par Microscopie Électronique à Transmission [39].....	16
<b>Figure I.3.</b> Image du nano-fluide Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [40]. .....	18
<b>Figure I.4.</b> Photographie du nano-fluide Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [40].....	18
<b>Figure I.5.</b> Schéma des différentes techniques d'estimation de la stabilité des nanofluides ; (a) mesure de sédimentation, (b) mesure de transmittance/absorbance et (c) mesure de diffusion dynamique de la lumière.....	21
<b>Figure I.6.</b> Procède de synthèse de nanofluid en une seule étape (Argonne National Laboratory, USA) [42].....	22
<b>Figure I.7.</b> Image de : a) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (13 nm) ; b) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (50 nm) ; c) TiO <sub>2</sub> (21 nm) ; d) SiO <sub>2</sub> (5~15 nm) ; e) SiO <sub>2</sub> (10~20 nm) et f) Cu nanoparticules dispersé dans l'eau [45]. .....	24
<b>Figure I.8.</b> Rotor Flettner sur un navire [49]. .....	26
<b>Figure I.9.</b> Visibilité du cylindre fixe avec $Re = 0.16$ [50]. .....	28
<b>Figure I.10.</b> Visibilité du cylindre fixe avec $Re = 26$ [50]. .....	29
<b>Figure I.11.</b> Visibilité du cylindre fixe avec $Re = 140$ [56]. .....	30
<b>Figure I.12.</b> Ondulation des tourbillons de Von Karman pour le mode (A) à ( $Ra = 10^6$ ; $Re = 220$ ) Faghani et al [45]. .....	31
<b>Figure I.13.</b> Visualisation du mode (B) à ( $Ra = 10^6$ ; $Re = 270$ ) Persillon et Faghani [45]... ..	31
<b>Figure I.14.</b> Variation du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds, apparition des effets tridimensionnels autour de $Re \approx 180$ Zdravkovich [55] (écoulement parallèle en traits continus et oblique en points).....	32

<b>Figure I.15.</b> Phénomène de dislocations à ( $Re = 220$ ), transition de couches de cisaillement ( $1200 \leq Re \leq Re_c$ ) Faghani et al [44].	33
<b>Figure I.16.</b> Diminution de la zone de formation tourbillonnaire pour $3000 < Re < 8000$ , Norberg [56].	34
<b>Figure I.17.</b> (a) - Mise en évidence du mouvement tridimensionnel des tourbillons de Bloor-Gerrard. (b) - Evolution temporelle des structures de type Kelvin-Helmholtz [58].	35
<b>Figure I.18.</b> Écoulement laminaire 2D à écoulement 3D	36
<b>Figure II.1.</b> Principaux résultats sur la conductivité thermique relative pour des suspensions de nanoparticules d'après Wang et al [64].	45
<b>Figure II.2.</b> Diagramme de phase cuivre-oxygène [77].	52
<b>Figure II.3.</b> Éléments finis tridimensionnels : tétraédriques, parallélépipédique et prismatique	61
<b>Figure III.1.</b> Illustration les domaines physiques (A ; B ; C).	68
<b>Figure III.2.</b> Illustration graphique de la distribution du maillage	72
<b>Figure III.3.</b> Schémas de différents modèles géométriques.	73
<b>Figure III.4.</b> Illustration graphique de la distribution des mailles.	76
<b>Figure IV.1.</b> Changements des lignes de courant ( $\Psi$ ) pour divers $Ri$ (0,1 ; 0,5 ; 1 ; 5 ; 10) à ( $Ha = 0$ , $Re = 10$ , $\phi = 0.02$ ) pour différentes formes de cavité.	82
<b>Figure IV.2.</b> Changements des lignes de courant ( $\Psi$ ) pour divers $Re$ (10 ; 50 ; 100 ; 150) à ( $Ha = 0$ , $\phi = 0,02$ , $Ri = 0,1$ ) , pour différentes formes de cavité.	84
<b>Figure IV.3.</b> Changements de la température (T) pour divers $Ri$ (0.1 ; 0,5 ; 1 ; 5 ; 10) à ( $Ha = 0$ , $Re = 10$ , $\phi = 0,02$ ) pour différentes formes de cavités.	86
<b>Figure IV.4.</b> Changements de la température (T) pour divers $Re$ (10 ; 50 ; 100 ; 150) à ( $Ha = 0$ , $\phi = 0,02$ , $Ri = 0,1$ ) , pour différentes formes de cavités.	87

<b>Figure IV.5.</b> Variation de $Nu_{avg}$ avec $Re$ pour divers $Ri$ de différentes formes de cavité à ( $Ha = 0$ et $\varphi = 0,02$ ).....	88
<b>Figure IV.6.</b> Évolution du nombre moyen de Nusselt avec Reynold pour différents $Ha$ de différentes formes de cavités à ( $\varphi = 0,02$ et $Ha = 0$ ). .....	90
<b>Figure IV.7.</b> Variations de $Nu_{avg}$ avec $Re$ pour divers $\varphi$ de différentes formes de cavités à ( $Ha = 0$ et $Ri = 0,1$ ). .....	91
<b>Figure IV.8.</b> Evolution du nombre moyen de Nusselt avec Reynold pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 0$ et $\varphi = 0.02$ et $Ri = 0,1$ ). .....	92
<b>Figure IV.9.</b> Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du Reynold pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 0$ et $\varphi = 0,02$ et $Ri = 10$ ). .....	93
<b>Figure IV.10.</b> Changement du nombre moyen de Nusselt avec Reynold pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 0$ et $\varphi = 0,06$ et $Ri = 0,1$ ) .....	94
<b>Figure IV.11.</b> Changement du nombre moyen de Nusselt avec Reynold pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 50$ et $\varphi = 0,02$ et $Ri = 0,1$ ) .....	94
<b>Figure IV.12.</b> Illustration de la $\psi_{max}$ dans les quatre cavités chargées par le nanofluide ( $Al_2O_3-Ag/eau$ ) pour différents nombres de Rayleigh $Ra$ à ( $Ha = 0$ ; $\varepsilon = 0,2$ ; $\varphi = 0,02$ ; $Da = 10^{-2}$ ). .....	96
<b>Figure IV.13.</b> Illustration de l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $Al_2O_3-Ag/eau$ ) pour différents nombres de Rayleigh $Ra$ à ( $Da = 10^{-2}$ ; $\varepsilon = 0,2$ ; $\varphi = 0,02$ ; $Ha= 0$ ).....	97
<b>Figure IV.14.</b> Illustre l'entropie dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $Al_2O_3-Ag/eau$ ) pour différents nombres de Rayleigh $Ra$ à ( $Ha = 0$ ; $\varepsilon = 0,2$ ; $\varphi = 0,02$ ; $Da = 10^{-2}$ ). .....	98
<b>Figure IV.15.</b> Illustration de la ligne de courant dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $Al_2O_3-Ag/eau$ ) pour différents $Ha$ à ( $Ra = 10^6$ ; $\varepsilon = 0,2$ ; $\varphi = 0,02$ ; $Da = 10^{-2}$ ).....	99
<b>Figure IV.16.</b> Illustration de l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $Al_2O_3-Ag/eau$ ) pour différents $Ha$ à ( $Ra = 10^6$ ; $\varepsilon = 0,2$ ; $\varphi = 0,02$ ; $Da = 10^{-2}$ ). .....	100

<b>Figure IV.17.</b> Illustration de l'entropie dans quatre cavités remplies par le nanofluide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ag/eau) pour différents Ha à (Ra = 10 <sup>6</sup> ; ε = 0,2 ; φ = 0,02 ; Da = 10 <sup>-2</sup> ).....	100
<b>Figure IV.18.</b> Illustration de la ligne de courant dans quatre cavités remplies par le nanofluide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ag/eau) pour différents φ à (Ra = 10 <sup>6</sup> ; Ha = 0 ; ε = 0,2 ; Da = 10 <sup>-2</sup> ).....	102
<b>Figure IV.19.</b> Illustration de l'isotherme dans quatre cavités remplies de nanofluide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ag/eau) pour différents φ à (Ra = 10 <sup>6</sup> ; Ha = 0 ; ε = 0,2 ; Da = 10 <sup>-2</sup> ).....	102
<b>Figure IV.20.</b> Illustration de la ligne de courant dans quatre cavités remplies par le nanofluide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ag/eau) pour différents Da à (Ra = 10 <sup>6</sup> ; Ha = 0 ; ε = 0,2 ; φ = 0,02).....	104
<b>Figure IV.21.</b> Illustration l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ag/eau) pour différents Da à (Ra = 10 <sup>6</sup> ; Ha = 0 ; ε = 0,2 ; φ = 0,02).....	104
<b>Figure IV.22.</b> Illustration l'entropie dans quatre cavités remplies par le nanofluide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ag/eau) pour différents Da à (Ra = 10 <sup>6</sup> ; Ha = 0 ; ε = 0,2 ; φ = 0,02).....	105
<b>Figure IV.23.</b> Illustration de la ψ dans quatre cavités chargées par le nanofluide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ag/eau) pour différentes porosités ε à (Ra = 10 <sup>6</sup> ; Ha = 0 ; φ = 0,02 ; Da = 10 <sup>-2</sup> ).....	106
<b>Figure IV.24.</b> Illustration de l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ag/eau) pour différentes porosités ε à (Ra = 10 <sup>6</sup> ; Ha = 0 ; φ = 0,02 ; Da = 10 <sup>-2</sup> )..	107
<b>Figure IV.25.</b> Changement de Nu <sub>avg</sub> avec Ra dans quatre cavités pour divers Ha à (ε = 0,2 ; φ = 0,02 ; Da = 10 <sup>-2</sup> ).....	108
<b>Figure IV.26.</b> Changement de Nu <sub>avg</sub> avec Ha dans quatre cavités pour divers φ à (Ra = 10 <sup>6</sup> ε = 0,2 ; Da = 0,01).....	109
<b>Figure IV.27.</b> Variation de Nu <sub>avg</sub> avec Ha dans quatre cavités pour ε varié à (Ra = 10 <sup>6</sup> ; φ = 0,02 ; Da = 10 <sup>-2</sup> ).....	110
<b>Figure IV.28.</b> Modification de Nu <sub>avg</sub> avec Ra dans la cavité pour Da varié à (Ra = 10 <sup>6</sup> ; φ = 0,02 ; ε = 0,2).....	111

<b>Figure IV.29.</b> Changement de la génération d'entropie $S_{gen}$ avec le nombre de Rayleigh Ra dans la cavité pour Ha varié à ( $\varphi = 0,02$ ; $\varepsilon = 0,2$ ; $Da = 10^{-2}$ ).....	112
<b>Figure IV.30.</b> Evolution de $S_{gen}$ avec le nombre de Rayleigh Ra dans la cavité pour $\varphi$ varié à ( $Ha = 0$ ; $\varepsilon = 0,2$ ; $Da = 10^{-2}$ ).....	113
<b>Figure IV.31.</b> Modification de la génération d'entropie avec le nombre Hartmann Ha dans la cavité pour des Da variés à ( $Ra = 10^6$ ; $\varphi = 0,02$ ; $\varepsilon = 0,2$ ).....	114
<b>Figure IV.32.</b> Modification de $S_{gen}$ avec le nombre de Rayleigh Ra dans la cavité à ( $Ra = 10^6$ ; $\varphi = 0,02$ ; $\varepsilon = 0,2$ ; $Da = 10^{-2}$ ).....	115
<b>Figure IV.33.</b> Modification de la génération d'entropie avec le nombre de Rayleigh Ra dans les cavités à ( $\varphi = 0,02$ ; $Ha = 0$ ; $\varepsilon = 0,2$ ; $Da = 10^{-2}$ ).....	116
<b>Figure IV.34.</b> Modification de la génération d'entropie avec la fraction volumique de nanoparticules $\varphi$ dans la cavité à ( $Ra = 10^6$ ; $Ha = 0$ ; $\varepsilon = 0,2$ ).....	116
<b>Figure IV.35.</b> Schéma de l'installation expérimentale [86].....	119
<b>Figure IV.36.</b> Schéma de l'installation expérimentale Schéma de la section d'essai [86].....	119
<b>Figure IV.37.</b> Illustration les domaines physiques.....	121
<b>Figure IV.38.</b> Illustration graphique de la distribution du maillage.....	122
<b>Figure IV.39.</b> Comparaison entre résultats expérimentaux de Kalteh et al [86] et nous résultats numériques a différent $\varphi$ et $Ha = 25$ .....	125

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Combinaisons nanoparticules/fluides de base [42].....	19
<b>Tableau II.1.</b> Choix des grandeurs de référence .....	51
<b>Tableau II.2.</b> Résultats significatifs portant sur l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides [78].....	54
<b>Tableau III.1.</b> Caractéristiques thermophysiques de CuO/Eau [81].....	70
<b>Tableau III.2.</b> Effet de la taille de la maille sur $Nu_{avg}$ avec $Ha = 20$ ; $Ra = 106$ .....	71
<b>Tableau III.3.</b> Comparaison du Nombre moyen de Nusselt à $\phi = 0,04$ et $Ha = 0$ avec la référence [82] .....	72
<b>Tableau III.4.</b> Comparaison à $\phi = 0,06$ entre la présente étude et Réf [82]. Réf [83].....	72
<b>Tableau III.5.</b> Caractéristiques thermo physiques de $(Al_2O_3-Ag/eau)$ [78].....	73
<b>Tableau III.6.</b> Estimation de $S_{gen}$ et $Nu_{avg}$ pour des résolutions de grille variées.....	76
<b>Tableau III.7.</b> Comparaison du nombre moyen de Nusselt à $\phi = 0.06$ et $Ha = 30$ entre la présente étude, les Refs [82] et [83]......	77
<b>Tableau III.8.</b> Comparaison du nombre moyen de Nusselt à $Ra=10^5$ avec les références [82] et [85]. .....	77
<b>Tableau III.9.</b> Comparaison de la génération d'entropie en $\chi =10^{-2}$ avec [82] et [84]......	77

## Nomclature

$a$	Longueur	(m)
$B_0$	Intensité du champ magnétique	
$C_p$	Chaleur spécifique à pression constante	(J/Kg K)
$Gr$	Nombre Grashof	$g\beta_f(T_h-T_c)H^3/\vartheta_f^2$
$g$	Accélération gravitationnelle	(m/s <sup>2</sup> )
$H$	Hauteur de la cavité	(m)
$Ha$	Nombre de Hartmann	
$h$	Coefficient de transfert de chaleur	
$k$	Conductivité thermique	(W/m K)
$L$	Dimension de la cavité	(m)
$Pr$	Nombre de Prandtl	$\vartheta_f/\alpha_f$
$P$	Pression	(Pa)
$p$	Pression sans dimension	
$Ri$	Nombre de Richardson	$g\beta(T_h-T_c)H/\mu_0^2$
$Re$	Le nombre de Reynold	$\rho_f\mu_0H/\mu_f$
$T$	Température	(K)
$x, y$	Coordonnées cartésiennes	(m)
$B$	force du champ magnétique	(A.m <sup>-1</sup> )
$Da$	Nombre Darcy	
$Nu_{avg}$	Nombre de Nusselt moyen	
$Nu_{loc}$	Nombre local Nusselt	
$Ra$	Nombre de Rayleigh	
$r$	rayon dans le cylindre	
$S_{gen}$	génération d'entropie	(W.m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )
$S_{gen}$	génération d'entropie sans dimension	
$T_h$	température de la partie chaude	(K)
$T_c$	température de la partie froide	(K)
$T_o$	Temperature of reference (K),	$(T_h+T_c)/2$
$U$	Vecteur de vitesse sans dimension	
$u_0$	Vitesse du flux à l'entrée	(m/s)
$\vec{u}$	Vecteur vitesse (m/s)	
$U, V$	Vitesse sans dimension, $u/u_0, v/u_0$	

$u, v$	Composantes de vitesse dans les directions $x, y$	(m/s)
$X, Y$	Coordonnées cartésiennes sans dimension,	$x/H, y/H$

*Symboles grecs*

$\alpha$	Diffusivité thermique	(m <sup>2</sup> /s)
$\beta$	Coefficient de dilatation thermique	(1/K)
$\mu$	Viscosité dynamique	(kg/ms)
$\vartheta$	Viscosité cinématique	(m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	Densité	(kg/m <sup>3</sup> )
$\theta$	Température sans dimension	$(T - T_C)/(T_H - T_C)$
$\phi$	Solid volume fraction	
$\varphi$	fraction volumique	
$\varepsilon$	porosité	
$\delta$	conductivité électrique	
$\Psi$	fonction de flux non dimensionnel	

*Indices*

$f$	Fluide pur
$min$	Minimum
$max$	Maximum
$nf$	Nanofluid
$avg$	average
$loc$	locale
$bf$	fluide de base
$c$	cold
$h$	hot
$s$	solide
$hnf$	hybrid nanofluid
$NP$	nanoparticule

# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction générale

Les nanofluides sont obtenus en mélangeant un fluide de base avec des particules de taille nanométrique, inférieure à 100 nm. Ces fluides présentent des propriétés physico-chimiques particulières et intéressantes. Du point de vue thermique, ils contribuent à améliorer les échanges de chaleur dans de nombreux systèmes thermiques, tels que les échangeurs, les collecteurs solaires, ainsi que les systèmes de chauffage dans les domaines de l'habitat et du transport. Les travaux consacrés aux nanofluides ont connu une activité importante au cours des deux dernières décennies, et ce domaine de recherche continue d'attirer de nombreux chercheurs à travers le monde. Son objectif est d'améliorer la qualité des produits et des systèmes qui rencontrent des défis liés à la convection de chaleur.

Ce volet de recherche s'inscrit dans le cadre de l'analyse physique et de la modélisation des écoulements laminaires autour d'un obstacle fixe à l'intérieur d'une cavité, en présence d'un champ magnétique. Comprendre physiquement le comportement de l'écoulement du nanofluide autour des obstacles et modéliser ces interactions revêt une importance cruciale, tant du point de vue de la recherche fondamentale que dans le contexte des applications énergétiques. L'objectif de cette étude est d'approfondir notre compréhension des mécanismes physiques liés à l'échange de chaleur dans les écoulements autour de structures solides fixes en présence d'un champ magnétique.

Cette étude se concentre principalement sur l'investigation numérique des équations régissant les écoulements externes, mettant particulièrement l'accent sur l'influence du champ magnétique sur les mécanismes de transfert de chaleur dans une cavité remplie d'un nanofluide avec un cylindre fixe. Une conclusion sera ensuite élaborée en fonction des interprétations des résultats obtenus dans cette branche de la recherche. Les équations fondamentales de l'écoulement, à savoir l'équation de continuité, l'équation de quantité de mouvement et l'équation d'énergie, sont intégrées et discrétisées selon l'approche des éléments finis. Les simulations numériques sont réalisées à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS. Ainsi, l'effet de divers paramètres sur les champs dynamique et thermique, tels que la forme de la géométrie, le type et la taille des nanoparticules, ainsi que les nombres de Reynolds, de Hartmann et de Rayleigh, est analysé.

Le contenu de la thèse s'articule autour de quatre chapitres, organisés de la manière suivante :

- ✓ Le premier chapitre expose l'état actuel des travaux réalisés dans le domaine des nanofluides et du transfert de chaleur.
- ✓ Le deuxième chapitre est dédié à la formulation mathématique du phénomène physique d'un nanofluide autour d'un obstacle. Il aborde les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, ainsi que la définition des grandeurs thermo-physiques.
- ✓ Le troisième chapitre expose la modélisation mathématique du système ainsi que les conditions aux limites de la configuration étudiée. L'écoulement considéré est décrit par les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. La définition des grandeurs thermo-physiques est également présentée, permettant ainsi l'évaluation des performances thermiques et hydrauliques du système étudié.
- ✓ Dans le quatrième et dernier chapitre, des simulations numériques sont réalisées et les résultats sont comparés à l'aide de données expérimentales. De plus, une étude expérimentale préalable est examinée pour confirmer les résultats obtenus, et des améliorations sont proposées.
- ✓ Une conclusion générale, suivie d'un ensemble de perspectives à considérer pour de futurs développements, marque la clôture de cette thèse d'État.

# CHAPITRE I

## **I.1. Introduction.**

Ce chapitre constitue une contribution récente à la recherche sur les nanofluides, les écoulements, le transfert de chaleur et le magnétisme. L'analyse du champ d'écoulement derrière un cylindre circulaire infini est largement explorée dans le passé, et cette phénoménologie revêt une importance cruciale dans de nombreux domaines techniques et physiques. En effet, le développement de vortex alternés dans le sillage proche induit des forces de pression générant des vibrations structurelles, des bruits acoustiques et des phénomènes de résonance. Nous aborderons également le transfert de chaleur, qui est le processus d'échange d'énergie sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux à différentes températures. Ce transfert peut se faire par conduction, convection ou rayonnement, bien que l'un de ces mécanismes soit généralement prédominant.

Enfin, le magnétisme représente un aspect du phénomène combiné de l'électromagnétisme. Il s'agit d'une catégorie de phénomènes physiques influencés par des champs magnétiques. Les courants électriques et les moments magnétiques des particules élémentaires génèrent un champ magnétique, lequel agit sur d'autres courants et moments magnétiques.

## **I.2. État de l'art.**

Les nanofluides sont récemment devenus une alternative prisée aux liquides traditionnels tels que l'huile et l'eau en raison de leur efficacité et de leur haute qualité dans le transfert de chaleur par convection. Leur importance est considérable dans divers domaines tels que l'industrie et la médecine. La technologie des nanofluides est devenue un axe majeur de recherche et développement, attirant l'attention tant des chercheurs que des fabricants. Son objectif est d'améliorer la qualité des produits et des systèmes confrontés aux défis de la convection de chaleur.

Pour identifier comment les caractéristiques de transfert de chaleur des nanofluides augmentent avec la concentration volumique, des expériences sont réalisées sur des nanofluides d'oxyde de cuivre, de dioxyde de silicium et d'oxyde d'aluminium, chacun dans un mélange d'éthylène glycol et d'eau. Yimin et Qiang [1]. ont mis en place un système expérimental pour étudier les caractéristiques de flux et le transfert de chaleur par convection du nanofluide à l'intérieur du canal.

Une étude numérique de la convection mixte, cette fois en utilisant une cavité trapézoïdale, est menée par Tmartnhad et al [2]. Les deux ouvertures sont adaptées aux plaques de cavité. L'ouverture d'entrée peut être soit verticale soit horizontale, tandis que le trou d'évacuation est établi horizontalement sur la paroi inférieure. La cavité remplie de nanoparticules de cuivre (Cu) et d'eau en tant que mélange présente un comportement de fluidification par cisaillement. Cette étude est réalisée pour certains paramètres pertinents du nombre de Richardson. Kulkarni et al [3]. ont observé que la taille du foyer augmente avec le coefficient de transfert de chaleur des nanofluides. Solanki J N & Murthy [4], ont étudié la synthèse de nanoparticules de métaux nobles en général, et de nanoparticules d'argent (SNP) en particulier, suscitant actuellement un intérêt particulier. Un aperçu des propriétés améliorées des SNP et des applications consécutives est discuté. Les méthodes de synthèse courantes et leur comparaison avec la technologie de la microémulsion, en mettant particulièrement l'accent sur les avantages de la formation de SNP avec la technologie de la microémulsion, sont également discutées. Un bref aperçu des bases de la technologie de la microémulsion pour la formation de nanoparticules est également présenté. L'examen complet de la technique de synthèse de la microémulsion utilisée à ce jour pour la génération de SNP est discuté de manière exhaustive. Les paramètres de contrôle sont expliqués pour influencer la taille, l'uniformité de la taille et les aspects de stabilité des SNP rapportés dans la littérature, permettant une synthèse sur mesure pour une application spécifique. Les modifications récentes apportées à la synthèse des SNP pour obtenir une monodispersité, un rendement et une stabilité élevés sont également discutées. Enfin, certaines tendances et perspectives futures dans ces domaines de recherche sont décrites. Sourtiji et al [5]. ont mené une étude sur la convection mixte et le flux instationnaire d'un nanofluide d'alumine et d'eau dans une enceinte carrée.

D. Maity et al [6]. Une synthèse simple et peu coûteuse en une seule étape de nanoparticules d'argent est réalisée en utilisant du poly (méthyl vinyl éther/l'anhydride maléique) (PVM/MA) à la fois comme agent réducteur et stabilisant. Le processus de synthèse est effectué en solution aqueuse, rendant la méthode polyvalente et respectueuse de l'environnement. Les nanoparticules stabilisées par le polymère synthétisé étaient stables dans l'eau à température ambiante sans agrégation de particules pendant au moins 1 mois. Les nanoparticules d'argent

synthétisées sont caractérisées par spectroscopie d'absorption UV-visible, diffraction des rayons X (XRD), microscopie à force atomique (AFM), microscopie électronique à transmission (TEM) et spectroscopie IR à transformée de Fourier (FTIR). Les résultats ont montré que les nanoparticules Ag-core étaient recouvertes d'une coque PVM/MA d'une épaisseur d'environ 0,5 à 0,8 nm. Les activités antimicrobiennes des nanoparticules d'argent stabilisées par le copolymère (PVM/MA) sur divers microorganismes sont également étudiées. Li D et al [7]. ont préparé une série de nanoparticules d'argent revêtues de di-n-dodécylthiophosphate, de di-n-cétyldithiophosphate ou de di-n-octadécylthiophosphate, présentant une bonne dispersité dans les alcanes ou le kérosène. Des nanofluides d'argent stables peuvent être formés dans les alcanes ou le kérosène avec les nanoparticules d'argent revêtues en surface. La stabilité thermique des nanofluides d'argent est mesurée à différentes températures. Les effets des nanoparticules d'argent sur l'oxydation thermique du kérosène sont étudiés à différentes températures. Les revêtements peuvent être libérés de la surface des nanoparticules d'argent au-dessus de 150 °C, permettant ainsi l'accès de l'oxygène au noyau d'argent et inhibant l'oxydation du kérosène par l'oxygène.

Les nanofluides, qui sont des suspensions fluides de nanomatériaux, ont démontré de nombreuses propriétés intéressantes, et leurs caractéristiques distinctives offrent un potentiel sans précédent pour de nombreuses applications. W. Yu and H. Xie [8]. Cet article résume les progrès récents dans l'étude des nanofluides, notamment les méthodes de préparation, les méthodes d'évaluation de la stabilité des nanofluides, les moyens d'améliorer cette stabilité, les mécanismes de stabilité des nanofluides, et présente le large éventail d'applications futures dans divers domaines tels que l'énergie, la mécanique et la biomédecine. Enfin, l'article identifie les opportunités de recherche future. Par la suite, Vajjha et al [9]. ont réalisé une analyse complète pour évaluer les effets sur les performances des nanofluides dus aux variations de densité, de chaleur spécifique, de conductivité thermique et de viscosité. Dans le travail de L. T Tam et al [10]. Des nanoparticules d'argent (NP d'argent) d'une taille moyenne de particule d'environ 10 nm sont synthétisées en utilisant une technique de décomposition thermique. Ces NP d'argent ont démontré de puissants effets antimicrobiens contre diverses souches de bactéries et de champignons, les rendant idéales pour les applications de désinfection et de biomédecine. Sarafraz M. M et al [11]. ont étudié les performances thermiques d'un caloduc à thermosiphon sans mèche chargé d'un fluide de travail écologique produit biologiquement expérimentalement. En utilisant la synthèse verte, des nanoparticules d'argent sont produites à partir du nitrate d'argent aqueux et de l'extrait de feuille de thé frais. Les nanofluides à

différentes concentrations pondérales sont préparés, stabilisés et utilisés comme fluide de travail à l'intérieur du thermosiphon. Les résultats ont montré que l'utilisation des nanoparticules entraîne une réduction de la distribution de température et améliore les performances thermiques du caloduc. Jo Y. K et al [12]. ont illustré lors des chirurgies implantaires, des agents antibactériens et qui sont nécessaires pour prévenir les infections bactériennes, qui peuvent provoquer la formation de biofilms entre les matériaux implantés et les tissus. Les Protéines Adhésives de Moules (MAP) dérivées des moules marins sont des bioadhésifs qui présentent une forte capacité d'adhérence et de revêtement sur diverses surfaces, même dans un environnement humide. Ils ont proposé une nouvelle stratégie de revêtement antibactérien indépendant de la surface basée sur la fusion de MAP à un peptide liant l'argent. Cette protéine de fusion recombinante collante a permis le revêtement efficace sur la surface cible et la facilité la génération de nanoparticules d'argent sur la surface revêtue dans des conditions douces. Les nanoparticules d'argent biosynthétisées ont montré une excellente efficacité antibactérienne contre les bactéries Gram-positives et Gram-négatives et ont également révélé une bonne cytocompatibilité avec les cellules de mammifères. Cette stratégie de revêtement antibactérien générateur de nanoparticules d'argent indépendant de la surface a un grand potentiel d'utilisation pour la prévention des infections bactériennes dans divers domaines biomédicaux. Batmunkh M et al [13]. indiquent que le nanofluide est une suspension colloïdale qui a attiré une grande attention au cours des deux dernières décennies, mais son amélioration limitée du transfert de chaleur est un sujet de préoccupation pour les applications industrielles. Ils démontrent une amélioration de la conductivité thermique des nanofluides de  $\text{TiO}_2$  avec l'ajout de quantités négligeables de nanoparticules d'argent (Ag) modifiées. Dans ce travail, la surface/forme de nanoparticules d'argent nouvellement synthétisées est modifiée par broyage planétaire à billes. Ensuite, pour améliorer la conductivité thermique des nanofluides de  $\text{TiO}_2$ , les particules d'argent aplaties sont incorporées avec la combinaison de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  petites (15 nm) et grandes (300 nm) dans une solution aqueuse. Les conductivités thermiques des nanofluides Ag- $\text{TiO}_2$ /eau avec différentes concentrations pondérales sont mesurées à des températures allant de 15 à 40 °C. En conséquence, la présente étude confirme que la conductivité thermique de la solution à base de  $\text{TiO}_2$  peut être améliorée en introduisant les particules d'argent aplaties. M. M. Rahaman Mollick et al [14]. La proposition d'une technique verte et facile pour synthétiser des nanofluides à base de nanoparticules d'argent à haute température et pression est élaborée en utilisant une solution de lactulose de faible poids moléculaire, qui agit en tant qu'agent réducteur et stabilisant. La taille des particules/cristallites, la morphologie et la cristallinité des nanoparticules sont caractérisées à l'aide de techniques

spectroscopiques, microscopiques et de diffraction. Étant donné que les propriétés des nanofluides sont intéressantes pour les applications technologiques, l'étude de leurs conductivités thermique et électrique est également extrêmement importante. Le matériau présente une amélioration significative des conductivités thermique et électrique par rapport au fluide de base en raison de la surface élevée, du mouvement brownien amélioré et de la stratification à l'interface liquide-solide des nanofluides. De plus, ces nanofluides offrent d'excellentes activités antimicrobiennes contre différentes bactéries de classe Gram. Sourtiji et al [15]. ont réalisé une étude numérique sur le flux de convection mixte et le transfert de chaleur à l'intérieur d'une cavité carrée avec des orifices d'entrée et de sortie. Dans le travail de Kadhim AL-Ogaili et al [16]. Des nanoparticules d'argent sont préparées et synthétisées par ablation laser pulsée (Q-switched, 1064 et 532 nm double fréquence-Nd: YAG) d'argent métallique immergé dans de l'eau bidistillée et déminéralisée DDDW, sans aucun additif chimique. Ils ont étudié les propriétés optiques et antibactériennes en utilisant différentes techniques. L'influence des paramètres laser tels que le nombre d'impulsions, ainsi que l'influence du laser sur les propriétés des nanoparticules, est élucidée. Il est observé que l'énergie laser et le nombre d'impulsions laser ont un contrôle sur la taille des nanoparticules. L'augmentation de l'énergie laser et du nombre d'impulsions montre un décalage bleu clair dans le pic d'absorption des nanoparticules fabriquées, indiquant que la taille moyenne des particules diminue avec l'augmentation de l'énergie laser et du nombre d'impulsions. L'ablation pendant une période plus longue réduit la taille moyenne des nanoparticules. L'effet antibactérien des nanoparticules d'argent synthétisées contre quatre agents pathogènes - streptocoque, staphylocoque, protéé et entérobactérie est étudiée. K. Purohit et al [17]. L'enquête sur l'échantillon a permis d'étudier la taille des particules, la valeur du pH, les spectres d'absorption et le potentiel zêta. Un nanofluide avec une taille de particules de 2 nm à 6 nm est obtenu à une température de 80°C. Le potentiel zêta est mesuré et a une valeur de -38,5 mV. La micrographie électronique à transmission a montré la présence de particules de taille uniforme dans le fluide de base. Les nanoparticules d'argent sous forme de nanofluide préparé se sont avérées avoir une dispersion uniforme, une distribution de taille étroite avec une bonne stabilité au cours du vieillissement. Mehrez et al [18]. ont donné une démonstration du développement et de la recherche sur le transfert de chaleur par conduction et convection des caractéristiques de l'éthylène glycol. Ny G Barom et al [19]. ont simulé des nanofluides, qui sont le mélange de nanoparticules avec un fluide de base. Dans une étude récente, le nanofluide de l'Ag/Heg suscite l'intérêt de certains chercheurs, cependant, la viabilité de l'amélioration du transfert de chaleur de l'Ag/Heg est controversée. La présente étude a impliqué l'étude numérique (ANSYS FLUENT) du transfert de chaleur par

convection forcée dans un écoulement turbulent de nanofluide d'argent/graphène (Ag/Heg) dans un tuyau circulaire droit en acier inoxydable avec une géométrie de 0,01 m de diamètre hydraulique et 0,8 m de longueur. Le but est d'étudier l'amélioration du transfert de chaleur de l'eau Ag/Heg sous différentes faibles concentrations de fraction volumique de nanofluide Ag/Heg composé de 0,1 % ; 0,2 % ; 0,3 % ; 0,5 % ; 0,7 % et 0,9 %. Les flux de tuyaux soumis à un flux de chaleur constant de 1000 W/m<sup>2</sup> sont testés sous un nombre de Reynolds de 100000 et 120000. Les nanoparticules augmentent le taux de transfert de chaleur en augmentant la conductivité thermique du fluide de base. Dans les travaux en cours, les résultats démontrent l'amélioration du transfert de chaleur via Ag/Heg via un modèle de turbulence k-ε réalisable lorsque le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds et une réduction de la vitesse du nanofluide est détectée à la fin vers la direction axiale. Le transfert de chaleur maximal d'Ag/Heg se produit à une concentration en volume de 0,1 % avec une augmentation du nombre de Nusselt d'environ 17,97 % en augmentant le nombre de Reynolds de 100 000 à 200 000. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les travaux théoriques et mathématiques de la littérature ouverte. Zhang X F et al [20]. exposent les récents progrès des nanosciences et des nanotechnologies qui ont radicalement changé la manière dont nous diagnostiquons, traitons et prévenons diverses maladies dans tous les aspects de la vie humaine. Les nanoparticules d'argent (AgNPs) sont parmi les nanomatériaux les plus vitaux et fascinants, impliqués dans plusieurs applications biomédicales. Les AgNPs jouent un rôle essentiel dans les nanosciences et les nanotechnologies, particulièrement en nanomédecine. Bien que plusieurs métaux nobles soient utilisés à diverses fins, les AgNPs se concentrent sur des applications potentielles dans le diagnostic et le traitement du cancer. Dans cette revue, une discussion approfondie sur la synthèse des AgNPs à l'aide de méthodes physiques, chimiques et biologiques est élaborée. De plus, les propriétés des AgNPs et les méthodes de caractérisation sont examinées. Plus important encore, une analyse détaillée des bio-applications multifonctionnelles des AgNPs est effectuée ; par exemple, en tant qu'agents antibactériens, antifongiques, antiviraux, anti-inflammatoires, anti-angiogéniques et anticancéreux, ainsi que le mécanisme de l'activité anticancéreuse des AgNPs. De plus, des discussions sur les approches thérapeutiques et les défis pour le traitement du cancer en utilisant les AgNPs sont détaillées. Enfin, ils concluent en discutant des perspectives futures des AgNPs. Khan F et al [21]. ont soulevé l'étude qui décrit la méthode optimisée pour la synthèse de nanoparticules d'argent (AgNPs) à l'aide d'extrait de plante *Heliotropium Crispum* (HC). L'optimisation des paramètres physico-chimiques a permis d'obtenir des AgNPs stables et rapidement assemblés. Les résultats FTIR suggèrent la présence de composés phytochimiques végétaux qui ont contribué à la

réduction, la stabilisation et le plafonnement des AgNPs. Les nano-composites d'Ag assemblés ont affiché le pic de Résonance Plasmonique de Surface (SPR) autour de 428 nm. La présence de composites Ag-biomolécule assemblés de manière unique, coiffe et stabilise les nanoparticules dans une suspension végétale aqueuse. Les AgNPs sphériques de forme uniforme avec une faible polydispersion et une taille moyenne de particules de 42 nm sont déterminées par diffusion dynamique de la lumière (DLS) et microscopie électronique à balayage (SEM), présentant une interaction robuste avec les microbes. L'étude évalue également les propriétés antimicrobiennes et anti-biofilm des AgNPs synthétisés biologiquement sur des isolats cliniques de SARM, *Pseudomonas aeruginosa*, et *Acinetobacter baumannii*. La concentration minimale inhibitrice (0,5 mg/mL) des nanoparticules présentant un effet bactéricide est obtenue par des essais d'inhibition sur des souches bactériennes. La concentration qui présente une réponse bactéricide puissante est ensuite évaluée par inhibition de la croissance en milieu liquide pour des études anti-biofilm à 2,0 mg/mL. Les effets anti-biofilm médiés par les nanoparticules de HC-Ag sur *Pseudomonas aeruginosa* sont révélés par SEM. La décomposition complète des substances polymères extracellulaires du biofilm s'est produite après incubation avec des AgNPs. La destruction de la paroi cellulaire des peptidoglycanes est également révélée sur des images bactériennes planctoniques après 24 heures d'incubation. Narayanan et al [22]. ont rapporté l'immobilisation de nanoparticules d'argent stabilisées au borate (AgNPs) en tant que nano charges dans des polymères réticulés composés de Poly (Alcool Vinylique) (PVA) et d'Alginate de Sodium (SA) à différents rapports. La réticulation ionique à l'aide d'ions  $Ca^{2+}$  et la réticulation physique par congélation-décongélation sont utilisées pour piéger les nanoparticules d'argent dans les billes de nano composite PVA/SA/AgNPs préparées. Ces nano composites polymères sont caractérisés par UV-Vis, XRD, FE-SEM, FT-IR, TGA, et en utilisant des propriétés rhéologiques et de gonflement. Les activités antibactériennes de ces nano composites PVA/SA/AgNPs sont évaluées contre *Escherichia coli* O157:H7, qui provoque l'escherichiose par des aliments et de l'eau contaminés. Les résultats obtenus ont indiqué que le nano composite PVA/SA/AgNPs formé avec un rapport 10/90 de PVA sur SA (formulation F5) présentait une activité bactéricide élevée, avec un piégeage des AgNPs, et avait d'excellentes stabilités rhéologiques et thermiques. En raison du faible coût et de l'efficacité de ces nano composites antimicrobiens, ils ont un potentiel en tant que matériau actif d'emballage alimentaire pour la sécurité alimentaire et pour prolonger la durée de conservation des aliments emballés. Nakhjavani et al [23]. utilisent le comportement thermique des nanoparticules d'argent, qui est également analysé en dispersant les nanoparticules à l'intérieur de l'eau déminéralisée. Les résultats ont

montré que la conductivité thermique du nanofluide d'argent est supérieure à celle obtenue pour l'eau déminéralisée. L'activité des nanoparticules d'Ag contre certaines bactéries est également examinée pour trouver l'application antibactérienne appropriée pour les particules produites. Bouazizi N et al [24]. développent une méthode simple et respectueuse de l'environnement pour préparer un noyau-enveloppe microporeux  $\text{CuO@Ag}_0$  avec des activités catalytiques et antibactériennes élevées. La microscopie électronique à balayage et à transmission a révélé une prépondérance de particules presque sphériques de 50 nm avec un léger compactage de la structure. La comparaison des boucles d'hystérésis a confirmé la compaction de la structure après incorporation d'AgNP, et une diminution significative de la surface spécifique de 55,31  $\text{m}^2/\text{g}$  pour CuO à 8,03  $\text{m}^2/\text{g}$  pour  $\text{CuO@Ag}_0$  est constatée. Une étude cinétique de la réduction du 4-nitrophénol (4-NP) en 4-aminophénol (4-AP) avec du borohydrure de sodium a révélé une réaction de premier ordre qui produit une conversion totale en moins de 18 minutes.  $\text{CuO@Ag}_0$  a également montré une activité antibactérienne appréciable contre *Staphylococcus aureus*. Les effets antibactériens se sont révélés fortement dépendants de la taille, de la surface de contact, de la morphologie, et de la composition chimique des particules de catalyseur. L'ajout d'Ag<sub>0</sub>-NPs a produit plus d'espèces réactives de l'oxygène dans le milieu bactérien. Ces résultats ouvrent des perspectives prometteuses pour ses applications potentielles en tant que catalyseur à faible coût dans le traitement des eaux usées et agent antibactérien en cosmétique. Dans la présente étude, Corumlu V et al [25]. ont synthétisé des nanofluides (Ag/eau) à faible concentration à l'aide d'une méthode de réduction chimique. L'adéquation des nanofluides (Ag/eau) produits est étudiée pour le transfert de chaleur à long terme, en particulier dans les capteurs solaires à basse température. Les nanofluides produits sont caractérisés à l'aide de certains dispositifs de caractérisation tels que la spectroscopie ultraviolet-visible, la mesure de la conductivité thermique, la mesure du potentiel zêta, et la microscopie électronique à balayage. De plus, des mesures de caractérisation et un test de caloduc de nanofluides sont effectués 12 mois après le processus. Le nombre de nanoparticules en suspension dans le fluide de base a diminué au cours des processus de mesure. Bien que la conductivité thermique relative soit supérieure à (0,1), il y a eu une diminution significative de la résistance thermique et des températures de paroi du caloduc dans les résultats des tests. Par conséquent, les nanofluides à base d'eau d'argent peuvent être utilisés comme fluide de travail dans les systèmes de capteurs solaires pour des performances à long terme. Ozsoy A et al [26]. ont élaboré une étude expérimentale pour déterminer l'efficacité thermique d'un capteur solaire à tube sous vide thermosiphon (THP) utilisant un nanofluide argent-eau pour des applications commerciales. Tout d'abord, la synthèse d'un nanofluide argent-eau est réalisée, ce qui peut maintenir sa

stabilité à long terme. L'identification du nanofluide est déterminée par diffraction des rayons X, microscopie électronique à balayage, spectroscopie UV-visible et analyse thermophysique. Deuxièmement, les propriétés de transfert de chaleur des THP cylindriques en cuivre chargés de nanofluide argent-eau et d'eau pure sont étudiées expérimentalement. Des expériences de THP chargé de nanofluide argent-eau sont répétées quatre fois à des intervalles de deux semaines afin d'observer des changements dans les performances du THP. Il est observé que le THP chargé de nanofluide argent-eau maintient sa caractéristique de transfert de chaleur améliorée dans les expériences THP. Le fluide de travail nanofluide a augmenté l'efficacité du capteur solaire entre 20,7 % et 40 % par rapport à l'eau pure. En conclusion, les résultats expérimentaux montrent que l'utilisation du nanofluide (Ag/eau) apporte une amélioration significative au capteur solaire à tube sous vide THP. Sarafraz et al [27]. ont élaboré les performances thermiques d'un dissipateur thermique en cuivre avec un microcanal rectangulaire et les ont évaluées dans un régime d'écoulement laminaire. Des nanoparticules d'argent sont synthétisées et dispersées dans de l'eau déminéralisée comme liquide de refroidissement potentiel. La chute de pression, le facteur de frottement, le coefficient de transfert de chaleur et le paramètre de résistance thermique à l'encrassement du système sont étudiés expérimentalement pour des concentrations massiques de 0,01 %, 0,05 %, et 0,1 %. Les résultats ont montré que le coefficient de transfert de chaleur du microcanal est amélioré lorsque l'eau déminéralisée (en tant que liquide de refroidissement traditionnel) est remplacée par le nanofluide. Il est important de noter qu'une légère augmentation de la chute de pression, du facteur de frottement, et du paramètre de résistance thermique à l'encrassement est signalée lorsque le nanofluide est utilisé dans le système. Avec une augmentation du débit et de la concentration massique du nanofluide, le coefficient de transfert de chaleur et la chute de pression du dissipateur thermique à microcanaux (MCHS) ont augmenté. De même, le coefficient de transfert de chaleur local et la résistance thermique globale du microcanal ont diminué avec la longueur du microcanal. Le coefficient de transfert de chaleur le plus élevé (en tant qu'indice de performance thermique) est également observé dans la région d'entrée du microcanal. La valeur la plus élevée pour la résistance thermique à l'encrassement est observée pour la concentration massique la plus élevée de nanofluide, qui était de 1,07 % en poids = 0,1. Le débit de fluide s'est avéré améliorer le paramètre de résistance thermique à l'encrassement sur les 1000 minutes d'opération. Malgré l'amélioration du paramètre de résistance thermique à l'encrassement et du facteur de frottement, il y a une concentration optimale pour le nanofluide argent-eau dans laquelle la performance thermique globale du système est maximisée, de sorte que la performance thermique globale du système puisse être améliorée jusqu'à 37 % au nombre

de Reynolds 1400 et à % en poids = 0,05. Zeeshan Shehzad et Ellahi [28]. ont étudié l'activation de l'énergie dans un flux radiatif Couette-Poiseuille MHD de nanofluide dans des conditions aux limites avec un canal horizontal avec convection. Le flux d'analyse actuel décrit efficacement le modèle mathématique de Buongiorno. Mohsen Izadi Maleki et al [29]. ont étudié numériquement le transfert thermique d'un nanofluide hybride sous l'influence d'un champ magnétique instable à l'intérieur d'une cavité poreuse. Umoren S A et al [30]. ont préparé des nanofluides de chitosane/argent en utilisant des extraits de Phoenix Dactylifera (DPLE) ou de Rumex vesicarius (HEL) comme agents réducteurs. Les nanofluides sont caractérisés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), ultraviolet-visible (UV-vis), diffraction des rayons X (XRD) et microscope électronique à transmission (MET). L'effet antimicrobien des nanofluides contre des bactéries à Gram positif (*Bacillus licheniformis*, *Staphylococcus haemolyticus*, *Bacillus cereus* et *Micrococcus luteus*) et à Gram négatif (*Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas citronellolis* et *Escherichia coli*) est étudié. Les nanoparticules étaient polydispersées dans la matrice de chitosane et présentaient une grande stabilité. Le potentiel zêta des nanoparticules d'argent dans les composites médiés par DPLE et HEL était respectivement de +46 mV et +56 mV. Les résultats FTIR ont révélé que les groupes carboxylates libres dans le biomatériau végétal ont participé au processus de stabilisation. Ainsi, HEL s'est avéré être un agent réducteur plus puissant que le DPLE, et les nanoparticules générées avec HEL (8,0–36 nm) étaient plus petites que celles produites avec DPLE (10–43 nm). Les composites médiés par DPLE et HEL ont inhibé efficacement la croissance des bactéries étudiées, mais le composite médié par HEL a montré un effet antimicrobien plus élevé. L'activité antimicrobienne supérieure du composite à médiation HEL est attribuée à la présence de nanoparticules plus petites. Ces résultats suggèrent que l'extrait d'HEL peut être utilisé dans la production écologique de nanofluides antimicrobiens potentiels de chitosane/argent pour des applications biomédicales et d'emballage. Pourhoseini et al [31]. sont penchés sur l'effet de l'injection à faible débit de nanofluide argent-eau sur l'amélioration des caractéristiques thermiques et radiatives, ainsi que sur la réduction des émissions de NO<sub>x</sub> dans la flamme de gaz naturel. Leur étude a montré que l'injection de nanofluide améliore le rayonnement infrarouge de la flamme de gaz naturel, créant une distribution uniforme et de grande valeur du flux de chaleur radiative. De plus, l'injection de nanofluide a contribué à réduire les émissions de NO<sub>x</sub> jusqu'à 22,6%, attribuée à la diminution de la température maximale de la flamme et à l'augmentation de la concentration des radicaux OH dans la zone de réaction de la flamme. Yang et Du [32]. ont fourni un résumé des nanofluides non Newtoniens, en se concentrant sur les modèles Power-law et Bingham, suivis d'études empiriques sur des fluides non Newtoniens

ou nanofluides. Amine et al [33]. ont récemment étudié le comportement d'une enceinte triangulaire remplie d'un nanofluide sous la convection naturelle de la magnétohydrodynamique, équipée d'un bloc rotatif circulaire. Alklaibi et al [34]. ont réalisé une étude expérimentale sur l'efficacité des nanofluides hybrides MWCNT / Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> à base d'eau en tant que liquide de refroidissement dans un échangeur de chaleur à plaques. Leur recherche a révélé que l'utilisation de nanofluides MWCNT + Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> /eau améliore les performances de l'échangeur de chaleur à plaques sur plusieurs paramètres, et cette amélioration augmente avec la concentration de nanoparticules et la vitesse d'écoulement du liquide de refroidissement. Dans une autre étude, Roubi A et al [35]. ont examiné le transfert de chaleur mixte bidimensionnel dans trois cavités différentes avec ouverture d'entrée/sortie. La source de chaleur est située sur une partie de la paroi inférieure. Plusieurs paramètres tels que ( $10 \leq Re \leq 150$ ), ( $0,1 \leq Ri \leq 10$ ), ( $0 \leq Ha \leq 100$ ) et ( $0,02 \leq \phi \leq 0,08$ ) sont analysés sur trois modèles distincts. Les résultats ont indiqué une variation en présence du champ magnétique, avec une augmentation du nombre de Reynolds entraînant une diminution de la vitesse du flux de chaleur. La valeur du transfert de chaleur a atteint un maximum dans la deuxième cavité, tandis qu'elle était faible dans la première et la troisième cavité. De plus, une amélioration de  $Nu_{avg}$  est observée au niveau de la deuxième cavité du mur droit, qui est repliée vers l'intérieur. Cette dernière se caractérise par un  $Nu_{avg}$  faible par rapport au premier et au deuxième. L'amélioration de Ha a conduit à un meilleur transfert de chaleur par convection. De plus, avec l'augmentation de la concentration des nanofluides, le nombre moyen de Nusselt dans les trois cavités a augmenté. On espère que ces résultats seront utiles pour optimiser la convection. Dans une étude connexe, Ghali, D et al [36]. ont exploré le transfert de chaleur dans une cavité symétrique à deux demi-cylindres. Cette recherche a évalué plusieurs paramètres tels que ( $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ ), ( $10^5 \leq Da \leq 10^2$ ), ( $0,02 \leq \phi \leq 0,08$ ), ( $0,2 \leq \epsilon \leq 0,8$ ) et ( $0 \leq Ha \leq 100$ ). Le champ magnétique et le gradient de température sont pris en compte, et le modèle géométrique est décrit à l'aide d'une technique de symétrie. Les équations gouvernantes sont résolues par la Méthode des Éléments Finis de Galerkin (G-FEM) avec l'application du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS®. Les résultats indiquent des variations dans l'impact du paramètre magnétique, avec une augmentation de la transmission de chaleur lorsque la paroi droite est en retrait vers l'intérieur. La transmission de chaleur diminue considérablement lorsque le mur droit est exposé à l'extérieur. Le nombre de Nusselt croît proportionnellement au nombre de nanofluides dans l'environnement. En outre, les milieux poreux avec des faibles nombres de Darcy et Hartmann, une porosité élevée et une faible fraction volumique présentent des nombres de Nusselt élevés. Les lignes de courant montrent des doubles flux pour le côté chaud et un simple refroidissement

pour les nombres de Darcy, Rayleigh et Hartmann. Des isothermes froides sont nécessaires dans la cavité supérieure pour divers paramètres physiques, où le nombre de Rayleigh et la fraction volumique solide augmentent le nombre de Darcy, améliorant ainsi la transmission de chaleur et l'entropie thermique détermine les composants d'entropie. Roubi A et al [37]. ont présenté un travail portant sur la mesure de l'entropie générale et des échanges thermiques à l'intérieur d'une cavité de forme carrée en modifiant les parois froide et chaude dans quatre cas remplis d'un nanofluides hybride ( $Al_2O_3-Ag/eau$ ), avec un cylindre installé à l'intérieur. Après la validation du modèle, une étude paramétrique est réalisée en fonction du nombre de Rayleigh ( $Ra$ ), du nombre de Hartman ( $Ha$ ), du nombre de Darcy ( $Da$ ), de la fraction volumique solide ( $\phi$ ) et de la porosité ( $\epsilon$ ). Une méthode efficace d'éléments finis est employée pour résoudre le problème de l'écoulement sous forme adimensionnelle des équations gouvernantes vers l'écoulement et les comportements thermiques du nanofluides, qui est laminaire et incompressible. À l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS, les équations d'énergie, de mouvement et de continuité sont résolues. Les calculs du nombre de Nusselt sont présentés pour quantifier le transport de chaleur par convection mixte. Dans les cas étudiés, la génération d'entropie s'améliore quel que soit l'emplacement de la paroi chauffée, sauf pour le troisième cas, où elle est plus élevée que les autres. Les résultats démontrent une augmentation du nombre de Rayleigh ( $Ra$ ), un nombre de Nusselt moyen et une production d'entropie plus élevés. Le taux de transfert de chaleur (HTR) peut être ajusté efficacement en utilisant le champ magnétique. L'observation cruciale faite à travers cet effort est le processus de production d'entropie dans la troisième cavité, où la paroi chaude médiate la paroi droite. Redouane, F et al [38]. ont récemment entrepris une étude sur la convection et l'entropie d'un nanofluides hybride dans une chambre cylindrique. À l'intérieur du cylindre, ils ont ajouté une ailette rectangulaire avec une température  $T_h$ , tandis que  $T_c$  était appliqué sur le mur ondulant droit. Une isolation est installée sur les murs du haut et du bas. Cette recherche inclut également l'induction d'un champ magnétique permanent. Les équations gouvernantes sont résolues par la Méthode des Éléments Finis de Galerkin (GFEM), et différentes caractéristiques du fluide, telles que la porosité, la rayonne cylindrique et la taille des nanoparticules, ainsi que les nombres de Rayleigh, Hartmann et Darcy, sont prises en compte. Ces informations sont cruciales pour contrôler le débit de fluide et le taux de transfert de chaleur dans le cadre de la convection normale. Les résultats de la solution indiquent que  $Da$  influence l'entropie, entraînant une diminution de la génération d'entropie. La moyenne de Nusselt varie en ligne droite avec la dynamique et le domaine des flux traverse les modes sublimes tout en agissant à l'opposé de la force magnétique. Une nouveauté de cette étude réside dans l'utilisation d'une ailette rectangulaire à l'intérieur d'une enceinte cylindrique, ainsi que

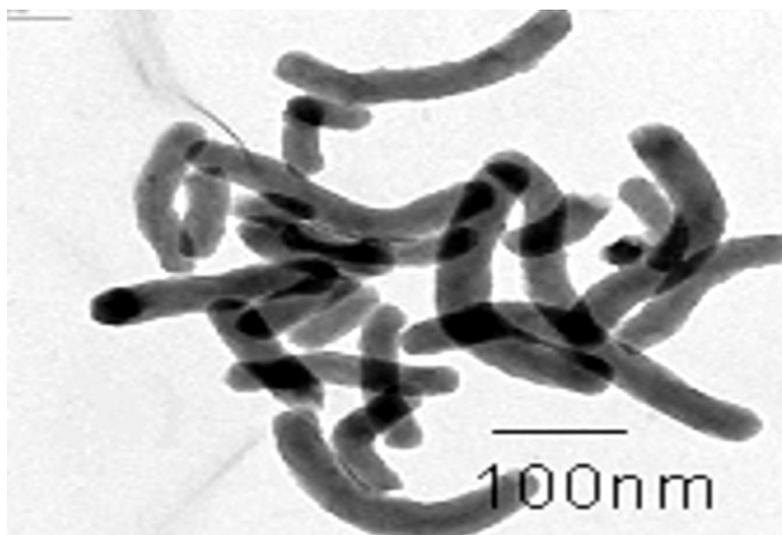
dans l'évaluation de ses dimensions optimales. De plus, elle comble une lacune de recherche en examinant l'effet de la forme spécifique des parois de la chambre poreuse sur le flux de chaleur.

### I.3. Définition d'un nanofluide.

Le nanofluide est un fluide composé d'un assemblage d'un liquide et de milliers d'atomes microscopiques d'un certain matériau. Le liquide qui constitue le nanofluide est appelé liquide de base, et les atomes sont appelés les nanoparticules. Ces nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire.



**Figure I.1.** Échelle des dimensions (1 nanomètre = 10<sup>-9</sup> m = 10<sup>-6</sup> μm = 10<sup>-3</sup> mm).



**Figure I.2.** Images des nanoparticules de silice à facteur de forme obtenues par Microscopie Électronique à Transmission [39].

### I.4. Fluides de base.

Le choix du fluide de base dépend de la nature des nanoparticules et assure la stabilité de la suspension dans le temps, tout en évitant tout phénomène d'agrégation.

### **I.4.1. Les fluides de base plus utilisés.**

- Huiles.
- Fluides de réfrigération (R12, R22 ... ect)
- Ethylène-glycol, EG.
- Eau.

### **I.5. Types de nanoparticule.**

- Les nanoparticules sphériques peuvent être fabriquées à partir de plusieurs types de matériaux. Parmi ces matériaux, on trouve notamment les nanoparticules sphériques à base de métaux. (Cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou (Oxydes de cuivre CuO, oxyde d'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, oxyde de titane TiO<sub>2</sub>...).
- Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO<sub>2</sub>, Nanotube de silicium...).



**Figure I.3.** Image du nano-fluide Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [40].

### **I.6. Les nanoparticules plus utilisées pour obtenir des nano fluides :**

#### **I.6.1. Nanoparticules métalliques.**

- Cuivre, Cu.
- Argent, Ag.
- Silicone, Si.

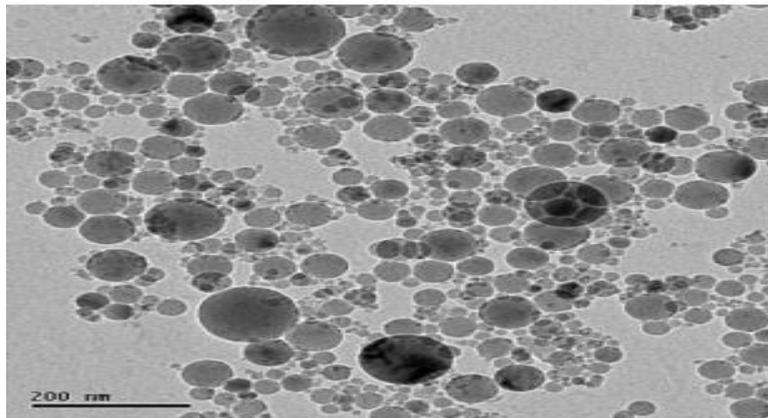
- Or, Au.
- Aluminium, Al.

### **I.6.2. Nanoparticules des oxydes métalliques.**

- Oxyde de titanium,  $TiO_2$ .
- Oxyde de silicium,  $SiO_2$ .
- Oxyde d'aluminium,  $Al_3O_2$ .
- Oxyde de cuivre,  $CuO$ .

### **I.6.3. Nano particules non-métallique.**

- Diamant, C.
- Nanotubes de carbone, CNT.



**Figure I.4.** Photographie du nano-fluide  $Al_2O_3$  [40].

## **I.7. Synthèse de nano fluides.**

La synthèse de nanofluides peut être réalisée en utilisant plusieurs méthodes, généralement regroupées en deux catégories distinctes:

### **I.7.1. Procède physique.**

Ce procédé subdivise un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique. Il présente d'importantes limitations, car il ne permet pas un contrôle précis des distributions de taille. Pour obtenir un

meilleur contrôle de la taille et de la morphologie, on peut utiliser d'autres méthodes physiques plus sophistiquées, telles que:

- ✓ La pulvérisation d'un matériau cible, par exemple à l'aide d'un plasma (pulvérisation cathodique), ou d'un faisceau laser intense (ablation laser). K. Sakuma et K. Ishii [41] ont Ainsi synthétisés des nanoparticules magnétiques de Co-Pt et Fe de taille 4 à 6 nm.
- ✓ Le chauffage à très haute température (évaporation thermique) d'un matériau de manière à ce que les atomes qui le constituent s'évaporent. Ensuite un refroidissement adéquat de ces vapeurs permet une agglomération en nanoparticules.

**Remarque :**

L'agglomération est un processus au cours duquel les nanoparticules s'agglutinent. Cela résulte des larges surfaces possédées par les nanoparticules et des espèces chimiques supplémentaires présentes dans les nanofluides, favorisant ainsi l'interaction entre elles.

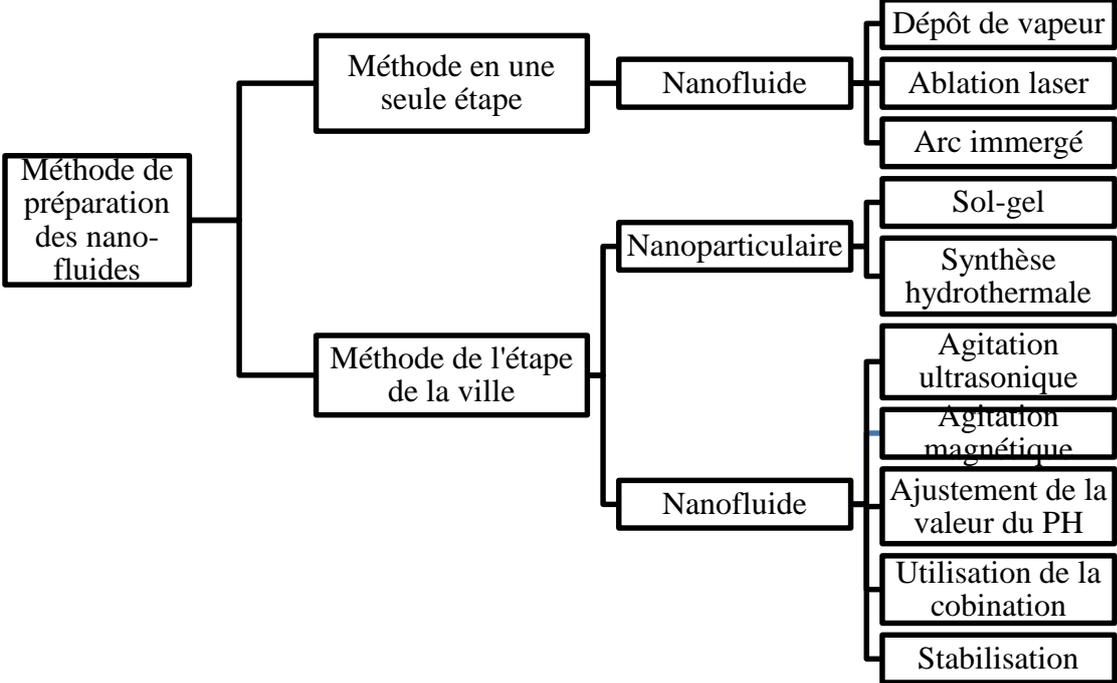
### **I.8. Préparation des nanofluides.**

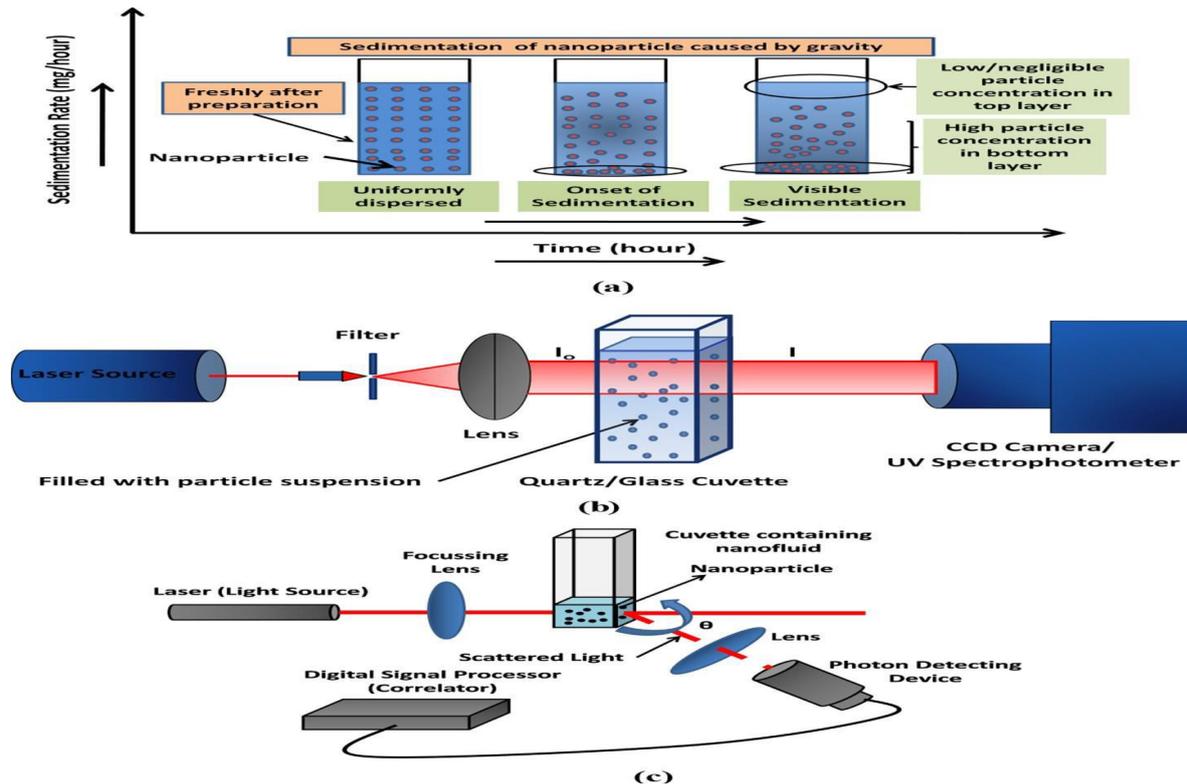
Le Tableau I.1 Comprend une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base, illustrée ci-dessous. Il existe principalement deux méthodes de production de nanofluides, à savoir la technique en deux étapes et la technique en une étape.

**Tableau I.1.** Combinaisons nanoparticules/fluides de base [42].

Désignation	Acétone	Eau	Ethylène glycol	Huile	Toluène	Décène	Ethanol
SiO <sub>2</sub>		X	X				
Cu	X	X	X	X			
CuO		X	X				
Fe			X				
TiO <sub>2</sub>		X	X				
Fe			X				
Ag		X		X			
C (diamant)		X					

ZrO <sub>2</sub>		X					
C (NTC)		X		X		X	
WO <sub>3</sub>			X				
C (fullerène)				X	X		
Sic		X					





**Figure I.5.** Schéma des différentes techniques d'estimation de la stabilité des nanofluides ;  
 (a) mesure de sédimentation, (b) mesure de transmittance/absorbance et (c) mesure de diffusion dynamique de la lumière.

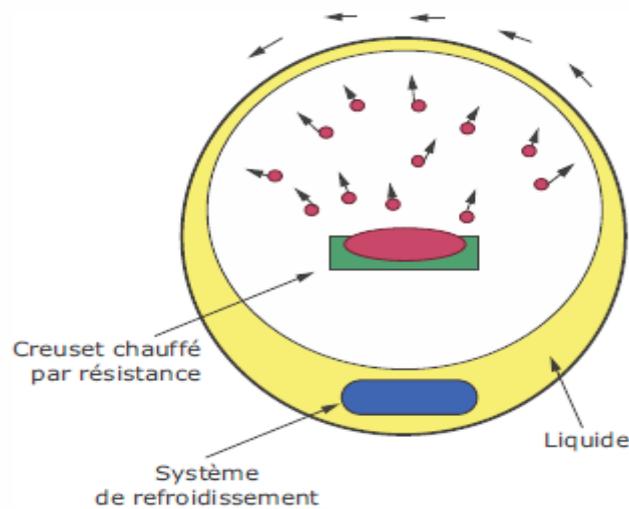
### I.8.1. Méthode à deux étapes [42].

La méthode en deux étapes est la plus couramment utilisée pour la préparation des nanofluides. Les nanoparticules, nanofibres, nanotubes ou autres nanomatériaux utilisés dans cette méthode sont d'abord produits sous forme de poudres sèches par des procédés chimiques ou physiques. Ensuite, la poudre nano-saturée est dispersée dans un fluide lors de la deuxième étape de traitement à l'aide d'une agitation intensive ou de la force magnétique.

La technique en deux étapes est avantageuse lorsqu'on envisage la production de nanoparticules à grande échelle. En raison des défis associés à la préparation de nanofluides stables par une méthode en deux étapes, plusieurs techniques avancées sont développées pour produire des nanofluides, y compris la méthode en une étape.

### **I.8.2. Méthode en une étape [38].**

Cette méthode combine la production de nanoparticules et la dispersion de ces nanoparticules dans le fluide de base en une seule étape. Le processus en une étape consiste à produire et à disperser simultanément les particules dans le fluide. Avec cette méthode, les processus de séchage, de stockage, de transport et de dispersion des nanoparticules sont évités, minimisant ainsi l'agglomération des nanoparticules et augmentant la stabilité des fluides. Les processus en une étape permettent de préparer des nanoparticules uniformément dispersées, et les particules peuvent être suspendues de manière stable dans le fluide de base.



**Figure I.6.** Procède de synthèse de nanofluid en une seule étape (Argonne National Laboratory, USA) [42].

### **I.8.3. Méthodes physiques.**

La méthode la plus simple consiste à subdiviser un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique. Cependant, cette méthode présente d'importantes limitations car elle ne permet pas un contrôle précis des distributions de taille.

Afin d'obtenir un meilleur contrôle de la taille et de la morphologie, on peut utiliser d'autres méthodes physiques plus sophistiquées, telles que :

- ✓ La pulvérisation d'un matériau cible, par exemple à l'aide d'un plasma (Pulvérisation cathodique), ou d'un faisceau laser intense (Ablation laser). H. Sakuma et K. Ishii [41] ont ainsi synthétisé des nanoparticules magnétiques de Co-Pt et Fe de taille 4 à 6 nm.
- ✓ Le chauffage à très haute température (Evaporation thermique) d'un matériau de

manière que les atomes qui le constituent s'évaporent. Ensuite un refroidissement adéquat de ces vapeurs permet une agglomération en nanoparticules [43].

En général, les méthodes physiques nécessitent un matériel coûteux pour un rendement en nanoparticules souvent très limité. Les nanoparticules ainsi synthétisées sont la plupart du temps déposées ou liées à un substrat.

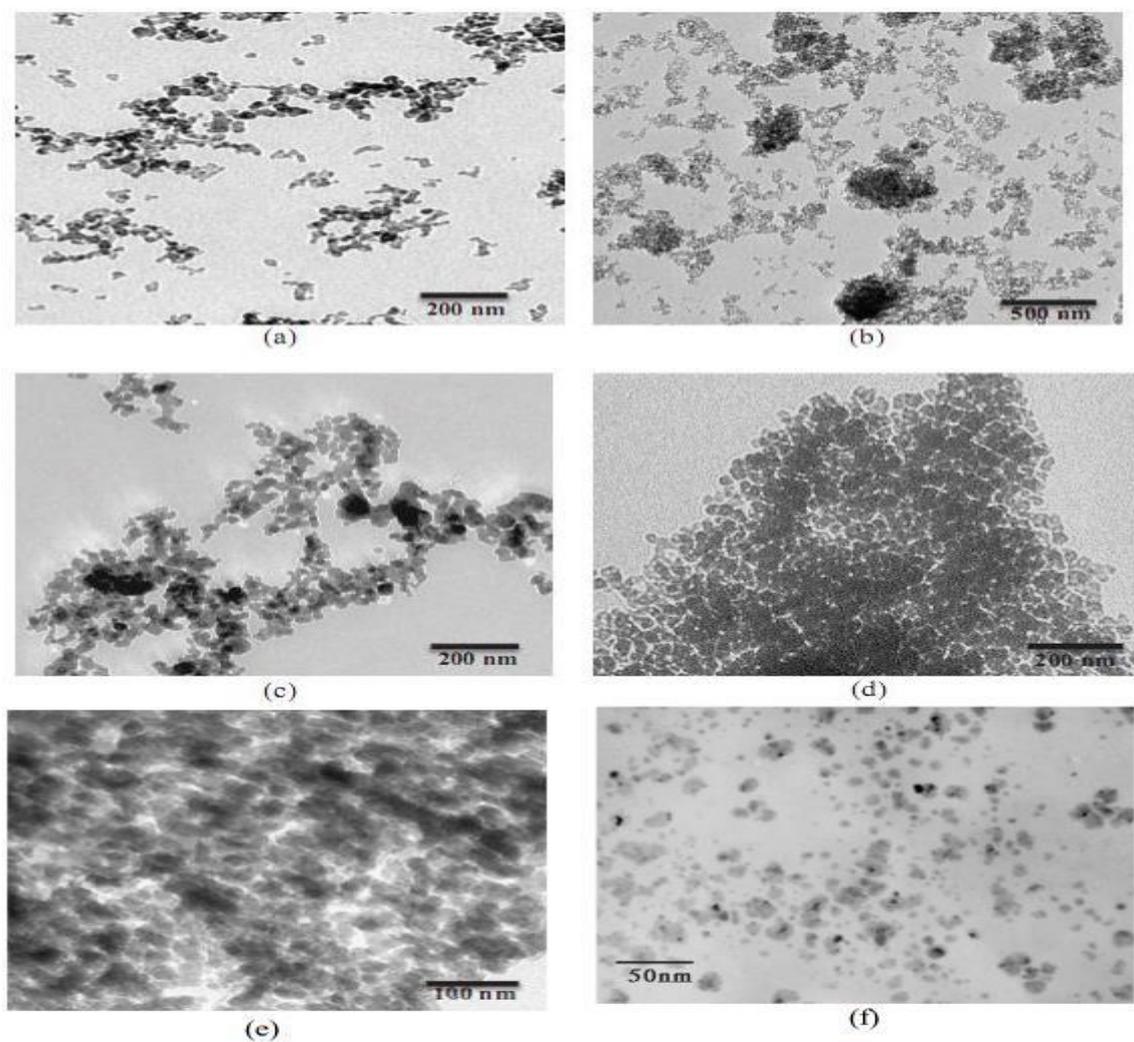
#### **I.8.4. Méthodes chimiques.**

Aujourd'hui, un grand nombre de méthodes de synthèse par voie chimique sont disponibles, présentant l'avantage d'être généralement simples à mettre en œuvre, souvent quantitatives et peu coûteuses. Ces méthodes permettent d'obtenir des particules avec une distribution de tailles relativement étroite et des morphologies variées.

Comme dans le cas de la voie physique, les nanoparticules peuvent être synthétisées sous deux formes : libres à l'état de poudre, relativement facile à disperser dans un liquide ou un gel hôte, ou enrobées dans une matrice solide (comme la silice mésoporeuse) ou un polymère. Les méthodes chimiques les plus couramment utilisées incluent :

##### **I.8.4.1. Décomposition de précurseurs organométalliques.**

L'utilisation de précurseurs organométalliques permet d'élaborer différents systèmes de nanoparticules. Le procédé repose sur la décomposition, dans un solvant organique judicieusement choisi, d'un composé organométallique, dans lequel le métal est généralement à bas degré d'oxydation. Ceci permet d'éviter l'emploi de réducteurs chimiques puissants qui engendrent souvent des impuretés adsorbées à la surface des particules et difficiles à éliminer. La décomposition est réalisée par élimination des ligands de coordination. Cette élimination se fait en général par chauffage. D. K. Lee et al [44]. Ils ont élaboré des nanoparticules de 13 nm de Cobalt et de Fer par décomposition thermique de  $\text{CoCl}_2$  et  $\text{FeCl}_2$ , en présence de polymères organiques.



**Figure I.7.** Image de : a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13 nm) ; b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (50 nm) ; c) TiO<sub>2</sub> (21 nm) ; d) SiO<sub>2</sub> (5~15 nm) ; e) SiO<sub>2</sub> (10~20 nm) et f) Cu nanoparticules dispersé dans l'eau [45].

#### **I.8.4.2. Voie radiolytique.**

Le principe de la synthèse radiolytique des nanoparticules consiste à réduire des ions métalliques en solution au moyen d'espèces produites, généralement des électrons, par radiolyse. Dans de telles solutions, les ions métalliques en solution sont en concentration suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas d'effet direct des rayonnements sur ces ions. La synthèse peut donc se décrire en deux parties : la radiolyse du solvant, et les réactions de réduction des ions métalliques par les espèces produites par radiolyse, suivies par la coalescence des atomes produits. R. Benoit et al [46] ont ainsi synthétisé des nanoparticules de bismuth dans de la silice. Les méthodes chimiques ont souvent un rendement bien supérieur à celui des méthodes physiques.

## **I.9. Magnétisme.**

Le magnétisme représente un ensemble de phénomènes physiques dans lesquels les objets exercent des forces attractives ou répulsives sur d'autres matériaux. Les courants électriques et les moments magnétiques des particules élémentaires fondamentales sont à l'origine du champ magnétique qui engendre ces forces.

Tous les matériaux sont influencés, de manière plus ou moins complexe, par la présence d'un champ magnétique. L'état magnétique d'un matériau dépend de sa température (et d'autres variables telles que la pression et le champ magnétique extérieur). Ainsi, un matériau peut présenter différentes formes de magnétisme en fonction de sa température.

## **I.10. Définition de Champ Magnétique.**

Le champ magnétique est une grandeur ayant le caractère d'un champ vectoriel, c'est-à-dire caractérisée par la donnée d'une norme, d'une direction et d'un sens. Il est défini en tout point de l'espace et permet de modéliser et quantifier les effets magnétiques du courant électrique ou des matériaux magnétiques, tels que les aimants permanents.

La présence du champ magnétique se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement (force de Lorentz) et par divers effets affectant certains matériaux. La grandeur qui détermine l'interaction entre un matériau et un champ magnétique est la susceptibilité magnétique. Les différentes sources de champ magnétique sont les aimants permanents, le courant électrique (c'est-à-dire le déplacement d'ensemble de charges électriques), ainsi que la variation temporelle d'un champ électrique (par induction électromagnétique).

## **I.11. Effet du champ magnétique sur la génération d'entropie dans les nanofluides.**

Il est clairement apparu que le champ magnétique et l'ondulation de la cavité ont une grande importance sur la performance des systèmes thermiques. Cette importance a motivé Cho [47] à étudier l'influence d'un champ magnétique sur le transfert de chaleur par convection naturelle et la génération d'entropie du nanofluide (Cu-eau) dans une cavité à surfaces ondulées complexes.

Il a examiné les effets du nombre de Hartmann, du nombre de Rayleigh, du nombre d'Eckert, de la fraction de volume des nanoparticules et des paramètres géométriques de la paroi ondulée

sur le nombre de Nusselt, la génération d'entropie et le nombre de Bejan. Il a montré qu'à des valeurs plus élevées du nombre de Rayleigh, le nombre moyen de Nusselt diminue et la génération totale d'entropie augmente à mesure que le nombre de Hartmann augmente.

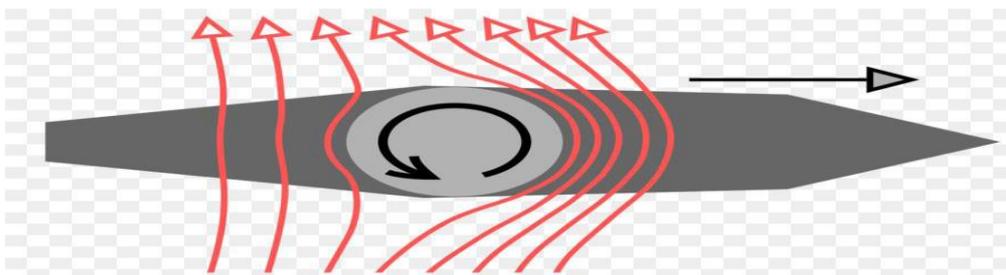
Toutefois, pour des faibles nombres de Rayleigh, le nombre de Hartmann a un effet mineur sur le nombre moyen de Nusselt et la production totale d'entropie. Ensuite, un effet de transfert de chaleur optimal et une génération d'entropie totale minimale peuvent être obtenus lorsqu'une longueur d'onde appropriée de la surface ondulée est appliquée à la cavité. Le nombre moyen de Nusselt diminue et la génération d'entropie totale augmente avec une amplitude d'ond croissante de la surface ondulée lorsqu'un nombre de Rayleigh élevé est possible.

Enfin, le nombre de Bejan diminue avec un nombre croissant d'Eckert, mais il augmente avec un nombre croissant de Hartmann [48].

## **I.12. Effet Magnus.**

Le phénomène naturel exploité par Norsepower est un principe dénommé « effet Magnus », du nom du physicien allemand Heinrich Gustav Magnus. Il est le premier à avoir décrit mathématiquement, en 1852, le courant d'air qui entoure un objet en rotation, tel qu'une balle de tennis par exemple.

La force de portance de l'effet Magnus, aujourd'hui appelée un rotor Flettner, est adoptée comme mode de propulsion principal par le Buckau, un navire à rotors qui a traversé l'Atlantique en 1926. Une partie de la paternité de cette technologie revient également à l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius qui, en 1924, a créé et donné son nom à un rotor doté d'un cylindre ouvert à l'écoulement de l'air.



**Figure I.8.** Rotor Flettner sur un navire [49].

D'autre part, les éoliennes restent une application directe de l'effet Magnus. Citons, entre autres, l'éolienne de Madaras et l'éolienne à rotors de Flettner. Ces éoliennes sont basées sur l'utilisation de l'effet Magnus. Le système est constitué de deux cylindres rotatifs. Dès qu'il y a du vent, la rotation de chaque cylindre est assurée par un moteur à courant continu.

### **I.13. Ecoulement autour d'un cylindre.**

L'écoulement autour d'un cylindre est un phénomène qui se produit fréquemment dans la pratique. Il est indispensable dans la conception mécanique et thermique de nombreux systèmes en ingénierie, tels que les éoliennes, les bâtiments, les composants électroniques, les aubes de turbines, etc.

L'écoulement d'un fluide à faible nombre de Mach ( $Ma \leq 0.3$ ) est considéré comme incompressible. La dimensionalisation des équations régissant cet écoulement dépend du nombre de Reynolds et des conditions aux limites et initiales. Dans ces conditions, l'écoulement autour du cylindre dépend uniquement du nombre de Reynolds.

De nombreuses études ont déjà abordé les phénomènes thermo-hydrauliques autour d'un cylindre fixe. Ces études, qu'elles soient théoriques, numériques ou expérimentales, décrivent les différents régimes rencontrés en fonction du nombre de Reynolds ( $Re$ ). Cependant, avec les progrès réalisés en matière de méthodes numériques et de résolution d'équations, la simulation numérique permet aujourd'hui de modéliser correctement les écoulements industriels réels.

### **I.14. Ecoulement autour d'un cylindre fixe.**

L'écoulement autour d'un cylindre a fait l'objet de nombreuses études dans la littérature. Bien que cette géométrie soit simple, les régimes d'écoulement ont varié à proximité du cylindre en fonction du nombre de Reynolds, défini comme :

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} D}{\mu} \quad (I.1)$$

L'écoulement autour d'un cylindre fixe

Où

- $U_{\infty}$  : Vitesse du fluide à l'infini en amont du cylindre.
- $D$  : Diamètre du cylindre.
- $\mu$  : Viscosité cinématique du fluide considéré.

## I.15. Différents types d'écoulements.

### I.15.1. Régime d'écoulement rampant ( $Re < 5$ ).

Lorsque les effets visqueux dominant par rapport aux effets d'inertie, l'écoulement est symétrique entre l'amont et l'aval ainsi que par rapport à l'axe longitudinal du courant. Le fluide reste attaché au cylindre, et aucun décollement n'apparaît, et aucune instabilité ne se déclenche.

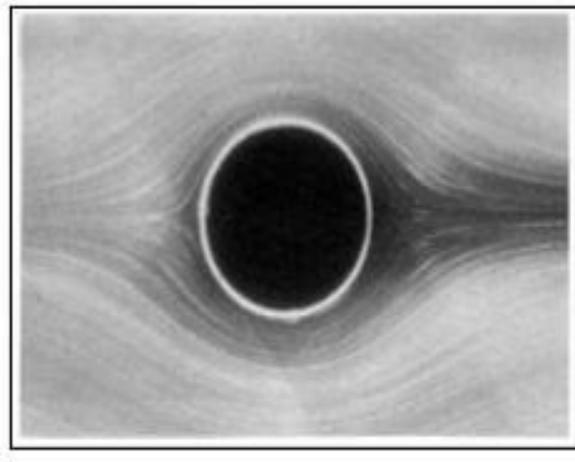
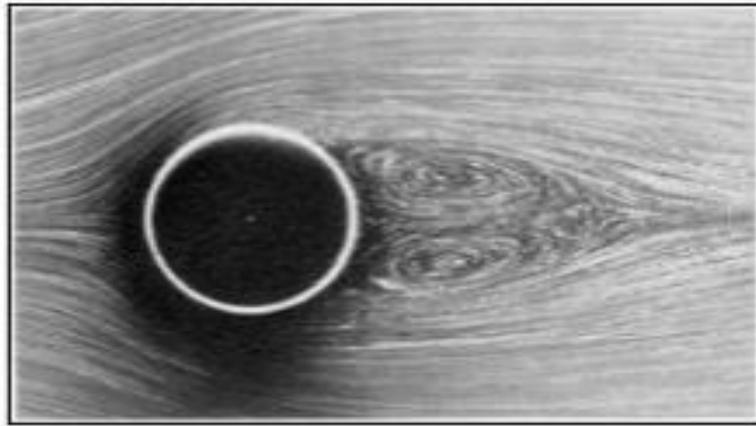


Figure I.9. Visibilité du cylindre fixe avec  $Re = 0.16$  [50].

### I.15.2. Régime laminaire stationnaire ( $5 \leq Re \leq 48$ ).

Lorsque les forces d'inertie augmentent et que l'effet visqueux n'est plus assez grand, un décollement de la couche limite apparaît dans cette région. Il se forme, en aval du cylindre, deux zones de recirculation contra-rotatives symétriques. Le point de rattachement s'éloigne du cylindre lorsque le nombre de Reynolds augmente. L'écoulement reste stable, stationnaire et symétrique par rapport à l'axe longitudinal.



**Figure I.10.** Visibilité du cylindre fixe avec  $Re = 26$  [50].

**NB :** Le point de rattachement défini comme le lieu d'annulation de la vitesse longitudinale sur l'axe longitudinal.

### **I.15.3. Instationnarité bi-dimensionnelles ( $48 \leq Re \leq 180$ ).**

L'écoulement autour du cylindre devient instationnaire. Les deux tourbillons perdent leur symétrie, et l'écoulement devient instable. Les différentes sources de perturbations ne peuvent plus être amorties, ce qui conduit au déclenchement de l'instabilité de Von Kármán. Cette instabilité est de nature bidimensionnelle. Le sillage devient périodique, et l'écoulement demeure entièrement laminaire. Le paramètre adimensionnel relatif à la fréquence du lâcher tourbillonnaire est le nombre de Strouhal:

$$St = \frac{f_k D}{U_\infty} \quad ; \quad f_k = \frac{1}{T} \quad (I.2)$$

Sur l'intervalle de valeurs du nombre de Reynolds considéré, le nombre de Strouhal augmente avec le nombre de Reynolds.



Figure I.11. Visibilité du cylindre fixe avec  $Re = 140$  [56].

#### I.15.4. Instationnarité tridimensionnelles et apparition de la turbulence ( $180 \leq Re \leq 1200$ ).

Pour  $(180 \leq Re \leq 300)$ , commence la transition vers le régime turbulent, et l'écoulement devient tridimensionnel. Un phénomène correspond au développement de l'instabilité secondaire, présenté par la naissance de tourbillons longitudinaux ainsi qu'une ondulation des rouleaux de Von Kármán dans le sens de l'envergure du cylindre.

En fonction de la longueur d'onde de l'ondulation transversale des rouleaux, deux topologies tridimensionnelles distinctes dans le sillage.

Le premier mode instable 3D est le mode A. Il est notamment observé expérimentalement. Le nombre de Reynolds critique correspondant à son seuil d'apparition se situe entre 150 et 190. Cette incertitude est sans doute due au fait que la transition est subcritique, et nécessite une amplitude minimale pour apparaître. Des précisions sont apportées par Barkley et al. [51]. Ils démontrent, à l'aide d'une analyse de Floquet, que le nombre de Reynolds critique d'apparition du mode A est en fait:  $Re = 188.5 \pm 1.0$ . Elle est caractérisée par une longueur d'onde adimensionnée par le diamètre du cylindre  $\lambda/D = 3.96 \pm 0.02$  qui est en accord avec les expériences et simulations numériques effectuées.

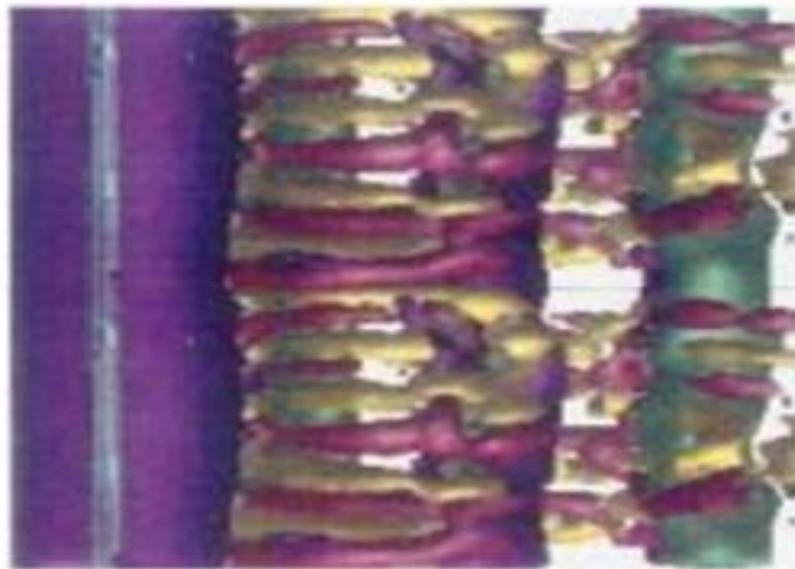
Lorsque le nombre de Reynolds dépasse 230, un second mode, appelé mode B apparaît. Ce mode avait également été prédit par l'analyse de Floquet effectuée par Barkley [51]. Il avait pu prédire le nombre de Reynolds critique  $Re \approx 259$  et la longueur d'onde adimensionnée  $\lambda/D \approx 0.82$  (longueur d'onde presque 4 fois plus petite que la longueur d'onde du mode A). Leweke et

al [52]. Montrent que le mode A et le mode B présentent des symétries différentes. En effet, les vortex longitudinaux tournent dans la direction opposée à chaque demi longueur d'onde pour le mode A. Pour le mode B, elles tournent dans la même direction.

De plus le mode B est supercritique Henderson [53], c'est-à-dire qu'il apparaît à partir d'un certain nombre de Reynolds critique pour toute amplitude de perturbation appliquée à l'écoulement. Le mode B est présent avec le mode A jusqu'à  $Re = 260$  et prédomine devant le mode A par la suite.



**Figure I.12.** Ondulation des tourbillons de Von Karman pour le mode (A) à ( $Ra = 10^6$  ;  $Re = 220$ ) Faghani et al [45].

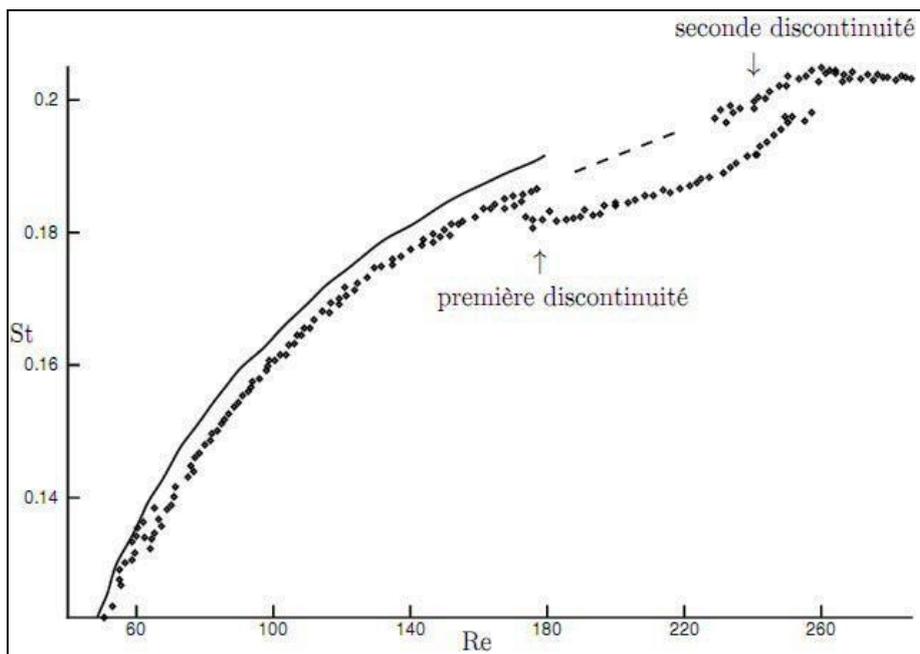


**Figure I.13.** Visualisation du mode (B) à ( $Ra = 10^6$  ;  $Re = 270$ ) Persillon et Faghani [45].

La figure montre des différents types d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds :

La discontinuité du nombre de Strouhal dans son évolution en fonction du nombre de Reynolds est observée par Persillon et Braza [54], qui ont identifié cette discontinuité par simulation numérique de l'écoulement autour d'un cylindre. Pour des nombres de Reynolds proches du mode B, on observe l'apparition du phénomène de dislocations des tourbillons primaires, marquant le début de la transition vers la turbulence. Le passage d'une dislocation est associé à des variations de vitesse significatives et à une diminution du nombre de Strouhal.

Pour les nombres de Reynolds plus élevés ( $Re > 300$ ), la transition vers la turbulence est attribuable à un état saturé non linéaire d'un mode d'instabilité absolue de l'écoulement. L'émergence de la turbulence se manifeste par la multiplication de structures désordonnées à petite échelle, bien que le sillage soit encore largement dominé par les structures de l'allée de Kármán.

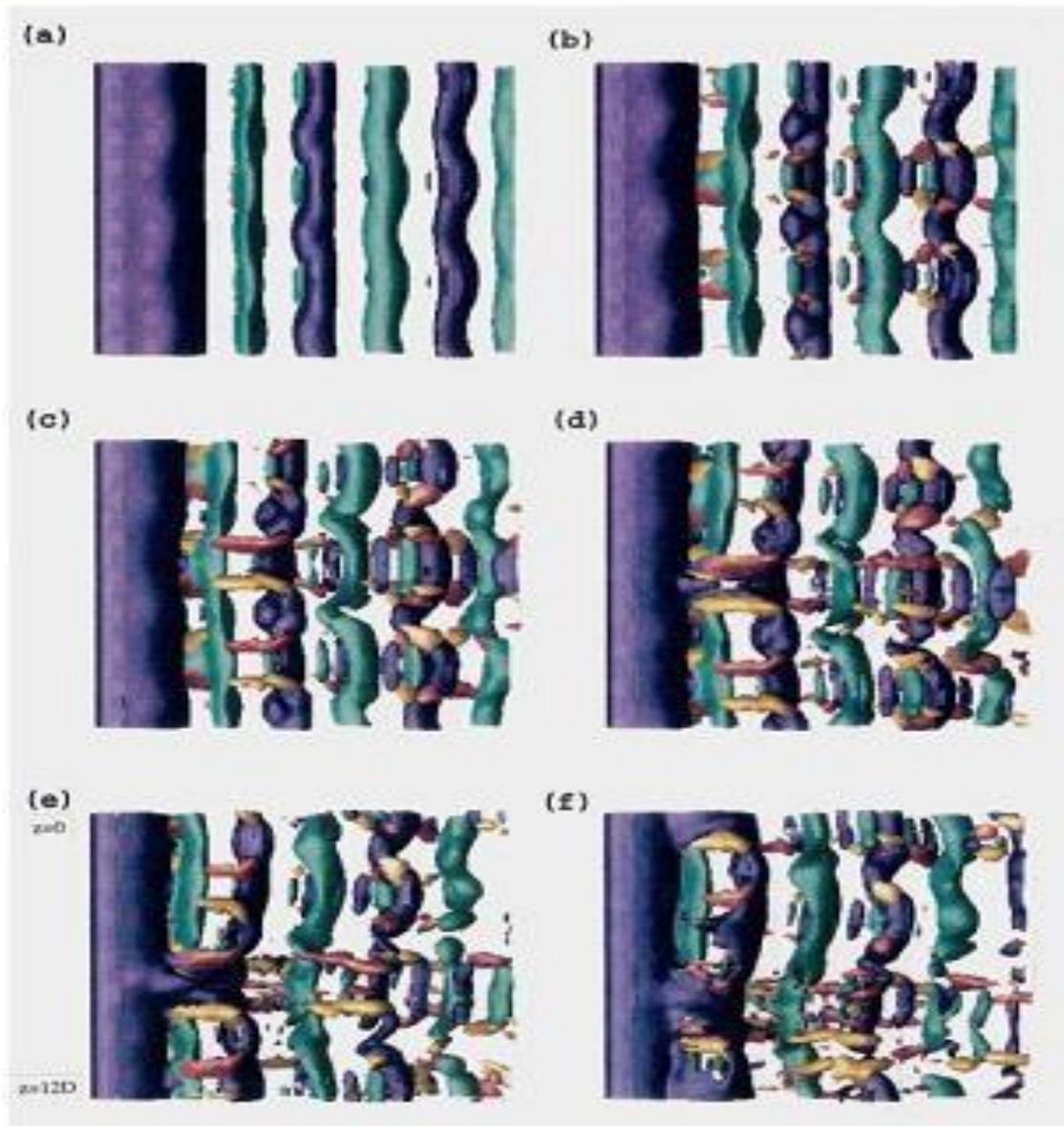


**Figure I.14.** Variation du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds, apparition des effets tridimensionnels autour de  $Re \approx 180$  Zdravkovich [55] (écoulement parallèle en traits continus et oblique en points).

Dans ces conditions, l'écoulement est caractérisé par une longueur de transition, en aval du cylindre, très faible (définie comme étant la distance nécessaire aux instabilités pour s'amplifier et former des structures de taille variables), de l'ordre du diamètre du cylindre.

L'étude de cette zone fait ressortir deux propriétés importantes :

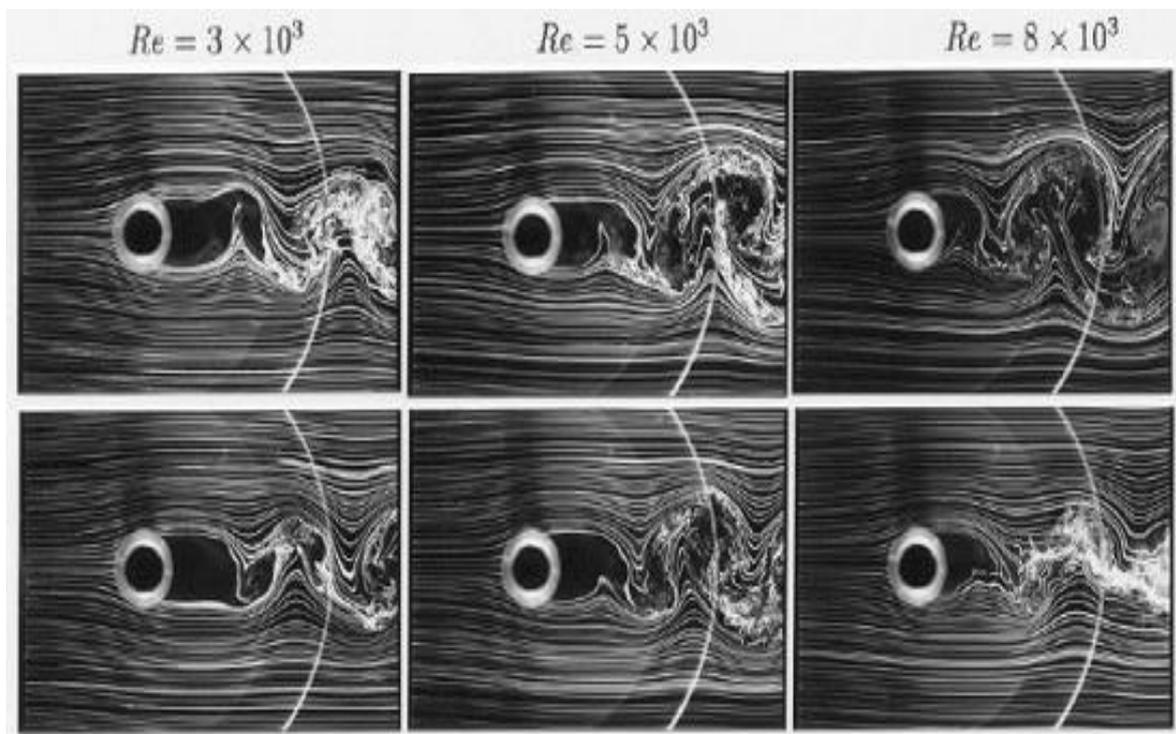
- a. Les instabilités qui produisent les allées de Von Kármán sont uniquement 2D.
- b. Des oscillations à basse fréquence et à bas nombre de Reynolds, présentes dans la zone de transition, sont associées au caractère tridimensionnel du sillage et sont à l'origine de l'apparition de la turbulence.



**Figure I.15.** Phénomène de dislocations à ( $Re = 220$ ), transition de couches de cisaillement ( $1200 \leq Re \leq Rec$ ) Faghani et al [44].

La plage de ce régime peut varier de  $Re_c = 2.10^5$  à  $Re_c = 1.10^6$ . Cette variation s'explique par la grande sensibilité de l'écoulement à la rugosité du cylindre ainsi qu'à la turbulence du fluide. Bien que l'écoulement devienne turbulent dans le sillage, la couche limite en amont du point de décollement demeure laminaire.

Pour  $Re$  entre 1000 et 2600, de petits tourbillons secondaires se développent de part et d'autre de l'allée tourbillonnaire suite à l'amplification de l'instabilité locale de Kelvin-Helmholtz dans les zones de cisaillement autour du cylindre. Lorsque le nombre de Reynolds augmente ( $Re \approx 2600$ ), cette instabilité est plus prononcée et couvre une région importante de la zone de mélange.

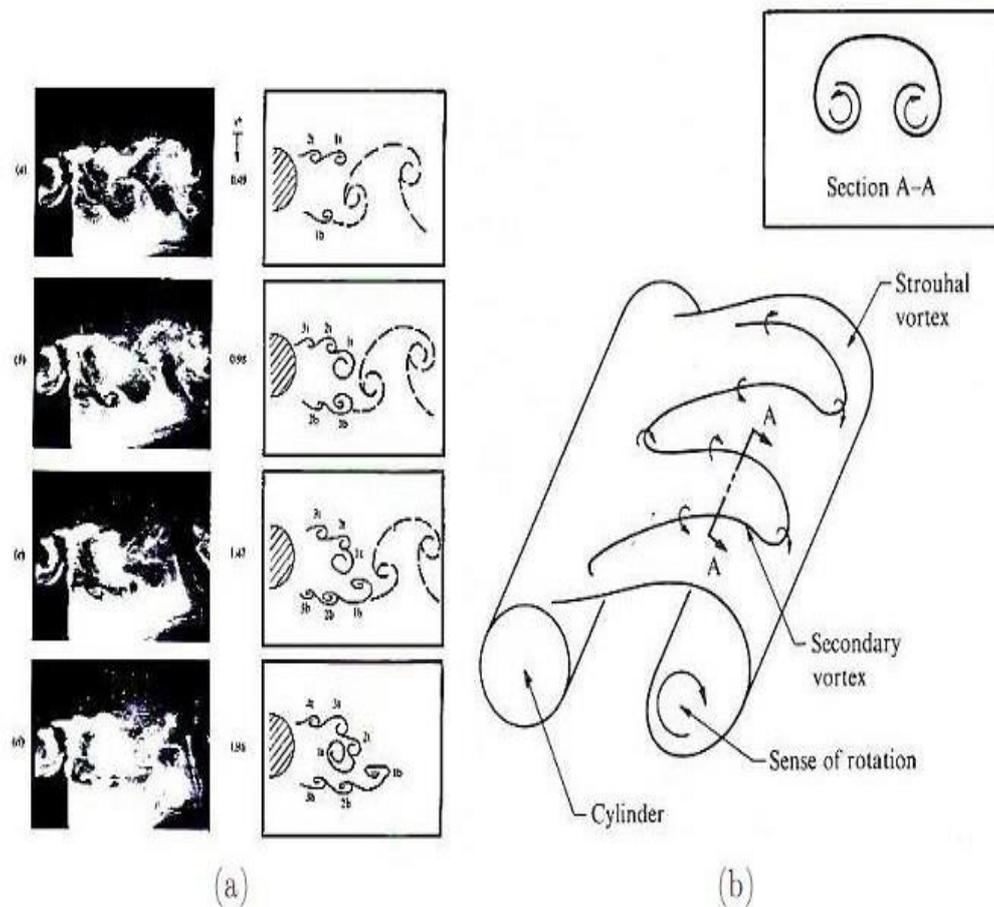


**Figure I.16.** Diminution de la zone de formation tourbillonnaire pour  $3000 < Re < 8000$ , Norberg [56].

### **I.15.5. Transition turbulente de couches limites ( $Re \geq Re_c$ ).**

La valeur du nombre de Reynolds critique varie considérablement selon les différentes études expérimentales, en raison de la grande sensibilité de l'écoulement à divers paramètres tels que la rugosité du cylindre et l'intensité turbulente de l'écoulement.

Lorsque l'écoulement atteint la valeur critique  $Re_c$ , le régime de l'écoulement est qualifié de critique, devenant supercritique au-delà de ce point. Cette étape se caractérise par la transition de la couche limite de laminaire à turbulente. Le point de décollement se déplace vers l'aval sur le cylindre, et le coefficient de traînée diminue en raison d'une largeur de sillage plus étroite, devenue inférieure au diamètre du cylindre. Une étude détaillée de ce régime est fournie par Roshko.



**Figure I.17.** (a) - Mise en évidence du mouvement tridimensionnel des tourbillons de Bloor-Gerrard. (b) - Evolution temporelle des structures de type Kelvin-Helmholtz [58].

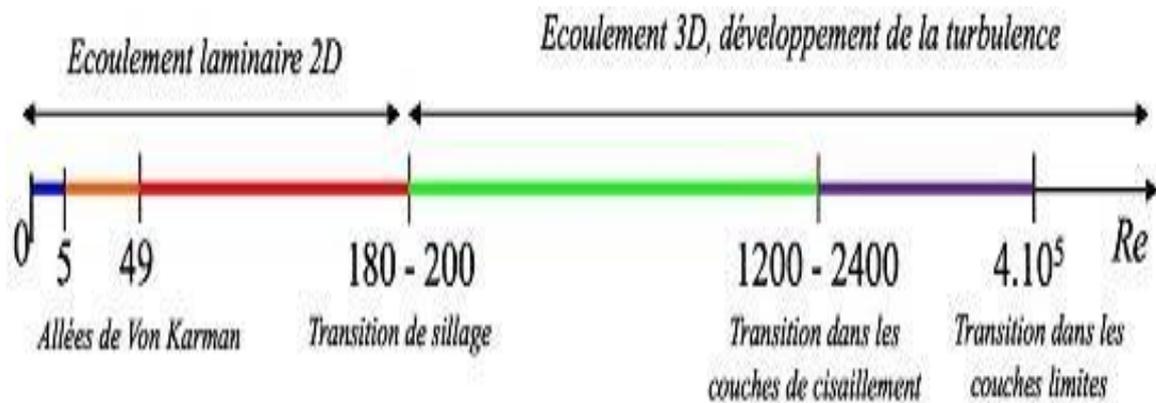


Figure I.18. Écoulement laminaire 2D à écoulement 3D.

## I.16. Transfert de chaleur [54].

La chaleur est l'énergie échangée entre deux objets en raison d'une différence de température entre ces deux objets.

Le transfert de chaleur est un processus essentiel dans le domaine de l'industrie et des technologies. Il se manifeste sous diverses formes telles que le rayonnement, la conduction et la convection. Ce dernier est particulièrement important dans certains domaines spécifiques, tels que le refroidissement des processeurs, des composants électroniques, les radiateurs et les échangeurs de chaleur, etc.

Comme la climatisation concerne le déplacement de la chaleur, il est nécessaire de comprendre comment la chaleur se propage. La chaleur est transférée d'une substance à une autre selon trois méthodes de base : le rayonnement, la conduction et la convection. Il est également possible de combiner ces méthodes.

### I.16.1. Rayonnement.

La chaleur rayonnante fait référence au transfert de chaleur par le biais d'ondes, semblables aux ondes lumineuses et aux ondes radio.

Exactement, la chaleur rayonnante n'a pas besoin de matériaux intermédiaires comme l'air pour se propager. Elle est absorbée directement par les objets qu'elle rencontre. L'exemple que vous donnez avec l'intérieur d'une voiture fermée chauffée par la chaleur rayonnante du soleil

illustre bien ce principe. La chaleur rayonnante du soleil traverse le vitrage et est absorbée par les surfaces à l'intérieur de la voiture, élevant ainsi la température.

### **I.16.2. Conduction.**

La conduction est le transfert de chaleur à travers une substance. La plupart des métaux sont d'excellents conducteurs de chaleur. Le cuivre et l'aluminium, en particulier, se distinguent par leur capacité exceptionnelle à conduire la chaleur, les rendant ainsi fréquemment utilisés.

Les mauvais conducteurs sont appelés « isolants ». Voici certains exemples d'isolants : mousses de polyuréthane, laine minérale, liège et fibres de verre.

### **I.16.3. Convection.**

La convection est le flux de chaleur fourni par un support, le plus souvent de l'air ou de l'eau. La convection peut être naturelle ou forcée.

#### **I.16.3.1. Convection naturelle.**

Elle implique des courants d'air lents et est utilisée avec succès dans de nombreux systèmes de climatisation et de réfrigération.

#### **I.16.3.2. Convection forcée.**

Elle implique l'utilisation de ventilateurs ou de soufflantes. Des pompes sont utilisées pour faire circuler des liquides chauds ou froids.

## **I.17. Conclusion.**

Dans ce chapitre, nous avons expliqué que les nanofluides sont constitués de deux composants : les fluides de base et les nanoparticules. Ils présentent des propriétés exceptionnelles telles qu'une grande conductivité thermique, des propriétés magnétiques, etc, ainsi que des capacités de refroidissement. La production de nanofluides offre une variété en fonction des besoins des consommateurs. Ces nanofluides offrent des avantages considérables en raison de leurs propriétés et peuvent être appliqués dans différents secteurs tels que la santé, l'électronique, les énergies renouvelables, entre autres. Malgré leurs propriétés remarquables, les nanofluides présentent encore des limitations, telles que l'agglomération, et sont coûteux à fabriquer.

Ce champ d'écoulement représente une phénoménologie cruciale pour de nombreux domaines techniques et physiques. Le développement de vortex alternés dans le sillage proche engendre des forces de pression susceptibles de générer des vibrations structurelles, des bruits acoustiques, et des phénomènes de résonance. Par ailleurs, nous aborderons le transfert de chaleur, un processus au cours duquel l'énergie se manifeste sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux à des températures différentes. La chaleur peut être transférée par conduction, convection, ou rayonnement. Bien que les trois processus puissent coexister, l'un des mécanismes est généralement prédominant.

Le magnétisme constitue enfin un aspect du phénomène combiné de l'électromagnétisme, représentant une classe de phénomènes physiques médiés par des champs magnétiques. Les courants électriques et les moments magnétiques des particules élémentaires engendrent un champ magnétique qui agit sur d'autres courants et moments magnétiques.

Cette thèse se concentre sur l'étude de l'écoulement laminaire dans l'intervalle ( $10 < Re < 300$ ) d'un nanofluide autour d'un cylindre circulaire fixe. L'écoulement est caractérisé par différents régimes : le régime d'écoulement rampant ( $Re < 5$ ), le régime d'écoulement stationnaire ( $5 < Re < 48$ ), et le régime instationnaire bidimensionnel ( $48 < Re < 180$ ). Bien que les nanofluides présentent plusieurs avantages, leurs limitations nécessitent encore des améliorations. Les phénomènes observés sont schématiquement résumés dans la figure I.14, illustrant les principales transitions observées.

De plus, cette thèse explore également le champ magnétique et son effet sur l'écoulement d'un nanofluide autour d'un cylindre, ajoutant une dimension particulière à l'analyse.

# CHAPITRE II

## **II.1. Introduction.**

Pour décrire des phénomènes physiques, on utilise fréquemment des équations mathématiques, lesquelles servent de modèles à ces phénomènes. Les formules mathématiques doivent ainsi rendre compte du comportement de ces phénomènes à la fois dans l'espace et dans le temps.

Dans ce chapitre, nous proposons un écoulement laminaire avec un nombre de Reynolds compris entre ( $10 \leq Re \leq 150$ ). Nous examinons une convection mixte magnétohydrodynamique dans une cavité de forme triangulaire contenant un nanofluide incompressible. Différentes configurations de cavité sont envisagées, avec un mur chauffé maintenu à une température constante, afin d'évaluer l'influence de divers paramètres sur le transfert de chaleur autour d'un cylindre fixe. Dans ce contexte, la convection forcée entre le mur chauffé et le nanofluide dans la cavité est étudiée en vue d'améliorer le transfert thermique.

Nous allons établir les équations permettant de modéliser le problème d'écoulement externe en utilisant le libellé complet de la loi de conservation. Les conditions aux limites, les hypothèses simplificatrices, et les conditions initiales nécessaires au calcul de la solution seront également présentées.

## **II.2. Mise en équations du problème.**

Il existe plusieurs méthodes pour dériver les équations fondamentales de la mécanique des fluides. Nous envisageons un volume de contrôle de base pour analyser les changements au fil du temps en termes de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Cette méthode implique un inventaire des quantités transportées et produites au fil du temps.

Commençons par introduire quelques notations et rappelons brièvement les outils Requis pour les réglages des formules.

### **II.2.1. Loi de conservation de la masse.**

Cette loi traduit le fait que la matière dans le volume de contrôle  $D_v$  n'apparaît ni ne disparaît au cours de son mouvement, on peut donc écrire :

$$\frac{d}{dt} \int_{D_v} \rho(\vec{X}, t) dV = 0 \quad (\text{II. 1})$$

Où  $\frac{d}{dt}$ : désignons maintenant une dérivée particulière, c.à.d. Dérivée obtenue en traçant l'aire  $D_v$  du fluide en mouvement :

$$\frac{d}{dt} \int_{D_v} \rho dV = \frac{d}{dt} \int_{D_v} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \frac{d}{dt} \int_{D_v} \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{n} dS \quad (\text{II. 2})$$

En utilisant le théorème de Green-Ostrogradsky (le théorème de divergence) [61], pour convertir le dernier terme de l'équation précédente en une intégrale de volume, nous obtenons équation locale :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{II. 3})$$

Cette expression traduit la conservation de la masse au cours du temps dans le volume de contrôle  $D_v$ . Cette équation est aussi appelée équation de continuité. Si les fluides sont équivalents,  $(\vec{X}, t) = \text{Cste}, \forall X \text{ et } \forall t$ , alors (II. 12) s'écrit :

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (\text{II. 4})$$

### II.2.2. Loi de conservation de la quantité de mouvement [63].

C'est la deuxième loi de Newton, encore appelée principe fondamental de la dynamique : La quantité de mouvement du fluide contenu dans un volume de contrôle  $D_v$  est :

$$\int_{D_v} \rho \vec{V} dV \quad (\text{II. 5})$$

La dérivée particulière de la quantité de mouvement liquide contenue dans  $D_v$  est la même. Somme de toutes les forces externes agissantes sur  $D_v$ :

$$\frac{d}{dt} \int_{D_v} \rho \vec{V} dV = \int_{D_v} \rho \vec{f} dV + \int_s \vec{T} dS \quad (\text{II. 6})$$

Donc pour ce problème,  $f = \rho g = -\rho g k$  et  $T = \sigma n$ , et pour simplifier la notation, en supposant que  $\mu$  est constant dans l'équation, on arrive à :

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} P + (\gamma + \mu) \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (\text{II. 7})$$

Pour le cas d'un fluide incompressible  $\frac{d\rho}{dt} = 0 \Leftrightarrow \nabla \cdot V = 0$

Nous obtenons la forme suivante des équations de Navier-Stokes à utiliser dans la suite de ce travail.

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{g} - \vec{\nabla}P + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (\text{II. 8})$$

### II.2.3. Loi de conservation de l'énergie [59].

Pour établir l'équation de conservation de l'énergie, nous utilisons la première loi de la thermodynamique, qui s'applique aux fluides contenus dans le volume de contrôle  $D_v$ . Cette première loi est formulée comme suit :

A tout instant, la dérivée de la somme de l'énergie cinétique  $E_c$  et de l'énergie interne  $E_i$  du domaine  $D_v$  du fluide est la puissance mécanique  $P_e$  fournie à  $D_v$  par la force externe et la puissance de chauffage fournie à  $D_v$  de manière externe  $\dot{Q}$  (vitesse de chauffage) :

$$\frac{d(E_c + E_i)}{dt} = P_e + \dot{Q} \quad (\text{II. 9})$$

Comme précédemment, en utilisant le théorème de la divergence [55], on obtient l'équation locale suivante :

$$\rho \frac{de}{dt} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{q} + r - P \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + (\tau : \vec{\nabla} \vec{v}) \quad (\text{II. 10})$$

Avec  $e$  : Représente l'enthalpie massique.

La loi de Fourier [60] transforme la relation linéaire entre le flux de chaleur à travers la ligne  $q$  et le gradient de température. Où le facteur de proportionnalité est la conductivité thermique du fluide  $K$ .

$$q = -K \nabla T \quad (\text{II. 11})$$

Par rapport à  $r$ , on représente la somme des puissances calorifiques émises par toutes les sources de chaleur présentes dans le liquide. Ces sources d'énergie peuvent inclure des éléments tels que le rayonnement radioactif, nucléaire, électromagnétique, etc. Nous supposons ici que le problème lié à  $r$  est négligeable. Dans l'équation d'énergie (II.2), la densité de puissance

associée au changement de pression et aux pertes visqueuses ( $\tau: \overline{\nabla} \overline{V}$ ) est négligeable par rapport au flux thermique dissipé par conduction ( $\nabla \cdot (k \nabla T)$ ) [61].

$$\rho \frac{de}{dt} = \nabla \cdot K \nabla T \quad (\text{II. 12})$$

À partir de la relation d'enthalpie de masse, par exemple, nous pouvons finalement dériver l'équation de conservation de l'énergie pour un fluide incompressible sous une forme générale:

$$\rho \overline{C}_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot k \nabla T \quad (\text{II. 13})$$

#### **II.2.4. Système d'équation.**

Les équations générales régissant la convection sont des équations de dynamique des fluides basés sur l'hypothèse des fluides incompressibles. L'équation de départ devient donc :

$$\begin{cases} \nabla \cdot V = 0 \\ \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\overline{V} \cdot \overline{\nabla}) \vec{V} = \rho \vec{g} - \overline{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{V} \\ \rho \overline{C}_p \frac{\partial T}{\partial t} + (\overline{V} \cdot \overline{\nabla}) T = K \Delta T \end{cases} \quad (\text{II. 14})$$

### **II.3. Caractéristiques thermophysiques des nanofluides.**

Notez que la taille des particules est un paramètre physique crucial dans les nanofluides, car elle peut être utilisée pour ajuster les propriétés thermiques du nanofluide ainsi que la stabilité de la suspension des nanoparticules. Les chercheurs en nanofluides s'efforcent d'exploiter les propriétés uniques des nanoparticules pour développer des fluides caloporteurs stables et hautement conducteurs.

Les propriétés thermophysiques des nanofluides sont cruciales pour prédire leur comportement en matière de transfert de chaleur. L'ajout de nanoparticules modifie considérablement des propriétés telles que la densité, la chaleur massique, la dilatation thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique des solutions. De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un impact significatif sur les valeurs des paramètres thermophysiques du nanofluide résultant (nature des nanoparticules, leur taille, fraction volumique, conductivité du fluide de base, conductivité des nanoparticules,

température du milieu, etc.). Les propriétés thermophysiques effectives du nanofluide seront approchées à l'aide de différentes relations tirées de la littérature ou que nous établirons dans la suite de ce travail.

### II.3.1. Chaleur spécifique [62].

L'équation suivante est représentée par Xuan et Roetzel [62] pour calculer la chaleur spécifique du nanofluide :

$$(\rho \overline{C_p})_{nf} = (1 - \varphi)(\rho \overline{C_p})_f + \varphi(\rho \overline{C_p})_s \quad (\text{II. 15})$$

Cette relation peut être démontrée comme suit :

$$(\rho \overline{C_p})_{nf} = (\rho)_{nf} (\overline{C_p})_{nf} = \rho_{nf} \frac{Q_f + Q_s}{(m_f + m_s) \Delta T} \quad (\text{II. 16})$$

$$= \rho_{nf} \frac{(m \overline{C_p})_f \Delta T + (m \overline{C_p})_s \Delta T}{(m_f + m_s) \Delta T} = \rho_{nf} \frac{(\rho V \overline{C_p})_f + (\rho V \overline{C_p})_s}{(\rho_f V_f + \rho_s V_s)} \quad (\text{II. 17})$$

$$= \left( \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \right) \frac{(\rho V \overline{C_p})_f + (\rho V \overline{C_p})_s}{(\rho_f V_f + \rho_s V_s)} = \rho_f (\overline{C_p})_f \frac{V_f}{V_f + V_s} + \rho_s (\overline{C_p})_s \frac{V_s}{V_f + V_s} \quad (\text{II. 18})$$

Avec :  $(\overline{C_p})_{nf}$ ,  $(\overline{C_p})_f$ ,  $(\overline{C_p})_s$  désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nanofluide, du fluide de base et des nanoparticules.

Certains autres chercheurs dont Pak et Cho [63] ont utilisé :

$$(\overline{C_p})_{nf} = (1 - \varphi)(\overline{C_p})_f + \varphi(\overline{C_p})_s \quad (\text{II. 19})$$

### II.3.2. Masse volumique.

En utilisant des formules classiques dérivées d'un mélange à deux phases, la densité du nanofluide en fonction de la concentration volumique des particules et des propriétés individuelles peut être calculée en suivant les étapes suivantes :

$$\rho_{nf} = \left( \frac{m}{V} \right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (\text{II. 20})$$

La fraction volumique de nanoparticules, notée est le rapport du volume de nanoparticules sur le volume total (Fluide + solide).



### **II.3.3.1. Modèle de Maxwell.**

Maxwell a dérivé une formule pour calculer la conductivité thermique effective d'un mélange solide-liquide avec des particules sphériques (Maxwell, 1873).

Le modèle de Maxwell [65] et ses dérivés sont probablement les plus utilisés dans la littérature. Ce modèle de base suppose que le fluide contient plusieurs particules sphériques de diamètre égal  $d_p$  et est dispersé à faible concentration. La formule de Maxwell est donnée par [insérez ici la formule de Maxwell].

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K+2K_f+2\phi(K_s-K_f)}{K_s+2K_f-2\phi(K_s-K_f)} \quad (\text{II. 23})$$

Où :  $K_{nf}$  ,  $K_f$  ,  $K_s$  désignent respectivement les conductivités thermiques du nanofluide, du fluide de base et des particules solides.

#### **Remarque :**

Dans la relation (II.23), l'effet de la taille et de la forme des particules n'est pas inclus dans l'analyse. Il convient également de noter que l'interaction entre les particules a également été négligée dans le calcul. Hasselman et Johnson [66] ont adapté le modèle de Maxwell en prenant en compte la résistance de Kapitza ( $R_K$ ) :

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_s(1+2\beta_1)+2K_f+2\phi[K_s(1-\beta_1)-K_f]}{K_s(1+2\beta_1)+2K_f+\phi[K_s(1-\beta_1)-K_f]} \quad (\text{II. 24})$$

Avec :  $\beta_1 = \frac{2R_K K_f}{d_s}$

Où :

- ✓  $d_s$  : Diamètre moyen d'une nanoparticule solide.
- ✓  $R_K$  : Résistance de Kapitza.
- ✓  $K_f$  : Conductivité thermique du fluide de base.

D'après Wilson et al [67]. La résistance de Kapitza entre les nanoparticules et le fluide de base est égale à  $7.7 \times 10^{-9} [Km^2W^{-1}]$ .

### **II.3.3.2. Modèle de Hamilton-Crosser.**

Ce modèle, selon Hamilton et Crosser [68], est dérivé du modèle de Maxwell et intègre un facteur de forme  $n$  pour tenir compte de la forme non sphérique des particules. Ce facteur de forme empirique donné par :  $n = 3/\psi$ . Tel que ( $\psi$ ) est un facteur géométrique appelé sphéricité. Ce coefficient est défini comme le rapport de l'aire de la sphère de même volume que les nanoparticules à l'aire d'une nanoparticule.

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_s)\varphi}{K_s + (n-1)K_f + (K_f - K_s)\varphi} \quad (\text{II. 25})$$

Lorsque  $n = 3$  on retrouve le cas des particules sphériques. Le cas  $n = 6$  correspond à des particules cylindriques.

### **II.3.4. Conductivité thermique apparente du milieu.**

#### **II.3.4.1. Modèle de Hamilton-Crosser.**

Yu et Choi [69] ont proposé un modèle modifié plus complexe que le modèle de Hamilton-Crosser, prenant en compte l'effet d'interface entre les particules et le fluide de base.

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_s + 2K_f + 2(K_s - K_f)(1 + \beta_2)^3 \varphi}{K_s + 2K_f - (K_s - K_f)(1 + \beta_2)^3 \varphi} \quad (\text{II. 26})$$

Où :  $\beta_2$  est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique au rayon des particules.

Ce modèle n'est valable que pour les particules de forme sphérique.

#### **II.3.4.2. Modèle de Bruggeman.**

Bruggeman [70] a proposé un modèle implicite qui prédit la conductivité thermique des nanofluides sans limitation sur la concentration volumique. Ce modèle suppose des particules de forme sphérique et est en bon accord avec certains résultats expérimentaux.

$$K_{nf} = \frac{1}{4} [(3\varphi - 1)K_s + (2 - 3\varphi)K_f] + \frac{K_f}{4} \sqrt{\Delta} \quad (\text{II. 27})$$

$$\text{Avec : } \Delta = \left[ (3\varphi - 1)^2 \left( \frac{K_s}{K_f} \right)^2 (2 - 3\varphi)^2 + 2(2 + 9\varphi - 9\varphi^2) \left( \frac{K_s}{K_f} \right) \right]$$

Ce modèle ne prend en compte ni la taille des particules ni leur forme.

### **II.3.4.3. Modèles tenant compte du mouvement Brownien.**

Le mouvement Brownien est une description mathématique du mouvement aléatoire des nanoparticules dans le liquide de base, provoqué par des collisions avec les molécules du liquide de base se déplaçant dans toutes les directions sous excitation thermique.

Il s'avère que le mouvement brownien des nanoparticules est trop lent pour transporter une quantité importante de chaleur à travers un nanofluide. Cependant, ce mouvement peut jouer un rôle indirect en induisant une convection autour des nanoparticules, contribuant ainsi à augmenter le transfert de chaleur.

Koo et Kleinstreuer [71] ont proposé un modèle modifié plus complexe que le modèle de Maxwell. Dans ce modèle, ils ont supposé que la conductivité thermique est composée de deux termes : le premier, appelé statique, et le second est lié au mouvement brownien.

$$K_{nf} = K_{statique} + K_{Brownian} \quad (II. 28)$$

$$K_{statique} = K_f \frac{K_s + 2K_f - 2(K_f - K_s)\varphi}{K_s + 2K_f + 2(K_f - K_s)\varphi} \quad (II. 29)$$

$$K_{Brownien} = \frac{K_B T}{3\pi\mu_f d_s} \quad (II. 30)$$

Où :  $K_B$  la constante de Boltzmann,  $\mu_f$  ( $Pa \cdot s$ ) la viscosité dynamique du fluide de base et  $d_s$  (nm) le diamètre de la nanoparticule.

Vajjha et Das [72]. ont proposé un modèle de conductivité thermique à 2 composants prenant en compte les effets de la taille des particules, de la fraction volumique et de la température.

$$K_{nf} = K_{static} + K_{Brownian} \quad (II. 31)$$

$$\frac{K_{static}}{K_f} = \frac{K_s + 2K_f - 2(K_f - K_s)\varphi}{K_s + 2K_f + (K_f + K_s)\varphi} \quad (II. 32)$$

$$K_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta_3 \varphi (\rho \bar{C}_p)_f \sqrt{\frac{\gamma T}{\rho_s d_s}} f(T, \varphi) \quad (II. 33)$$

Où  $\gamma = 1,3809 \times 10^{-23} [J/k]$  est la constante de Boltzmann. Un élément supplémentaire  $\beta_3$  est introduit pour tenir compte de l'effet du mouvement des particules.  $\beta_3$  est donné par [72] :

$$\beta_3 = 8.4407(100\varphi) - 1.07304 \quad (\text{II. 34})$$

Et  $f(T, \varphi)$  a la forme :

$$f(T, \varphi) = (2.8217 \times 10^{-2}\varphi + 3.917 \times 10^{-3}) (T/T_0) (-3.0669 \times 10^{-2}\varphi - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (\text{II. 35})$$

### **II.3.5. La viscosité dynamique.**

Par rapport aux études expérimentales [73] sur la conductivité thermique des nanofluides, peu d'études rhéologiques sont réalisées dans la littérature pour la viscosité.

Différents modèles de viscosité sont utilisés par les chercheurs pour modéliser la viscosité effective du nanofluide en fonction de la fraction volumique. Einstein est le premier à étudier l'évolution de la viscosité d'une suspension diluée en fonction de la fraction volumique solide [73]. La viscosité dynamique d'un nanofluide, donnée par Einstein pour un mélange contenant des suspensions diluées de fines particules sphériques et de particules rigides est la suivante:

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi) \quad (\text{II. 36})$$

Tel que :

- ✓  $\mu_{nf}$  : Viscosité dynamique du nanofluide.
- ✓  $\mu_f$  : Viscosité dynamique du fluide de base.
- ✓  $\varphi$  : Fraction volumique des nanoparticules.

Il est important de mentionner que presque toutes les formules existantes sont dérivées des travaux fondamentaux d'Einstein (1906), basées sur l'hypothèse que l'énergie a une dépendance linéaire avec la viscosité. Cette relation n'est valable que pour  $\varphi < 0,03$ . Plusieurs travaux théoriques sont consacrés à l'obtention d'une correction de la formule d'Einstein. Un bref aperçu est donné ci-après:

Brinkman [74]. A étendu la formule d'Einstein pour arriver à une concentration proche de 4 %. Sa formule est la suivante :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (\text{II. 37})$$

Les relations précédentes n'incorporent pas les effets du mouvement Brownien ou de la taille des particules.

La viscosité n'est pas seulement une fonction linéaire de  $\phi$ , comme l'indique la relation d'Einstein, mais une fonction non linéaire de  $\phi$  avec la présence d'un terme dans  $\phi^2$ . Batchelor [75]. Considéré l'effet du mouvement Brownien des particules sphériques dans une suspension de particules isotropes en proposant :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\phi + K_2\phi^2) \quad (\text{II. 38})$$

Avec  $k_2$  compris entre 5,2 et 6,2.

D'après les formules ci-dessus, il est évident que la viscosité effective d'un fluide visqueux contenant des particules en suspension dépend à la fois de la viscosité du fluide de base et du volume de la fraction particulaire. En principe, toutes ces formules peuvent être utilisées pour déterminer la viscosité du nanofluide en supposant que la dépendance de la viscosité est linéaire.

La viscosité dynamique effective du nanofluide pourrait être calculée à l'aide des équations de Corcione [76]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - 34.87(d_s/d_f)^{-0.3}) \times \phi^{1.03}} \quad (\text{II. 39})$$

$$d_f = \left(\frac{6M}{N\pi\rho_{f0}}\right)^{1/3} \quad (\text{II. 20})$$

Où :  $d_s$  et  $d_f$  représentent respectivement le diamètre moyen des nanoparticules et le diamètre équivalent d'une molécule de fluide de base ;  $M$  représente le poids moléculaire ;  $N$  représente le nombre d'Avogadro =  $6,0229 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  ; et  $\rho_{f0}$  est la masse volumique du fluide de base fluide de base trouvé à température = 293 K.

## **II.4. Formulation adimensionnelle du problème.**

### **II.4.1. Choix des grandeurs de référence.**

La dynamique des fluides et les équations thermiques impliquent généralement un grand nombre de paramètres physiques. Transformer ces équations en une forme adimensionnelle, obtenue en choisissant une échelle de référence appropriée et en effectuant un regroupement

adimensionnel des paramètres physiques, représente une étape cruciale dans la modélisation des problèmes physiques.

Toutes les quantités utilisées dans les équations sont mises à l'échelle à partir des quantités de référence suivantes.

**Tableau II.1.** Choix des grandeurs de référence.

Grandeurs	Variables	Grandeur	Variables
Coordonnées	$x^* = \frac{x}{D}$	Temps	$t^* = \frac{tU_\infty}{D}$
	$y^* = \frac{y}{D}$		
	$z^* = \frac{z}{D}$		
Vitesse	$U^* = \frac{U}{U_\infty}$	Température	$T^* = \frac{(T - T_\infty)}{(T_c - T_\infty)}$
	$V^* = \frac{V}{U_\infty}$	Pression	$P^* = \frac{P}{\rho_f U_\infty^2}$
	$W^* = \frac{W}{U_\infty}$		

### II.4.2. Nanoparticules d'oxyde de Cuivre.

Les nanoparticules métalliques présentent une conductivité thermique plus élevée que celle de l'oxyde métallique correspondant. On pourrait donc s'attendre à trouver une valeur de conductivité thermique comparable à celle des oxydes métalliques, même avec une fraction volumique de nanoparticules métalliques beaucoup plus faible.

L'oxyde de cuivre II est, comme son nom l'indique, composé d'atomes de cuivre et d'atomes d'oxygène. En effet, le terme 'oxyde' est généralement employé pour désigner les composés qui contiennent de l'oxygène. L'appellation Cuivre II quant à elle, traduit d'une part la présence de Cuivre, et d'autre part, précise grâce au chiffre "II" que le Cuivre se trouve à l'état d'oxydation +II.

**Remarque :**

La mention du chiffre "II" a son importance, car il existe également un autre Oxyde de

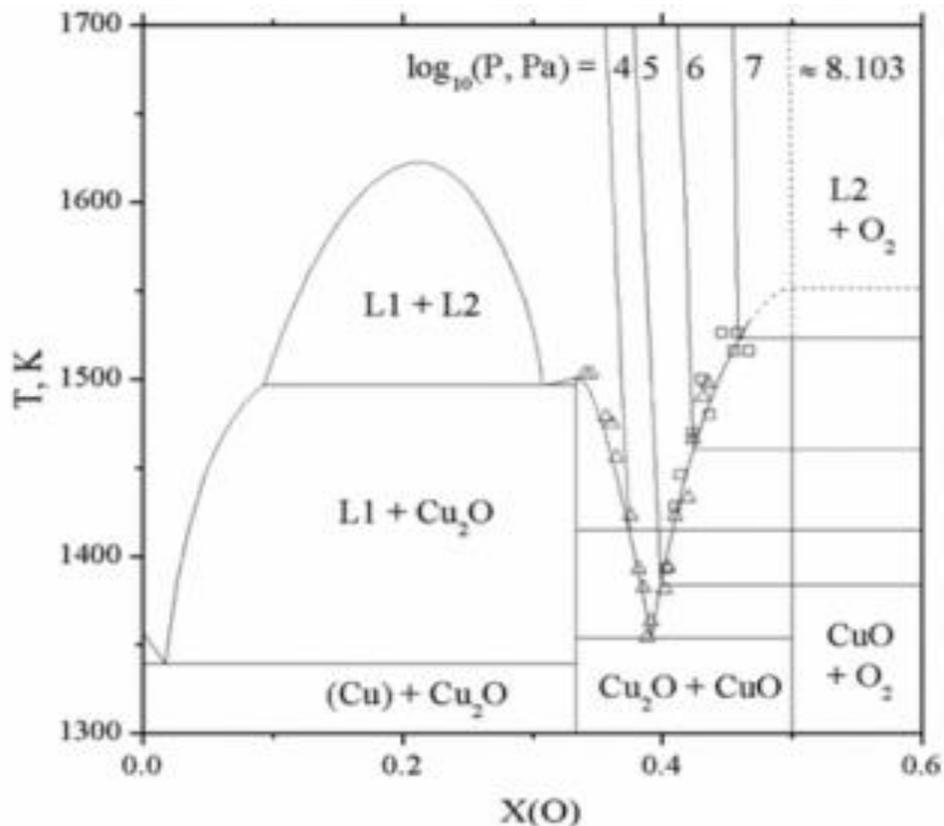
Cuivre : l'Oxyde de Cuivre I (aussi appelé Oxyde Cuivreux), de formule  $\text{Cu}_2\text{O}$ , dans lequel l'élément Cuivre se trouve dans son état d'Oxydation +I.

S'il y a un second facteur, celui-ci est également représenté par un axe gradué et orienté. Comme pour le premier facteur, on définit son niveau haut, son niveau bas, et son domaine de variation.

### II.4.2.1. Propriétés d'Oxyde de Cuivre II.

L'Oxyde de Cuivre II, également appelé Oxyde Cuivrique, porte le numéro CAS : 1317-38-0. C'est un minéral solide de couleur noire, présent naturellement dans certaines roches où il est désigné sous le nom de ténorite. Sous forme de poudre très fine, l'Oxyde Cuivrique est insoluble dans l'eau.

Le système  $\text{CuO}$  comporte de nombreuses phases distinctes mais deux seulement sont thermodynamiquement stables. Il s'agit de  $\text{Cu}_2\text{O}$  et de  $\text{CuO}$  qui sont des composés présentant un écart quasi-nul à la stœchiométrie figure (II.2). De plus, la solubilité de l'oxygène dans le cuivre est quasi-nulle, Hussain et Jamal [77].



**Figure II.2.** Diagramme de phase Cuivre-Oxygène [77].

### **II.4.2.2. Obtention de l'oxyde de cuivre II.**

Il existe plusieurs méthodes permettant de former l'Oxyde de Cuivre II. Un certain nombre d'entre elles sont détaillées dans les paragraphes suivants.

### **II.4.2.3. Obtention de l'Oxyde de Cuivre II à partir du Cuivre métallique [77].**

En chauffant le cuivre sous forme de métal à l'air libre, on forme de l'Oxyde de Cuivre II. Cependant, cette réaction conduit également à la formation en parallèle d'Oxyde de Cuivre I. Les réactions chimiques intervenant dans ce processus sont alors les suivantes :



### **II.4.2.4. Obtention de l'Oxyde de Cuivre II à partir de l'Hydroxyde de Cuivre [78].**

En chauffant de l'Hydroxyde de Cuivre, on peut obtenir de l'Oxyde de Cuivre II avec une pureté plus élevée. Le chauffage de l'Hydroxyde de Cuivre provoque une déshydratation, permettant d'obtenir de l'Oxyde de Cuivre II suivant la réaction chimique suivante :



Remarque : à noter que l'Oxyde de Cuivre II peut également être obtenu :

- Par chauffage du Nitrate de Cuivre :



- Mais aussi par chauffage du Carbonate de Cuivre :



- Ou encore par chauffage du Sulfate de Cuivre :



**Tableau II.2.** Résultats significatifs portant sur l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides [78].

Fluide	Nanoparticules	$\varphi$ (%)	Gain relatif (en %)
Eau	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 20 nm	1	16
EG	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 60 nm	5	30
Huile de pompe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 60 nm	5	40
EG	CuO, 18.6 nm	4	20
Eau	CuO, 18.6 nm	4.3	10
Huile de pompe	Cu, 35 nm	0.055	45
Eau	Cu, 100 nm	7.5	75
Huile de transformateur	Cu, 100 nm	7.5	45
EG	Cu, 10 nm	0.2	40

EG : Ethylène Glycol.

### II.4.3. Equations adimensionnelles du problème.

Les modifications des paramètres physiques dues à l'ajout de nanoparticules au liquide de base sont prises en compte. Ce travail utilise :

- Equation (II.22) s'applique à la masse volumique des nanofluides
- Equation (II.19) s'applique à la chaleur spécifique des nanofluides
- Equation (II.31) s'applique à la conductivité thermique des nanofluides.
- Equation (II.38) s'applique à la viscosité dynamique des nanofluides.

La variable sans dimension et le système d'équations à l'état stationnaire est :

$$\nabla \cdot \vec{V}^* = 0 \quad (\text{II. 47})$$

$$\frac{\partial \vec{V}^*}{\partial t^*} + (\vec{V}^* \cdot \nabla) \vec{V}^* = -\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \nabla P^* + \frac{1}{\partial_f Re} \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \nabla^2 \vec{V}^* + \frac{\rho_s \beta_s \varphi + \rho_f \beta_f (1-\varphi)}{\rho_{nf} \beta_{nf}} Ri T^* \vec{e}_y \quad (\text{II. 48})$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + (\vec{V}^* \cdot \nabla) T^* = \frac{a_{nf}}{a_f} \frac{1}{Re Pr} (\nabla^2 T^*) \quad (\text{II. 49})$$

$$Re = \frac{\rho U_\infty D}{\mu} \quad (\text{II. 50})$$

Le nombre de Prandtl est défini comme :

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (\text{II. 51})$$

## II.5. Modèle de turbulence.

Le modèle de turbulence choisi est couramment utilisé en raison de son effort de calcul raisonnable, tout en fournissant une précision suffisante pour les applications techniques. Ces modèles sont tous basés sur des concepts de viscosité turbulente. Le modèle de turbulence k-ε est largement utilisé dans l'industrie, validé à de nombreuses reprises et fournissant d'excellents résultats dans de nombreuses applications industrielles courantes. C'est souvent suffisant pour justifier son utilisation. Nous l'avons spécifiquement adapté pour notre cas d'étude afin d'améliorer la prédiction de l'écoulement pariétal, notamment du coefficient de frottement, du transfert de chaleur, et de la distribution de l'énergie cinétique des fluctuations. Ce modèle est particulièrement adapté aux écoulements à petits nombres de Reynolds. Par exemple, le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS utilise des modèles de turbulence similaires.

### II.5.1. Modèle k – ε.

En plus de l'équation de continuité et des trois équations RANS, le modèle de turbulence k-ε ajoute deux équations de transport au système. La première est l'équation de transport de l'énergie cinétique turbulente k, et la seconde inclut le facteur de dissipation ε.

Ci-dessous, vous trouverez la forme finale des équations qui composent ce modèle :

- Viscosité turbulente :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II. 51})$$

- Transport d'énergie cinétique turbulente :

$$\underbrace{\rho \frac{\partial k}{\partial t}}_I + \underbrace{\rho V_j \frac{\partial k}{\partial x_j}}_{II} = \underbrace{\tau_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}}_{III} - \underbrace{\rho \varepsilon}_{IV} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}_V \quad (\text{II. 52})$$

- Transport du taux de dissipation :

$$\underbrace{\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}}_I + \underbrace{\rho V_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}}_{II} = \underbrace{c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}}_{III} - \underbrace{c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}}_{IV} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}_V \quad (\text{II. 53})$$

Tel que :

- ✓ I ≡ Taux de changement de k ou ε
- ✓ II ≡ Transport convectif de k ou ε

- ✓ III  $\equiv$  Taux de production de  $k$  ou  $\varepsilon$
- ✓ IV  $\equiv$  Taux de destruction de  $k$  ou  $\varepsilon$
- ✓ V  $\equiv$  Transport diffusif de  $k$  ou  $\varepsilon$

Les coefficients des équations (II. 52) à (II. 53) utilisés ici sont :  $c_{\varepsilon_1} = 1.44$  ;  $c_{\varepsilon_2} = 1.92$   
 $c_{\mu} = 0.09$  ;  $\sigma_{k_2} = 1.0$  et  $\sigma_{\varepsilon_2} = 1.3$ .

Par conséquent, les limites de domaine doivent fournir au solveur des informations sur l'énergie dynamique de la turbulence  $k$  et son taux de dissipation  $\varepsilon$ . Il existe évidemment de nombreuses manières différentes de fournir ces informations au logiciel. La chose la plus évidente que COMSOL MULTIPHYSICS offre...

Il consiste à entrer directement des valeurs pour  $k$  et  $\varepsilon$ . Cependant, dans la pratique, les informations sur la turbulence sont généralement inconnues. Même en l'absence de telles données, certaines approximations peuvent être faites. La méthode la plus simple proposée par FLUENT et COMSOL a détaillent utilise uniquement l'intensité de la turbulence.

Elle est définie comme le rapport de variation de vitesse et sa valeur moyenne.

$$I = \sqrt{\frac{\overline{u'^2}}{U}} = \frac{u'}{U} \quad (\text{II. 54})$$

COMSOL MULTIPHYSICS utilise une approximation implicite pour déterminer la viscosité turbulente  $\mu_t$ . Dans ce cas, utilisez ces deux informations pour calculer d'abord  $k$ .

Force spécifiée :

$$k = \frac{3}{2} I^2 U^2 \quad (\text{II. 55})$$

Ensuite  $\varepsilon$  d'après le ratio de viscosité déterminé implicitement :

$$\varepsilon = \rho c_{\mu} \frac{k^2}{\mu_t} \quad (\text{II. 56})$$

## II.6. Equations auxiliaires.

Le coefficient de pression  $C_p$ , peut-être défini comme suit :

$$C_p = \frac{P - P_{\infty}}{0.5 \rho U_{\infty}^2} \quad (\text{II. 57})$$

Pour obtenir la valeur de  $C_p = 1$  au point d'arrêt, déterminer la valeur de  $P$  en appliquant

Théorème de Bernoulli pour les lignes de courant à partir du point d'arrêt en amont du cylindre:

$$\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2 + P_{\infty} = P_{\text{arret}} \quad (\text{II. 58})$$

Où :  $P_{\text{arret}}$  est la pression au point de stagnation avant.

Dans le régime d'écoulement instationnaire, il existe également deux forces agissant sur le cylindre, exprimées en termes de coefficients de portance  $C_L$  et de traînée  $C_D$ , définies comme suit :

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \rho D U_{\infty}^2} \quad (\text{II. 59})$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho D U_{\infty}^2} \quad (\text{II. 60})$$

Où :  $F_L$  est la force de portance,  $F_D$  est la force de traînée.

Taux de rotation non-dimensionnel.

$$\alpha = \frac{\Omega D}{2 U_{\infty}} \quad (\text{II. 61})$$

Enfin, l'introduction d'un autre groupe sans dimension appelé le nombre de Nusselt est souvent utilisée pour caractériser le transfert de chaleur entre un cylindre et le fluide environnant. Il représente le rapport entre le flux effectivement transféré au cylindre et le flux transféré dans la zone purement conductrice.

Le nombre de Nusselt local des nanofluides lié au diamètre du cylindre est défini comme suit :

$$Nu_{UL} = - \frac{k_{nf}}{k_f} \left[ \frac{\partial T}{\partial n} \right]_{\text{la long de la surface du cylindre}} \quad (\text{II. 62})$$

Le nombre de Nusselt moyen sur la surface du cylindre est défini comme suit :

$$Nu_{\text{moy}} = \frac{1}{s} \int_s Nu_{UL} ds \quad (\text{II. 63})$$

## **II.7. Equations représentatives d'écoulement.**

Il est essentiel de rappeler les lois fondamentales de conservation.

- ✓ Loi de conservation de masse (équation de continuité).
- ✓ Loi de conservation de la quantité de mouvement (équation de Navier-Stokes).
- ✓ Loi de conservation d'énergie (équation de l'énergie).

### **II.7.1. Spécifications simplificatrices.**

Pour simplifier le problème et rendre les équations plus faciles pour la résolution, nous avons adopté les hypothèses suivantes :

L'écoulement du fluide et le transfert de chaleur sont permanents.

- ✓ Le régime est laminaire :
  - Fluide est Newtonien et incompressible.
  - Dissipations visqueuses sont négligeables.
  - Propriétés physiques du fluide sont supposées constantes sauf pour la masse volumique dont l'approximation de Boussinesq est adoptée.

## **II.8. Méthodes numériques.**

L'ensemble des équations aux dérivées partielles régissant les phénomènes d'écoulement, de transfert de chaleur et de masse au sein des cuves agitées montre un comportement très complexe, surtout avec la considération des simulations tridimensionnelles. De plus, le degré de complexité augmente avec la nature non linéaire des équations de quantité de mouvement et d'énergie, d'une part, et la dépendance des propriétés thermo-physiques des fluides rhéologiquement complexes de la température, d'autre part. Par conséquent, le choix d'une méthode numérique visant à simplifier la complexité de la modélisation proposée est une étape importante à considérer dans notre étude.

Il existe plusieurs méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles (EDP). Ces méthodes peuvent être d'application très difficile, voire impossible, dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux présentent des caractéristiques non linéaires. Elles sont souvent remplacées par des méthodes numériques, beaucoup plus précises.

Ces méthodes permettent de modéliser les géométries les plus complexes et de prendre en compte les phénomènes thermo-physiques.

Plusieurs techniques mathématiques pour la résolution du système thermo-physique et les

méthodes le plus largement présente dans les littératures est les trois méthodes type :

### **II.8.1. Méthode des différences finis.**

Les méthodes aux différences finies convertissent les équations différentielles ordinaires (ODE) ou les équations aux dérivées partielles (EDP), qui peuvent être non linéaires, en un système d'équations algébriques linéaires pouvant être résolues par des techniques matricielles. Elles consistent à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème à résoudre par des différences divisées. Ces méthodes ont l'avantage d'être d'expression simple et d'un calcul relativement rapide. Cependant, elles restent limitées en termes de précision, car le maillage repose souvent sur des éléments carrés ou carrés curvilignes.

### **II.8.2. Méthode des volumes finis.**

La technique des volumes de contrôle consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle afin d'obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un Volume de Contrôle (VC). Ces volumes de contrôle enveloppent tout le domaine de calcul sans chevauchement, de telle façon que la somme de leurs volumes soit exactement égale au volume du domaine de calcul.

### **II.8.3. Méthode élément finis.**

La Méthode des Éléments Finis (MEF) trouve ses origines dans la nécessité de résoudre des problèmes complexes d'élasticité et d'analyse de structures en ingénierie civile et aéronautique. Son développement remonte aux travaux d'Alexander Hrennikoff (1941) et de Richard Courant (1942). Bien qu'utilisant des approches différentes, ces deux pionniers partagent la même caractéristique essentielle, à savoir la discrétisation par maillage du domaine continu en sous-domaines discrets, appelés éléments.

Cette méthode consiste à diviser le domaine physique à traiter en plusieurs sous-domaines simples appelés éléments finis à dimensions non infinitésimales. La solution recherchée est remplacée dans chaque élément par une approximation avec des polynômes simples, et le domaine peut ensuite être reconstitué avec l'assemblage ou la sommation de tous les éléments.

La méthode des éléments finis est largement acceptée comme méthode de calcul, en particulier en raison de son adaptation aux ordinateurs, augmentant ainsi son potentiel.

#### **II.8.4. Choix de la méthode utilisée.**

Le choix de la méthode numérique utilisée pour résoudre les systèmes différentiels aux dérivées partielles avec conditions initiales et aux limites et régissant les phénomènes physiques est dû à plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs :

- ✓ Adaptation aux géométries complexes.
- ✓ Prise en compte des non -linéarités.

La représentation d'un grand nombre de formes de structures à l'aide du modèle analytique général commun.

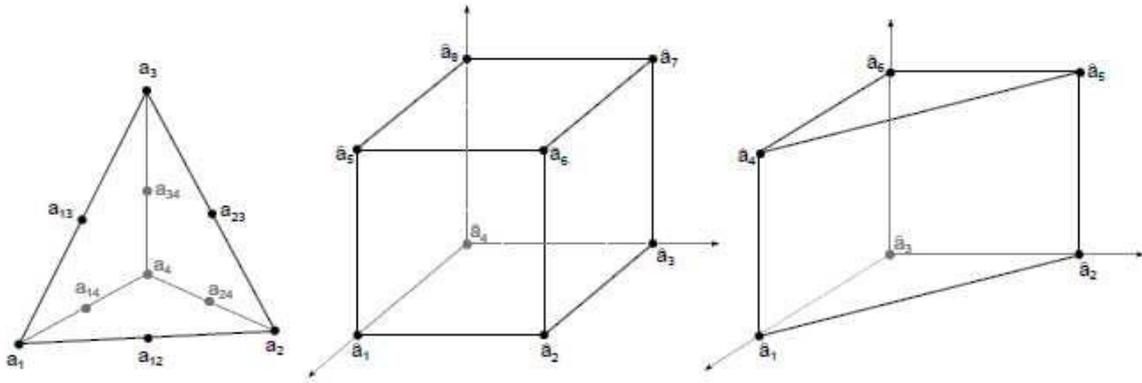
On peut accepter des lois complexes de propriétés intrinsèques des matériaux si on compare aux possibilités des méthodes classiques de résolution, et offrent plus vastes perspectives en analyse non linéaire.

La MEF est actuellement utilisée avec succès pour les problèmes en magnétostatique et en dynamique des fluides et généralement dans la plupart d'usage d'ingénierie parce qu'elle est une méthode très puissante et s'adapte mieux aux géométries complexes.

#### **II.8.5. Discrétisation.**

Dans la méthode des éléments finis, la structure continue est remplacée par une structure idéalisée équivalente composée d'un ensemble d'éléments appelés "éléments finis", censés être connectés les uns aux autres à un nombre fini de points appelés nœuds. On définit de manière unique le champ des déplacements à l'intérieur de chaque "élément fini", qui est censé relier les uns aux autres à un nombre fini de points appelés nœuds.

Le principe de la méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis (appelé maillage). C'est une étape très importante puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude. On distingue les éléments finis tridimensionnels suivants, qui seront illustrés à la figure II.3.



**Figure II.3.** Éléments finis tridimensionnels : tétraédriques, parallélépipédique et prismatique.

Sur chacun des éléments finis, il est possible de linéariser l'EDP, c'est-à-dire de remplacer l'équation aux dérivées partielles par un système d'équations linéaires, par approximation. Ce système d'équations linéaires peut se décrire par une matrice ; il y a donc une matrice par élément fini. Cependant, les conditions aux frontières sont définies sur les frontières du système global et pas sur les frontières de chaque élément fini ; il est donc impossible de résoudre indépendamment chaque système. Les matrices sont donc réunies au sein d'une matrice globale. Le système d'équations linéaires global est résolu par l'ordinateur.

Le maillage ne doit pas être inutilement fin et nous devons faire un compromis entre la finesse de la représentation géométrique et le coût en temps de calcul. Nous choisirons, en fonction des résultats escomptés, de mailler finement certaines régions et plus grossièrement d'autres. La phase de maillage est sans doute celle où on passe le plus de temps sur la définition du problème.

L'expérience de l'utilisateur, ainsi qu'une certaine idée du résultat du calcul, sont des facteurs importants.

Après examen des résultats du calcul, nous pouvons être amenés à recommencer un maillage ou à le remanier partiellement. Un maillage satisfaisant n'est que rarement obtenu à la première tentative.

## II.9. Equations représentatives de nano fluide.

- Equation de continuité :

$$\rho_{nf} \frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (\text{II. 64})$$

- Equation de quantité de mouvement suivant x :

$$\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II. 65})$$

- Equation de quantité de mouvement suivant y :

$$\rho_{nf} \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II. 66})$$

- Equation de quantité de mouvement suivant z :

$$\rho_{nf} \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g\beta(T - T_0) \quad (\text{II. 67})$$

- Equation d'énergie :

$$\rho_{nf} \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial y} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II. 68})$$

- Densité volumique :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (\text{II. 69})$$

- Chaleur spécifique :

D'après modèle du Pak et Cho [12].

$$(Cp)_{nf} = (1 - \varphi) (Cp)_f + \varphi (Cp)_s \quad (\text{II. 70})$$

- Coefficient de dilatation volumique :

Modèle du Pak et Cho [12].

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi) \beta_f + \varphi \beta_s \quad (\text{II. 71})$$

- Conductivité thermique :

Modèle de Hamilton et Crosser.

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2\varphi (K_s - K_f)}{(K_s + 2K_f) - \varphi (K_s - K_f)} \quad (\text{II. 72})$$

- Viscosité dynamique :

Pour la viscosité la formule utilisée est celle du modèle de Brinkman.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{((1-\varphi)^{2.5})} \quad (\text{II. 73})$$

## II.10. Nombre sans dimension.

Pour le nanofluide :

- Nombre de Nusselt (Nu).

$$Nu_{nf} = \frac{qL}{K\Delta T} = \frac{hL}{K_{nf}} \quad (\text{II. 74})$$

- h : Coefficient de transfert thermique (w/m<sup>2</sup>k).
- K : Conductivité thermique (w/mk).

- Nombre de Grashof :

$$Gr = \frac{\rho^2 \beta g Q_v L^4}{(\mu^2 K)_{nf}} \quad (\text{II. 75})$$

- Nombre de Richardson :

$$R_i = \left( \frac{Gr}{Re^2} \right)_{nf} \quad (\text{II. 76})$$

## **II.11. Conclusion**

Votre description est assez complète, mais voici une version légèrement reformulée pour plus de clarté :

"Ce chapitre se penche sur les équations liées à l'écoulement, au transfert de chaleur et à la longueur d'écoulement. Nous examinons ces équations dans le contexte d'un écoulement laminaire, en prenant en compte des caractéristiques géométriques telles que deux cavités triangulaires de dimensions  $(L \times H)$  et  $(L \times L)$ , chacune avec une entrée et une sortie. Ces cavités incluent également un cylindre de diamètre  $(2r)$  positionné au milieu. Les équations d'écoulement reposent sur trois lois fondamentales : la loi de conservation de la masse, la loi de la quantité de mouvement et la loi de conservation de l'énergie. Le nanofluide considéré est incompressible, avec l'hypothèse que ses propriétés restent constantes et que le volume reste le même tout au long de l'expérience. Nous examinons également plusieurs nombres caractéristiques tels que le nombre de Nusselt, le nombre de Reynolds, le nombre de Hartmann, le nombre de Prandtl, le nombre de Richardson, le nombre de Grashof et le nombre de Darcy.

Les parois peuvent être constituées de tôles planes, ondulées, tubes cylindriques ou de sections variables. Les études théoriques englobent la résolution des équations de Navier-Stokes couplées à l'équation de chaleur.

Pour décrire les phénomènes physiques, on a recours fréquemment à des équations mathématiques, qui représentent un modèle de ces phénomènes. Les formules mathématiques doivent exprimer le comportement des phénomènes dans l'espace et dans le temps.

# CHAPITRE III

### **III.1. Introduction.**

Dans ce chapitre, nous explorons l'impact d'un champ magnétique sur l'écoulement d'un nanofluide autour d'un obstacle et son influence sur l'augmentation du transfert de chaleur en convection forcée, examinée dans deux cas distincts. Nous débutons par la modélisation mathématique du système et la définition des conditions aux limites pour chaque configuration étudiée au cours de deux analyses.

Dans la première étude, un nanofluide s'écoule dans une cavité triangulaire de diamètre cylindrique ( $2r$ ) et de volume  $H \times L$ , remplie de matériaux homogènes. Pour la deuxième étude, une cavité de forme carrée est considérée, avec des parois chaudes et froides variantes, abritant un nano-liquide hybride dans quatre scénarios distincts.

Les simulations numériques sont réalisées pour un modèle monophasique, où la phase fluide et les nanoparticules sont en équilibre thermodynamique et se déplacent à la même vitesse locale. Le logiciel industriel COMSOL MULTIPHYSICS est utilisé pour résoudre les équations de l'énergie, du mouvement et de la continuité au cours de cette expérimentation numérique. Il est important de souligner que les résultats numériques obtenus avec ce code concordent parfaitement avec ceux de la littérature.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de l'utilisation d'un champ magnétique dans le nanofluide sur l'amélioration de l'écoulement et du transfert de chaleur par convection forcée dans les flux externes par rapport au fluide porteur.

### **III.2. Simulations numériques 2D.**

Les simulations numériques sont réalisées pour un modèle monophasique dans lequel la phase fluide et les nanoparticules sont en équilibre thermodynamique, se déplaçant à la même vitesse locale.

Pendant cette expérimentation numérique, nous avons principalement utilisé le logiciel industriel COMSOL pour résoudre les trois équations de conservation (II.5) (II.9) (II.13), en tenant compte des conditions aux limites. Avant cela, nous avons minutieusement vérifié que les résultats numériques obtenus avec ce logiciel étaient en parfaite concordance avec ceux issus d'un code spectral développé au sein de notre équipe de recherche. De plus, en adoptant une cellule de grande extension horizontale, nous avons obtenu des résultats conformes à ceux

dérivés de l'étude classique de la stabilité linéaire de la solution conductive dans une cellule horizontale d'extension infinie.

L'objectif fondamental de cette étude est d'évaluer si l'utilisation de nanofluides apporte une amélioration du transfert de chaleur par convection forcée en présence de champs magnétiques, comparativement aux fluides traditionnels, à travers plusieurs configurations.

### **III.3. Présentation du logiciel COMSOL.**

COMSOL est un environnement puissant et interactif pour modéliser toute sorte de problèmes scientifiques régis par des Equations aux Dérivées Partielles (PDE).

Il compile alors intérieurement un ensemble de PDEs représentant le modèle entier. On accède à la puissance de COMSOL comme produit autonome par une interface utilisateur graphique flexible, ou par le manuscrit en programmant dans le langage MATLAB. En résolvant les PDEs, COMSOL emploie la méthode des éléments finis. Le logiciel fait l'analyse par éléments finis avec adaptation de maillage et contrôle de l'erreur en utilisant différentes variétés de solveurs numériques.

### **III.4. Méthode des éléments finis.**

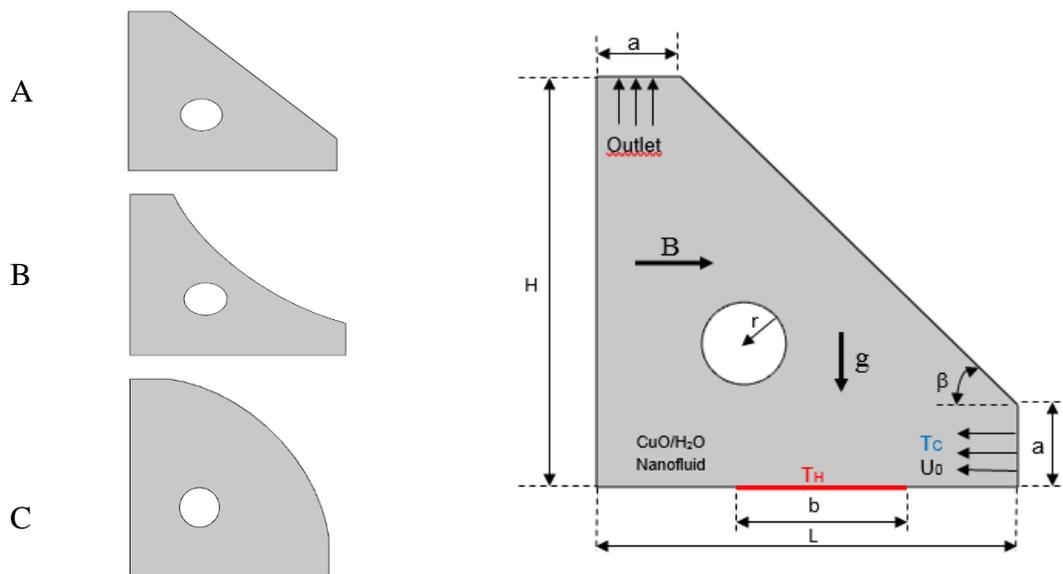
La méthode des éléments-finis (MEF) est une méthode d'approximation numérique de solutions de problèmes aux limites statiques ou dynamiques.

- Discrétiser les différents termes de la forme intégrée de l'équation de transport (transformer l'équation différentielle ponctuelle en un système d'équations algébriques).
- Incorporer les conditions initiales et aux limites appropriées. Résoudre le système algébrique final par une méthode de résolution (itérative ou semi-itérative ou directe) pour un champ approché de  $\phi$  dans des points discrets du domaine considéré.

### III.5. Simulation numérique sur une cavité d'un triangle.

#### III.5.1. Configuration géométrique un récipient triangulaire.

Le nanofluid s'écoule à l'intérieur d'une cavité triangulaire de diamètre cylindrique ( $2r$ ) et de volume  $H \times L$ . La figure III.1 illustre graphiquement le problème avec une géométrie de base. La cavité est remplie d'un nanofluid ( $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$ ), où une partie de la paroi latérale inférieure est maintenue à une température élevée, tandis que la paroi d'entrée est maintenue froide. Au centre de l'enceinte, un cylindre est positionné à une température constante. Dans un système bidimensionnel, nous supposons que le nanofluid en écoulement est stable et incompressible.



**Figure III.1.** Illustration les domaines physiques (A ; B ; C).

#### III.5.2 Méthode Numérique.

Cette recherche examine le transfert de chaleur mixte bidimensionnel dans trois cavités distinctes avec des ouvertures d'entrée/sortie.

Une source de chaleur est localisée sur une partie de la paroi inférieure. Plusieurs paramètres, tels que ( $10 \leq Re \leq 150$ ), ( $0,1 \leq Ri \leq 10$ ), ( $0 \leq Ha \leq 100$ ), et ( $0,02 \leq \phi \leq 0,08$ ), sont analysés sur trois modèles différents. Les résultats révèlent des variations significatives en présence du champ magnétique. On observe une diminution de la vitesse du flux de chaleur avec

l'augmentation du nombre de Reynolds. La valeur du transfert de chaleur augmente dans la deuxième cavité, atteignant une valeur maximale, tandis qu'elle demeure faible dans la première et la troisième cavité. De plus, une amélioration du  $Nu_{avg}$  est constatée dans la deuxième cavité, particulièrement sur la paroi droite, pliée vers l'intérieur, qui présente un  $Nu_{avg}$  plus faible que la première et la troisième cavité. L'amélioration des paramètres  $Ha$  et  $\phi$  contribue à optimiser le transfert thermique par convection. Par ailleurs, avec l'augmentation de la concentration des nanofluides, le nombre moyen de Nusselt dans les trois cavités connaît une augmentation. Ces résultats, obtenus via la simulation avec COMSOL MULTIPHYSICS, concernant l'écoulement d'un nanofluide autour d'un cylindre fixe en régime laminaire ( $10 < Re < 150$ ), sont en accord avec les études publiées. La méthode 'Second ordre' est utilisée pour résoudre cette simulation.

### III.5.3. Modèle mathématique.

Dans ce problème, nous supposons que l'écoulement bidimensionnel est laminaire et incompressible. En utilisant la relation de Boussinesq, nous déterminons les coordonnées mathématiques des équations gouvernantes comme suit :

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (III. 1)$$

$$\rho_{nf}(\vec{u} \cdot \nabla \vec{u}) = -\Delta p + \mu_{nf}(\nabla^2 \vec{u}) + (\rho\beta)_{nf}g(T - T_c) \quad (III. 2)$$

$$\vec{u} \cdot \nabla T = \alpha_{nf} \nabla^2 T \quad (III. 3)$$

Les équations ci-dessus sont non-dimensionnées en utilisant les paramètres sans dimension suivants :

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{u_0}, V = \frac{v}{u_0}, P = \frac{p}{\rho_f u_0^2}, \theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}, Re = \frac{\rho_f u_0 H}{\mu_f}, Pr = \frac{\rho_f (c_p)_f}{K_f},$$

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta_f(T_H - T_c)H}{u_0^2}, Gr = \frac{g\beta_f(T_H - T_c)H^3}{\theta_f^2}, Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\rho_{nf}\theta_f}} \quad (III. 4)$$

Les équations de gouvernance sans dimension sont données comme suit :

$$\nabla \vec{U} = 0 \quad (III. 5)$$

$$\vec{U} \cdot \nabla \vec{U} = \frac{1}{(1 - \phi) + \phi \frac{\rho_s}{\rho_f}} \left[ -\Delta P + \frac{1}{Re} \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \nabla^2 \vec{U} + \frac{Ri}{Re} \left( 1 - \phi + \phi \frac{\rho_s \beta_s}{\rho_f \beta_f} \right) \theta \right] \quad (III. 6)$$

$$\vec{U} \cdot \nabla \theta = \frac{1}{Re \cdot Pr} \frac{\frac{K_{nf}}{K_f}}{(1 - \phi) + \phi \frac{(\rho c_p)_s}{(\rho c_p)_f}} \nabla^2 \theta \quad (III. 7)$$

### III.5.4. Propriétés thermo physiques du nanofluide.

La densité effective, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique du nanofluide peuvent être calculés à l'aide des formules suivantes :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (III. 8)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s \quad (III. 9)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_s \quad (III. 10)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (III. 11)$$

La conductivité thermique du nanofluide utilise le modèle proposé par Bekhadra et Bellakhal [79] et la viscosité dynamique fournie par Brinkman [76] qui sont exprimés sous la forme suivante :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)} \quad (III. 12)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (III. 13)$$

Il peut utiliser le nombre de Nusselt local  $Nu_{loc}$  pour déterminer l'écoulement entre la paroi chaude et le fluide qui entre dans l'enceinte.

$$Nu = \frac{hH}{K_f} = -\frac{K_{nf}}{K_f} \left( \frac{\partial\theta}{\partial X} \right)_{x=0} \quad (III. 14)$$

Pour obtenir un nombre de Nusselt moyen, la paroi chaude est incorporée le long du nombre de Nusselt local. L'intérieur de la cavité est caractérisé par un transfert thermique total. Ecrire sous la forme suivante :

$$Nu_{avg} = \frac{1}{b} \int_0^b Nudx \quad (III. 15)$$

Avec b est la longueur de la paroi chaude

**Tableau III.1.** Caractéristiques thermophysiques de CuO/Eau [81].

Propriété	Fluide (eau)	CuO
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	997.1	6500
Cp (J/kg k)	4179	540
$\beta$ 10 <sup>-5</sup> (1/k)	21	29
K (W/mk)	0.613	18

### III.5.5. Conditions aux limites.

Les conditions aux limites sans dimensions peuvent être énoncées comme suit :

- Paroi chauds:  $U = V = 0, u = v = 0, \theta = 1, T = TH$  (III. 16)

- Paroi froide:  $U = -U0, u = -u0, v = 0, V = 0, \theta = 0, T = Tc$  (III. 17)

- Parois adiabatiques et sur les surfaces du cylindre:  $u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0$  (III. 18)

### III.5.6. Validation et analyse de l'indépendance du maillage.

Afin de garantir l'indépendance des résultats vis-à-vis des grilles, six grilles différentes sont utilisées. Le nombre de Nusselt moyen ( $Nu_{avg}$ ) (voir tableau III.2) est utilisé pour évaluer la stabilité du flux et du transfert de chaleur en fonction du nombre de grilles. La quatrième grille est sélectionnée comme grille finale. La confiance dans l'approche numérique de la solution est l'un des critères les plus importants pour obtenir des résultats fiables. Nous avons validé notre modèle en nous appuyant sur des études antérieures menées par Alireza et al. [82], ainsi que par Ghasemi et al. [83]. Ces résultats sont présentés dans le tableau III.3 et le tableau III.4.

**Tableau III.2.** Effet de la taille de la maille sur  $Nu_{avg}$  avec ( $Ha = 20 ; Ra = 10^6$ ).

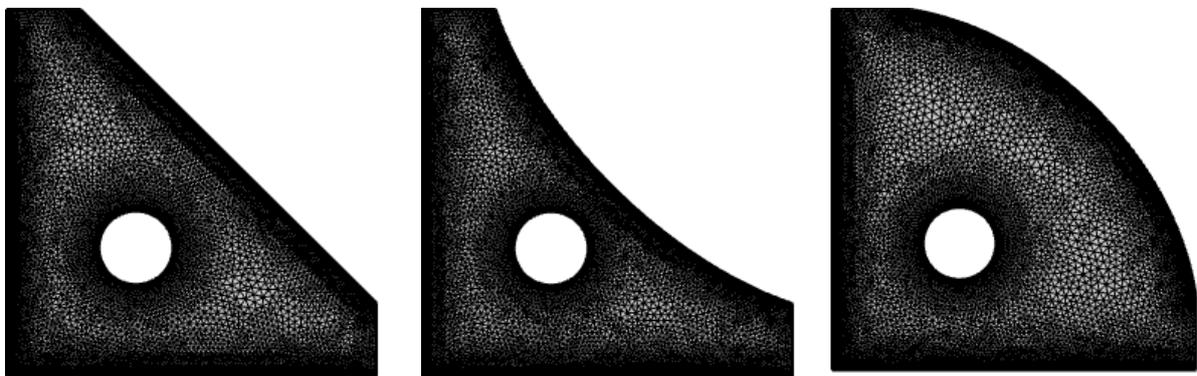
Grille (Numéro de l'élément)	1138	1477	2136	5527	15815	19573
$Nu_{avg}$	1.9934	2.0156	2.0500	2.1397	2.1397	2.1397

**Tableau III.3.** Une comparaison : Nombre moyen de Nusselt à ( $\phi = 0,04$  et  $Ha=0$ ) avec la référence [82].

$\theta_s$	Re = 30		Re = 100	
	Présente étude	Ref [82]	Présente étude	Ref [82]
288.15	1.575	1.57	2.52	2.56
303.15	2.53	2.51	3.79	3.83
333.15	6.10	6.05	6.99	6.97

**Tableau III.4.** Comparaison à  $\phi = 0,06$  entre la présente étude et Réf [82], Réf [83].

Ra	Ha	Présente étude	Ref [82]	Ghasemi et al [83]
$10^3$	30	1.186	1.182	1.184
$10^4$	0	4.955	4.966	4.968
	30	1.297	1.290	1.291
$10^5$	30	3.104	3.107	3.108
	60	1.81	1.805	1.806

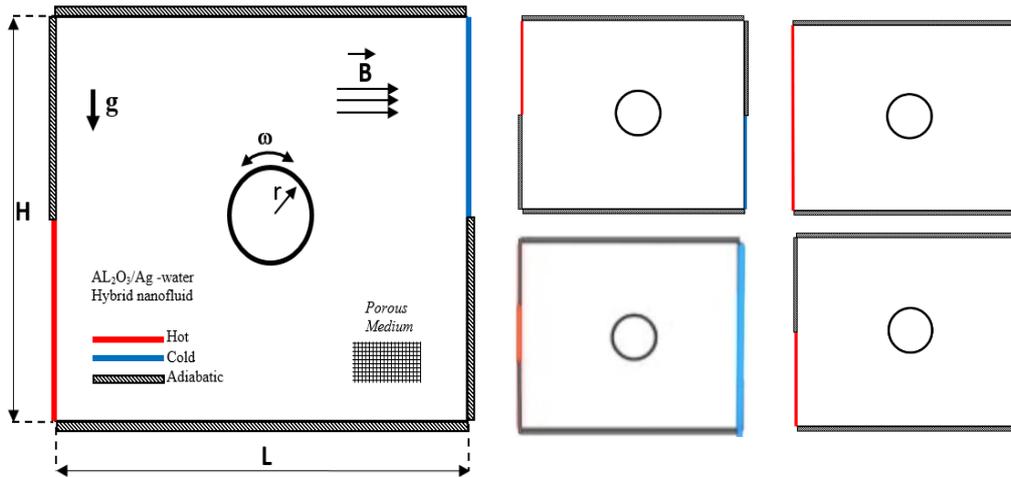


**Figure III.2.** Illustration graphique de la distribution du maillage.

## **III.6 Simulation numérique sur une cavité carré :**

### **III.6.1. Configuration géométrique.**

Cette étude se focalise sur quatre cavités carrées renfermant un cylindre fixe et non rotatif, rempli d'un nanofluide hybride Newtonien incompressible ( $Al_2O_3$ -Ag/eau). Le nanofluide liquide est exposé horizontalement à un champ magnétique fixe. La cavité, de longueur  $L$ , est soumise à une température élevée  $T_h$ , dont la position varie le long de la paroi gauche selon quatre cas : dans le tiers inférieur, le tiers supérieur, le tiers médian, et enfin, dans le quatrième cas, la paroi gauche est complètement chauffée. De manière similaire, la partie froide  $T_c$  de la paroi droite présente quatre cas. Les parois supérieure et inférieure demeurent thermiquement isolées. La figure III.3 illustre graphiquement cette configuration de cavité.



**Figure III.3.** Schémas de différents modèles géométriques.

**Tableau III.5.** Caractéristiques thermos physiques de (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ag/eau) [78].

Propriété	Eau	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ag
Densité	997.1	3970	10500
Chaleur spécifique (J/kg K)	4179	765	235
Conductivité électrique (S/m)	$5.5 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-8}$	$8.1 \times 10^{-4}$
Conductivité thermique (W/mK)	0.613	40	429

### III.6.2. Formulation du problème.

Puisque le fluide est incompressible et Newtonien, le flux est supposé laminaire, et les équations gouvernantes bidimensionnelles sans dimension pour la quantité de mouvement, la masse et l'énergie sont données comme suit [84] :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{III. 19})$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho_{\text{hnf}}} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\nu_{\text{hnf}}}{\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \nu_{\text{hnf}} \frac{u}{K} - \frac{1.75(K)^{-0.5}}{\sqrt{150\varepsilon^2}} u|u| \quad (\text{III. 20})$$

$$\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) = -\frac{1}{\rho_{\text{hnf}}} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{v_{\text{hnf}}}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - v_{\text{hnf}} \frac{v}{K} - \frac{1.75(K)^{-0.5}}{\sqrt{150\varepsilon^2}} v|u| + \beta_{\text{hnf}} g(T - T_{\text{avg}}) - \frac{\sigma_{\text{hnf}}}{\rho_{\text{hnf}}} B_0^2 \quad (\text{III. 21})$$

$$(\rho c_p)_{\text{hnf}} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right) = k_{\text{hnf}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad (\text{III. 22})$$

Lorsque  $\varepsilon$  est la porosité et  $K$  la perméabilité moyenne des pores, écrite comme suit [30] :

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_m^2}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (\text{III. 23})$$

Nous utilisons les variables suivantes pour réécrire les anciennes équations gouvernantes en équations non dimensionnelles [31] :

$$P = \frac{(\rho + \rho_{\text{bf}} g_y) L^2}{\rho_{\text{bf}} \alpha_{\text{bf}}^2}, V = \frac{vL}{\alpha_{\text{bf}}}, U = \frac{uL}{\alpha_{\text{bf}}}, X = \frac{x}{L}, \theta = \frac{T - T_f}{T_h - T_f}, Y = \frac{y}{L}, \quad (\text{III. 24})$$

Les nombres dimensionnels sont donnés et écrits comme suit :

$$Ra = \frac{\beta_{\text{bf}} g (T_h - T_f) L^3}{\alpha_{\text{bf}} v_{\text{bf}}}, Ha = LB_0 \sqrt{\frac{\sigma_{\text{bf}}}{\mu_{\text{bf}}}}, Da = \frac{K}{L^2}, Pr = \frac{v_{\text{bf}}}{\alpha_{\text{bf}}}. \quad (\text{III. 25})$$

Nous pouvons écrire les équations non dimensionnelles comme suit :

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \quad (\text{III. 26})$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\rho_{\text{hnf}}}{\rho_{\text{bf}}} \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{v_{\text{hnf}}}{v_{\text{bf}}} Pr \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right) - \frac{v_{\text{hnf}}}{v_{\text{bf}}} \frac{Pr}{Da} - \frac{1.75(Da)^{-0.5}}{\sqrt{150\varepsilon^{3/2}}} |U|V \quad (\text{III. 27})$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\rho_{\text{hnf}}}{\rho_f} \left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{v_{\text{hnf}}}{v_f} Pr \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right) - \frac{v_{\text{hnf}}}{v_f} \frac{Pr}{Da} - \frac{1.75(Da)^{-0.5}}{\sqrt{150\varepsilon^{3/2}}} |U|V + \frac{\beta_{\text{hnf}}}{\beta_f} Pr Ra \theta + \frac{\sigma_f}{\rho_{\text{hnf}}} \frac{\rho_f}{\rho_{\text{hnf}}} \frac{Pr Ha^2}{\varepsilon \sqrt{Ra}} V \quad (\text{III. 28})$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{\text{hnf}}}{\alpha_{\text{bf}}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}\right) \quad (\text{III. 29})$$

### III.6.3. Génération d'entropie non-dimensionnelle.

La taille de la sortie d'entropie locale est acquise en agrégeant le flux de fusion et les forces avancées. Dans le processus de convection thermique avec l'existence du champ magnétique, la sortie d'entropie locale non dimensionnelle est définie comme suit :

$$S_{\text{gen}} = \frac{k_{\text{hnf}}}{k_{\text{bf}}} \left[ \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)^2 \right] + \chi \frac{\mu_{\text{hnf}}}{\mu_{\text{bf}}} \left\{ (U^2 + V^2) + \text{Da} \left[ 2 \left( \frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 \right] \right\} + \frac{\sigma_{\text{hnf}}}{\sigma_f} \chi \text{Ha}^2 V^2 \quad (\text{III. 30})$$

$$\chi = \frac{\mu_{\text{hnf}} T_{\text{avg}}}{k_{\text{bf}} K} \left( \frac{\alpha_{\text{bf}}}{L(T_{\text{H}} - T_{\text{C}})} \right)^2, T_{\text{avg}} = \frac{T_{\text{H}} + T_{\text{C}}}{2} \quad (\text{III. 31})$$

Nous pouvons écrire les nombres de Nusselt moyen et local le long de la paroi chaude comme suit :

$$\text{Nu}_{\text{loc}} = - \frac{k_{\text{hnf}}}{k_{\text{bf}}} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (\text{III. 32})$$

$$\text{Nu}_{\text{avg}} = \int_0^L \text{Nu}_{\text{loc}} dY \quad (\text{III. 33})$$

### III.6.4. Conditions aux limites.

Les parois de l'enceinte et l'examen des conditions aux limites qui y sont attachées. Les dimensions du précédent sont données comme suit :

- La paroi froide :  $u = v = 0, T = T_c$  (III. 34)

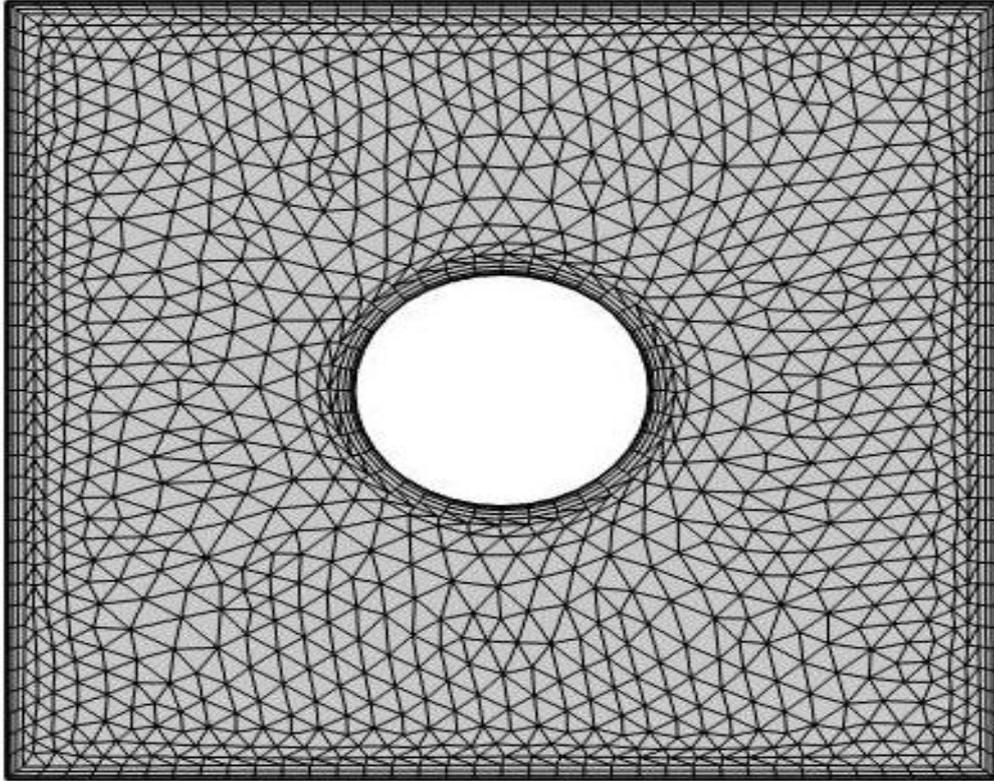
- La paroi chaude :  $u = v = 0, T = T_h$ , (III. 35)

- Les murs isolés :  $u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0$  (III. 36)

### III.6.5. Analyse de l'indépendance de la grille et validation numérique.

Afin de garantir l'indépendance des résultats par rapport au maillage, six grilles différentes sont utilisées dans la deuxième cavité. Le nombre de Nusselt moyen  $\text{Nu}_{\text{avg}}$  (voir tableau III.6) est employé pour évaluer l'indépendance du flux par rapport à la chaleur sur différentes grilles. Le quatrième maillage est retenu comme grille finale. La confiance dans l'approche numérique de la solution demeure l'un des critères essentiels pour obtenir des résultats fiables. Des études antérieures menées par Alireza et al [82], Ghasemi et al [83], Olivsky et al [84], ainsi que

Chamkha et Abu Nada [85], sont utilisées pour valider le modèle adopté dans cette étude. Les résultats de cette validation sont présentés dans les tableaux III.7, III.8 et III.9.



**Figure III.4.** Illustration graphique de la distribution des mailles.

**Tableau III.6.** Estimation de  $S_{gen}$  et  $Nu_{avg}$  pour des résolutions de grille variées.

Taille de maille	1812	2698	7704	21300	27962
$Nu_{avg}$	4.2537	4.2686	4.3600	4.4227	4.4227
$S_{gen}$	38.202	39.575	45.226	49.942	49.942

**Tableau III.7.** Une comparaison du nombre moyen de Nusselt à  $\phi = 0.06$  et  $Ha = 30$  entre la présente étude, les Refs [82] et [83].

Ra	Présente étude	Alireza et al [82]	Ghasemi et al [83]
$10^3$	1.172	1.182	1.184
$10^4$	1.286	1.290	1.291
$10^5$	3.119	3.107	3.108

**Tableau III.8.** Une comparaison du nombre moyen de Nusselt à  $Ra = 10^5$  avec les références [82] et [85].

Ri	$\phi$	Présente étude	Alireza et al [82]	Chamkha and Abu-Nada [85]
1	0.02	4.76	4.76	4.92
	0.01	4.769	4.84	4.95
10	0.02	1.76	1.68	1.72
	0.01	1.90	1.93	2.01

**Tableau III.9.** Comparaison de la génération d'entropie en  $\chi=10^{-2}$  avec [82] et [84].

Ra	Présente étude	Alireza et al [82]	Oliveski et al [84]
$10^3$	4.72	4.58	4.72
$10^5$	19.42	19.14	19.04

### **III.7. Conclusion.**

Dans ce chapitre, nous avons exposé le modèle utilisé pour résoudre le problème dynamique et thermique lié à l'effet d'un champ magnétique sur l'écoulement d'un nanofluide autour d'un obstacle, ainsi que l'augmentation du transfert de chaleur en convection forcée dans deux scénarios distincts. L'écoulement est décrit par les équations de Navier–Stokes, en association avec les conditions classiques de continuité de quantité de mouvement et d'énergie. Les grandeurs caractéristiques de l'écoulement, telles que le coefficient de transfert de chaleur par convection, sont présentées pour évaluer les performances thermiques et hydrauliques du système. Nous avons détaillé le problème physique étudié, les conditions aux limites spécifiées, et présenté.

On suppose un écoulement laminaire avec un nombre de Reynolds compris entre ( $10 \leq Re \leq 150$ ). Nous examinons une convection mixte magnétohydrodynamique dans différentes formes de cavités triangulaires contenant un nanofluide incompressible. Différentes configurations de cavités avec un mur chauffé à température constante sont utilisées pour évaluer l'influence de divers paramètres sur le transfert de chaleur autour d'un cylindre fixe. Dans ce contexte, la convection forcée entre le mur chauffé et le nanofluide dans la cavité vise à améliorer le transfert thermique.

Nous allons établir les équations permettant de modéliser le problème d'écoulement externe en utilisant le libellé complet de la loi de conservation. Les conditions aux limites, les hypothèses simplificatrices, et les conditions initiales nécessaires pour calculer la solution seront présentées.

Enfin présentée les premiers résultats permettant de valider et indépendance de maillage adopté.

# CHAPITRE IV

## **IV.1. Introduction.**

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats numériques obtenus lors de l'étude de l'effet du champ magnétique sur l'accroissement du transfert de chaleur en convection forcée d'un nanofluide à l'intérieur d'une cavité avec des parois chauffées. Les simulations numériques sont réalisées en utilisant un modèle monophasique dans lequel la phase fluide et les nanoparticules sont en équilibre thermodynamique et se déplacent à la même vitesse locale. Pour mener à bien cette étude numérique, le logiciel industriel COMSOL MULTIPHYSICS est utilisé pour résoudre les équations de conservation. Il convient de noter que nous avons préalablement vérifié la concordance parfaite des résultats numériques obtenus avec ce logiciel industriel par rapport à ceux présents dans la littérature.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de l'utilisation d'un champ magnétique sur l'amélioration de l'écoulement et du transfert de chaleur par convection forcée dans les flux externes par rapport au fluide porteur. Ce chapitre de résultats est structuré en trois parties distinctes.

Dans la première partie, un nanofluide, en l'occurrence une solution de  $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$ , circule à travers une cavité triangulaire. Une section de la paroi latérale inférieure est maintenue à une température élevée, tandis que la paroi d'entrée est maintenue à une température basse. De plus, un cylindre est positionné au centre du boîtier, maintenu à une température constante.

Dans la seconde partie, nous étudions quatre cavités carrées, chacune contenant un cylindre fixe non rotatif, toutes remplies d'un nanofluide hybride Newtonien incompressible ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ). Nous appliquons une haute température  $T_h$  qui varie en position le long de la paroi gauche pour quatre scénarios distincts : d'abord dans le tiers inférieur du mur gauche, puis dans le tiers supérieur, suivi du tiers moyen, et enfin, dans le quatrième cas, l'intégralité du mur gauche est chauffée. De manière similaire, nous ajustons la partie froide  $T_c$  le long de la paroi droite pour ces quatre cas. Les parois supérieure et inférieure restent thermiquement isolées.

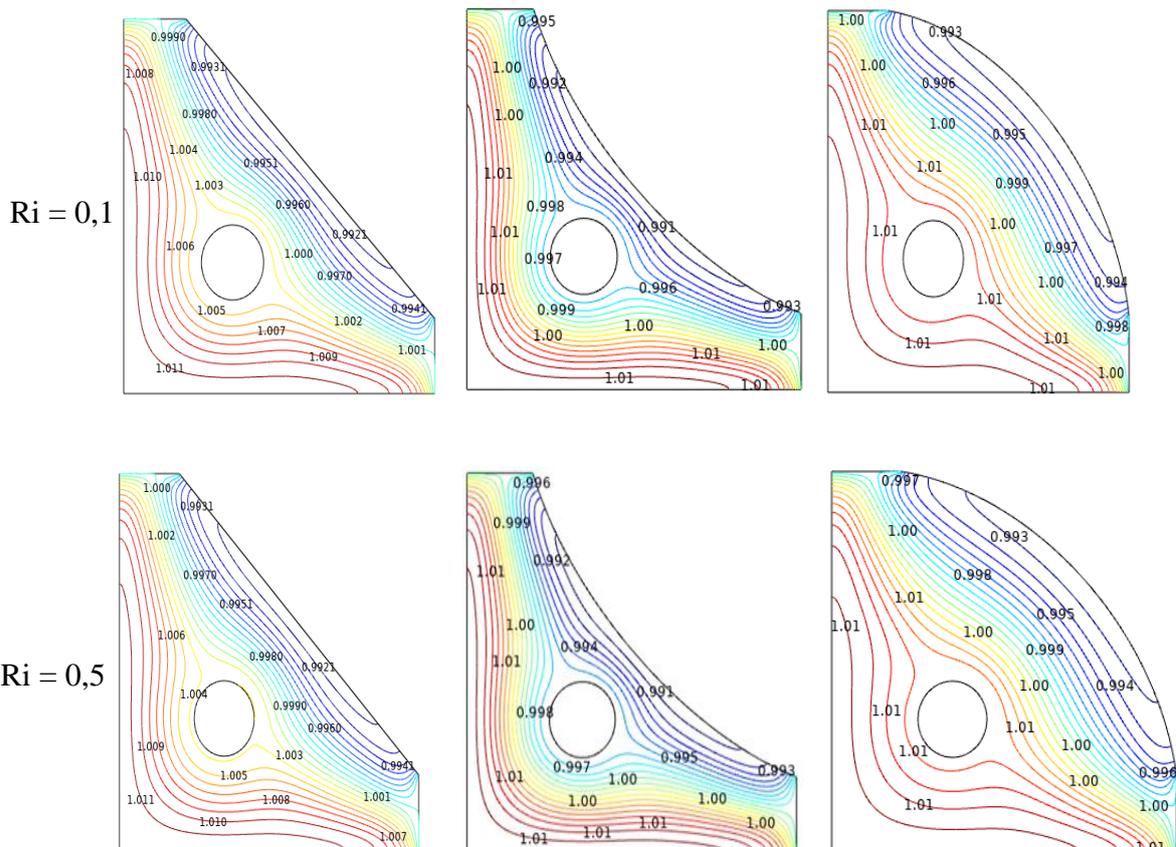
Dans la troisième partie, nous avons entrepris une étude expérimentale basée sur des travaux antérieurs, au cours de laquelle nous avons confirmé les résultats obtenus précédemment et avons réussi à les améliorer.

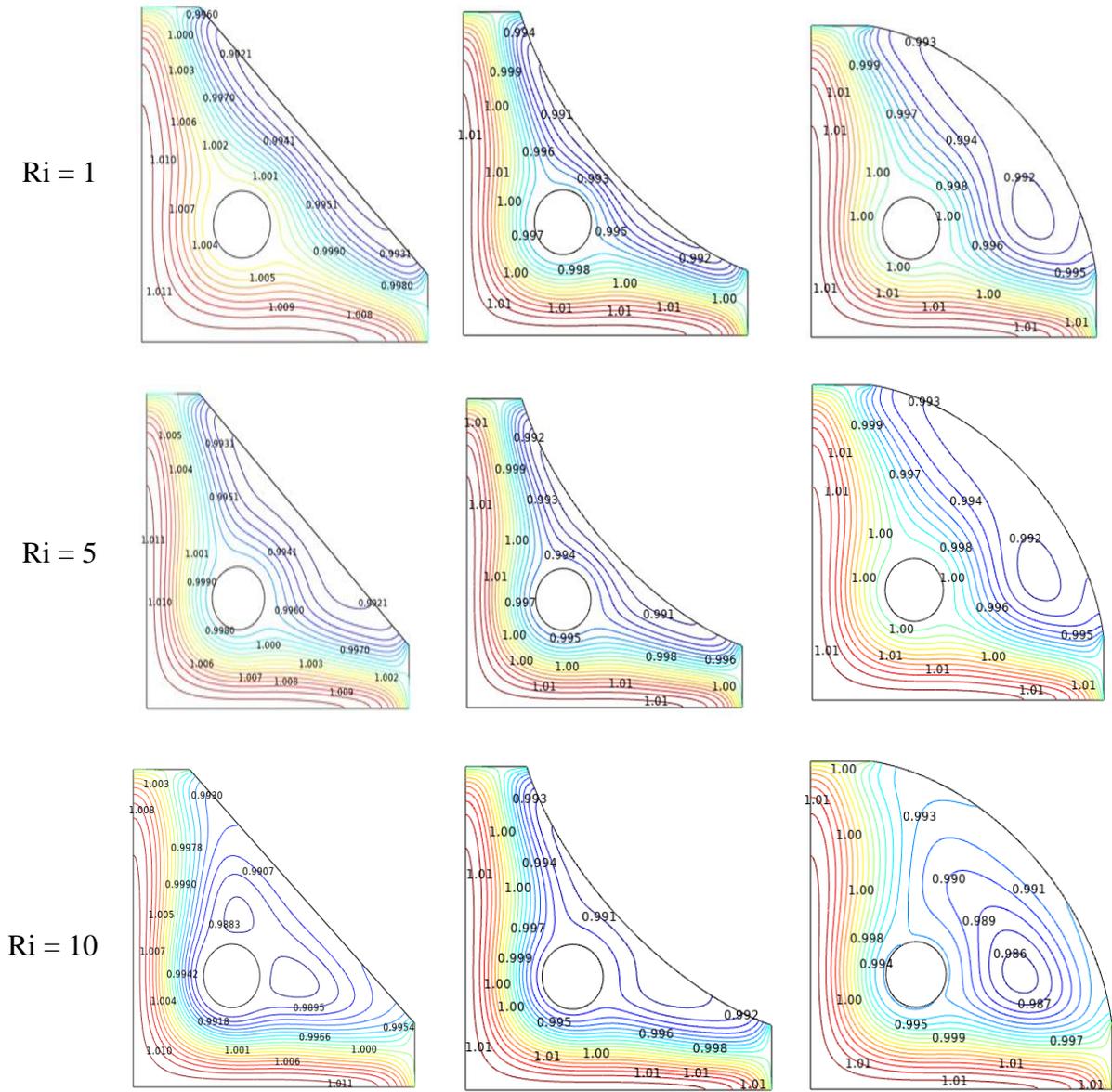
## IV.2. Discussion des résultats d'une simulation numérique sur une cavité d'un triangle.

L'introduction de ce document a abordé l'effet de l'utilisation d'un champ magnétique sur l'écoulement d'un nanofluide, mettant en lumière ses implications significatives pour l'amélioration de l'écoulement et du transfert de chaleur par convection forcée dans les flux externes par rapport au fluide porteur.

### IV.2.1. Effet du nombre de Richardson et nombre de Reynolds sur les lignes de courant.

À cet égard, l'impact du nombre de Richardson et du nombre de Reynolds, pour une valeur constante du nombre de Hartmann, est analysé.



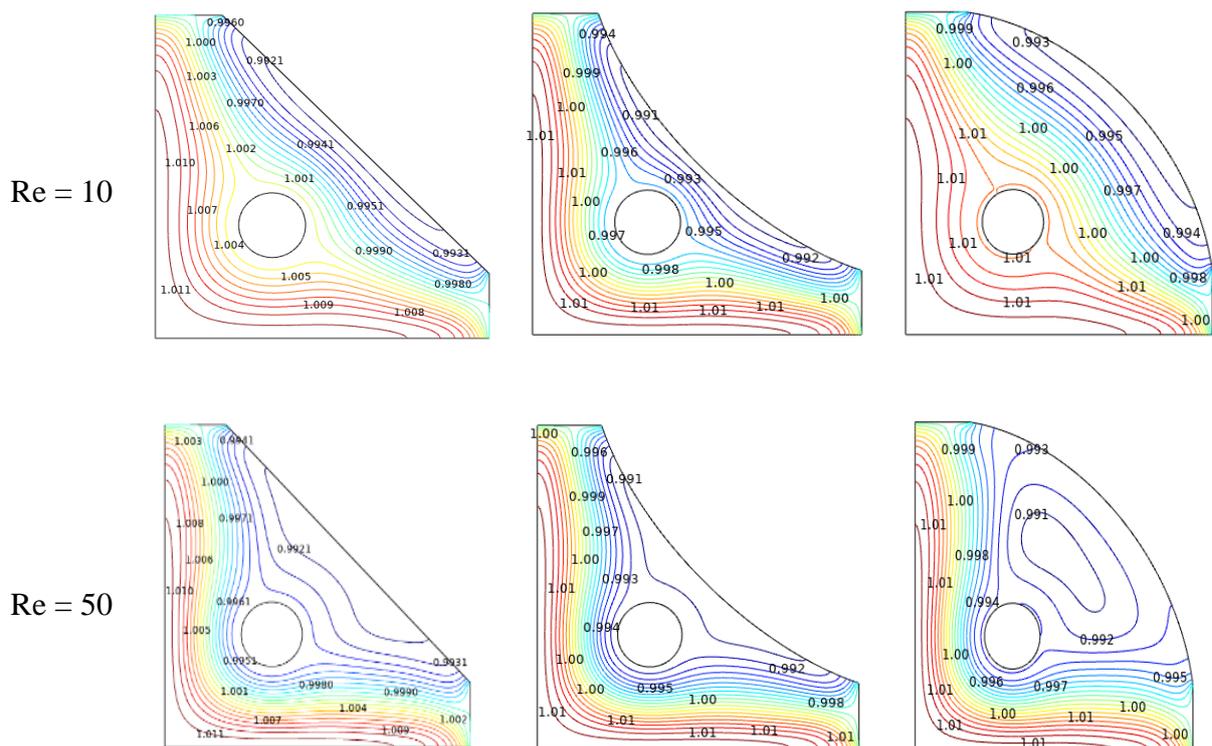


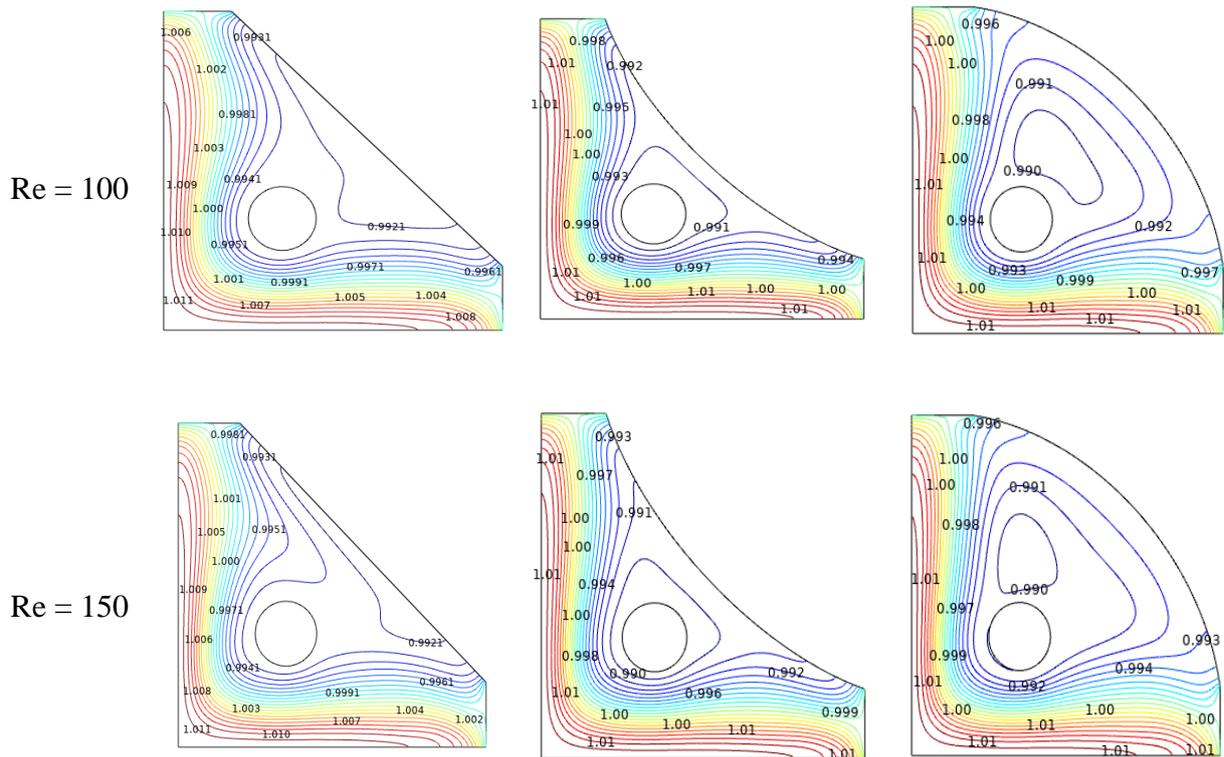
**Figure IV.1.** Changements des lignes de courant ( $\Psi$ ) pour divers Ri (0,1 ; 0,5 ; 1 ; 5 ; 10) à ( $Ha = 0$  ;  $Re = 10$  ;  $\varphi = 0,02$ ) pour différentes formes de cavité.

La figure IV.1. Montre les changements des lignes de courant ( $\Psi$ ) pour diverses valeurs du nombre de Richard Ri ( 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 5 ; 10) à ( $Ha = 0$  ;  $Re = 10$  ;  $\varphi = 0,02$ ), Pour différentes formes de cavité, la distribution des lignes de courant s'améliore selon les résultats présentés, avec une augmentation de la valeur de Ri. De plus, la fonction d'écoulement montre une amélioration avec une valeur plus élevée de Ri. Dans ce cas, le tourbillon est plus prononcé, indiquant une vitesse élevée du tourbillon à l'intérieur de la cavité. Cela améliore également la densité aérodynamique près des parois, conduisant à une augmentation de la température. Par

conséquent, la taille du vortex augmente dans cette zone. Ainsi, le modèle de la fonction d'écoulement indique clairement qu'un fluide froid pénètre dans la cavité puis se dirige vers la sortie. Ces résultats sont cohérents avec la littérature.

La Figure IV.2. Changements des lignes de courant ( $\Psi$ ) pour divers  $Re$  (10 ; 50 ; 100 ; 150) à ( $Ha = 0$  ;  $\phi = 0,02$  ;  $Ri = 0,1$ ), Pour différentes formes de cavité, il est observé que, à des valeurs plus élevées de  $Re$ , les forces de flottabilité deviennent plus importantes, induisant un mouvement convectif plus efficace du fluide. À des valeurs élevées de  $Re$ , l'effet de flottabilité devient encore plus prononcé, entraînant un transport maximal par convection libre de la paroi inférieure chauffée vers la paroi droite refroidie. Il est à noter que l'intensité des courbes de flux augmente au centre de l'enceinte, comme illustré dans la Figure IV.2. De plus, cette section suggère que les courbes de flux de convection sont influencées par les variations des valeurs de  $Re$  tout en maintenant le nombre de Hartmann constant.





**Figure IV.2.** Changements des lignes de courant ( $\Psi$ ) pour divers Re (10 ; 50 ; 100 ; 150) à ( $Ha = 0$  ;  $\phi = 0,02$  ;  $Ri = 0,1$ ) pour différentes formes de cavité.

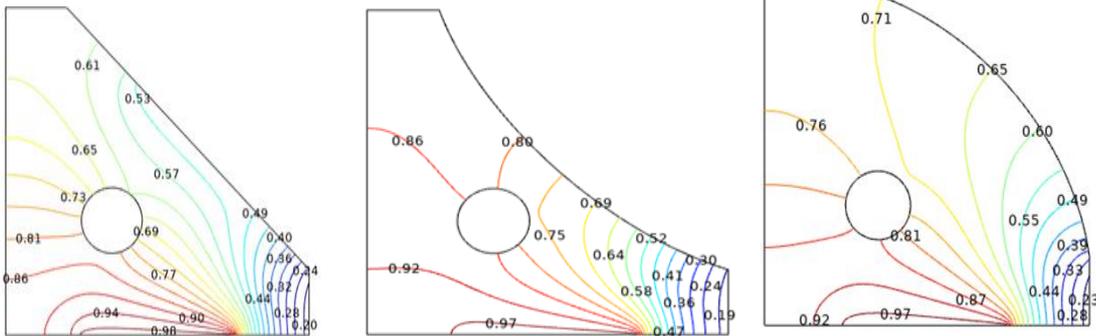
#### **IV.2.2. Effet du champ magnétique sur la température.**

Dans ce scénario, l'analyse se concentre sur l'impact des champs magnétiques sur la fonction de température. À cette fin, l'effet du nombre de Richardson et du nombre de Reynolds, pour une valeur constante du nombre de Hartmann, est examiné.

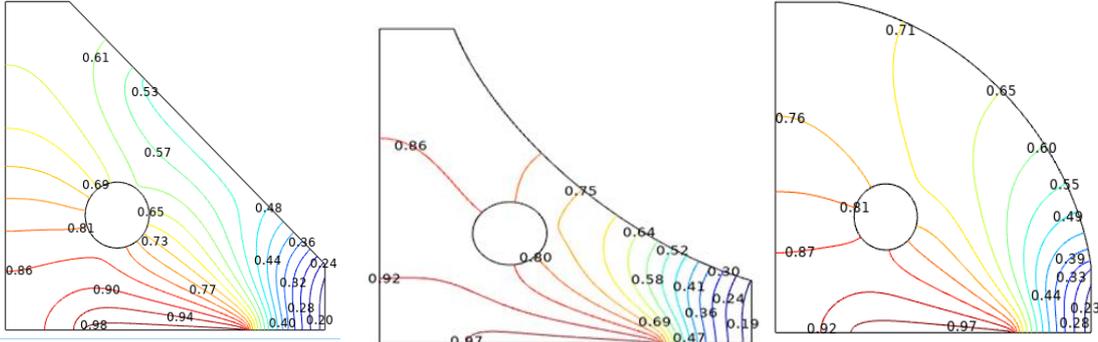
La figure IV.3. Illustre les changements de la température (T) pour diverses valeurs du nombre de Richard Ri ( 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 5 ; 10) à ( $Ha = 0$  ;  $Re = 10$  ;  $\phi = 0,02$ ), Pour différentes formes de cavités, les résultats indiquent que le ratio du transfert de chaleur influence de manière significative l'état de la frontière thermique. Une augmentation de Ri entraîne une augmentation significative du transfert thermique. De plus, la variation de Ri provoque un changement notable de la température.

**Chapitre VI : Simulations numériques et comparaison des résultats à l'aide d'une expérience**  
Data schow.

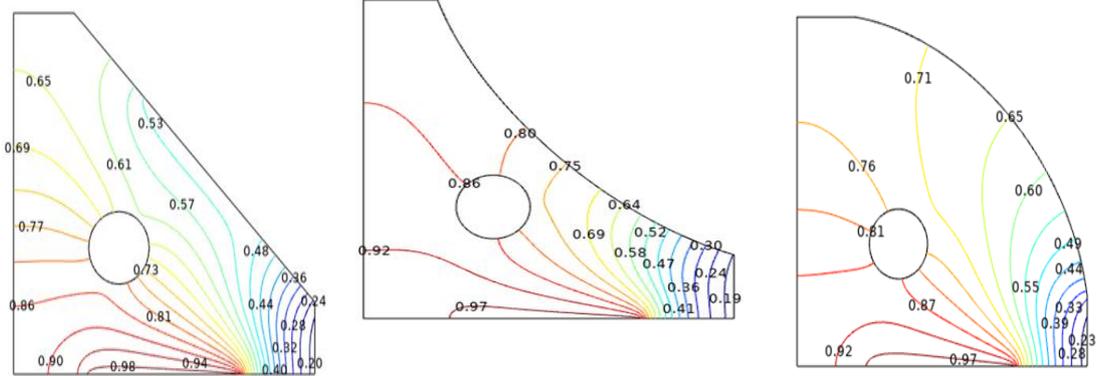
Ri = 0,1



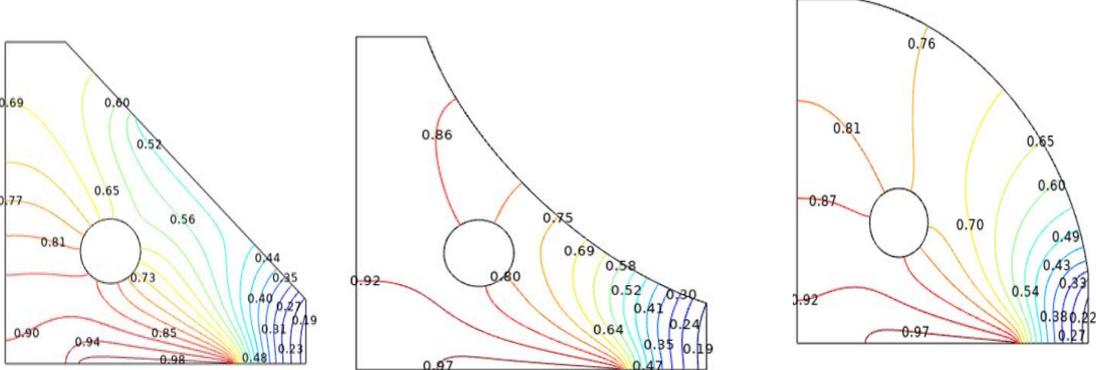
Ri = 0,5

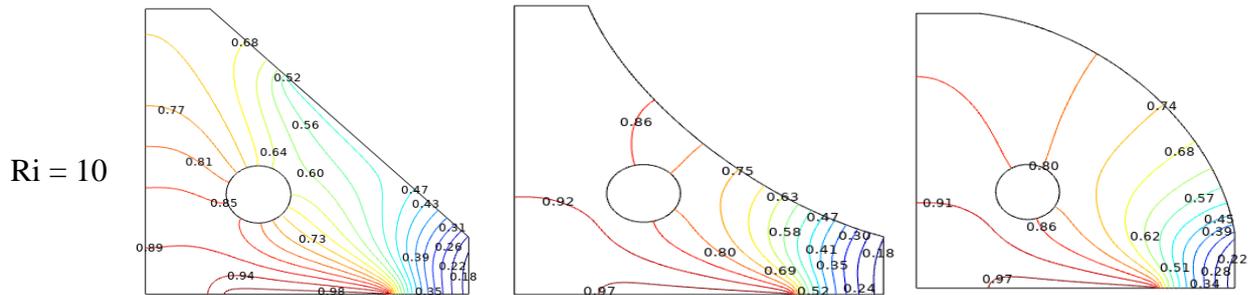


Ri = 1



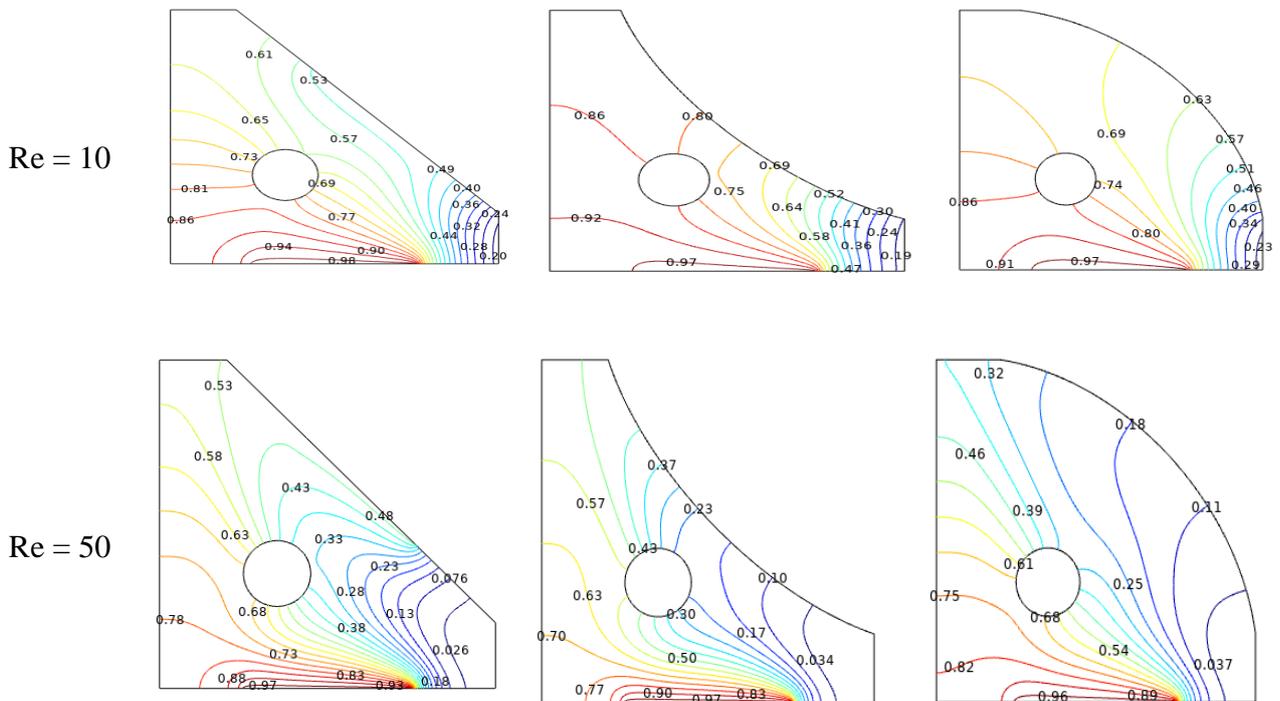
Ri = 5

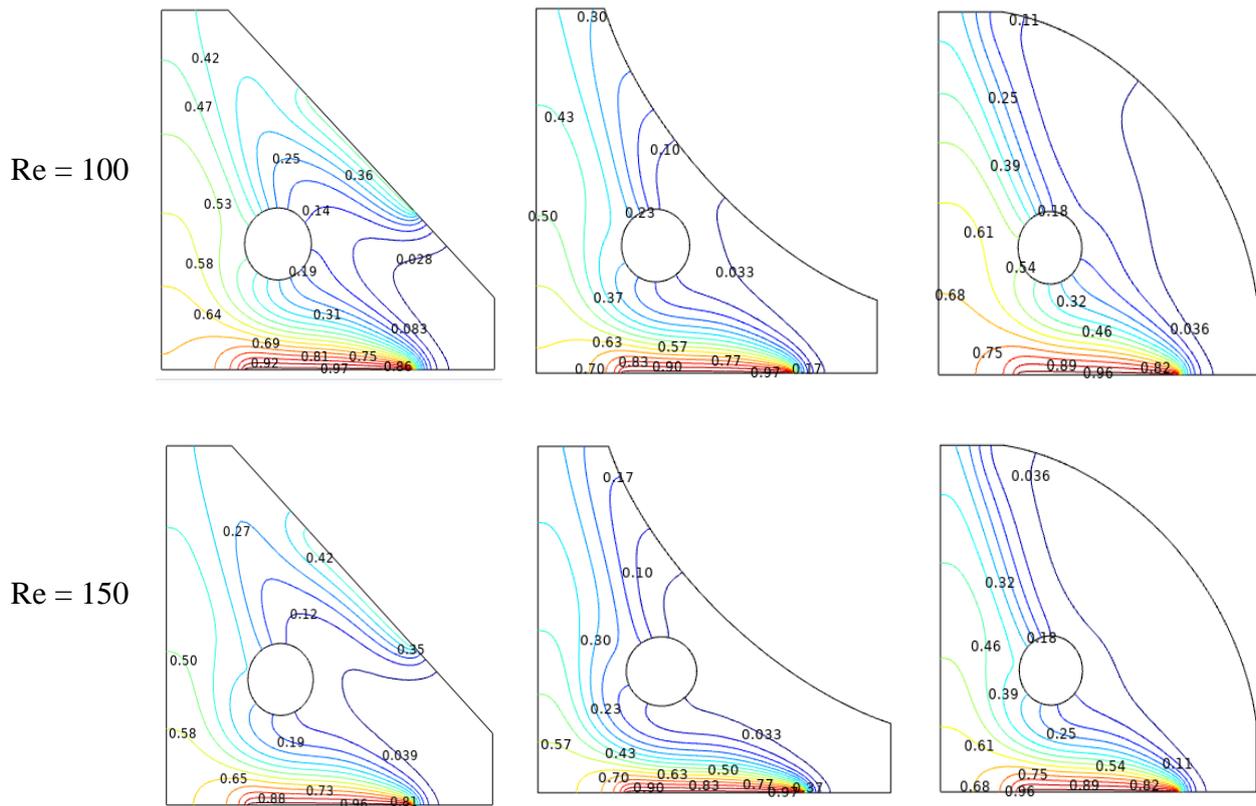




**Figure IV.3.** Changements de la température (T) pour divers Ri ( 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 5 ; 10) à ( $Ha = 0$  ;  $Re = 10$  ;  $\varphi = 0,02$ ) pour différentes formes de cavités.

La figure IV.4. Montre les changements de la température (T) pour divers Re (10 ; 50 ; 100 ; 150) à ( $Ha = 0$  ;  $\varphi = 0,02$  ;  $Ri = 0,1$ ), Pour différentes formes de cavité, l'augmentation de Re joue un rôle crucial dans la convection thermique. Les lignes isothermes montrent une déformation significative, indiquant une dispersion accrue de la chaleur à l'intérieur de la cavité. Cette section met également en évidence que la température du flux subit des modifications en modifiant les valeurs des nombres de Reynolds tout en maintenant le nombre de Hartmann constant. La variation de Re démontre un impact significatif sur le transfert de température à l'intérieur de l'enceinte.





**Figure IV.4.** Changements de la température ( $T$ ) pour divers  $Re$  (10 ; 50 ; 100 ; 150) à ( $Ha = 0$  ;  $\phi = 0,02$  ;  $Ri = 0,1$ ), pour différentes formes de cavités.

### IV.2.3. Effet de divers paramètres sur le nombre de Nusselt.

Cette section se concentre sur la variation du nombre de Nusselt pour des valeurs spécifiques des nombres de Reynolds, de Richardson et de Hartmann.

Figure IV.5. Représente le changement de  $Nu_{avg}$  avec  $Re$  pour  $Ri$  varier à  $Ha = 0$  et  $\phi = 0,02$ . L'effet de  $Ri$  sur le nombre de Nusselt moyen se traduit par une augmentation du nombre de Nusselt moyen. Cet impact de  $Ri$  sur  $Nu$  est plus prononcé pour des nombres de Reynolds élevés par rapport aux nombres de Reynolds faibles. Cependant, pour  $Re = 10$ , le nombre de Nusselt moyen reste constant lorsque  $Ri$  augmente, car le transfert de température se produit principalement par conduction, indépendamment de l'influence d'un champ magnétique. Ces calculs révèlent que c'est l'effet de convection qui influence l'évolution du  $Nu$  moyen en fonction de la valeur de  $Ri$ . La figure illustre une augmentation des valeurs de  $Nu$  avec des valeurs croissantes de  $Ri$ , établissant ainsi une relation directe entre  $Nu$  et  $Ri$ .

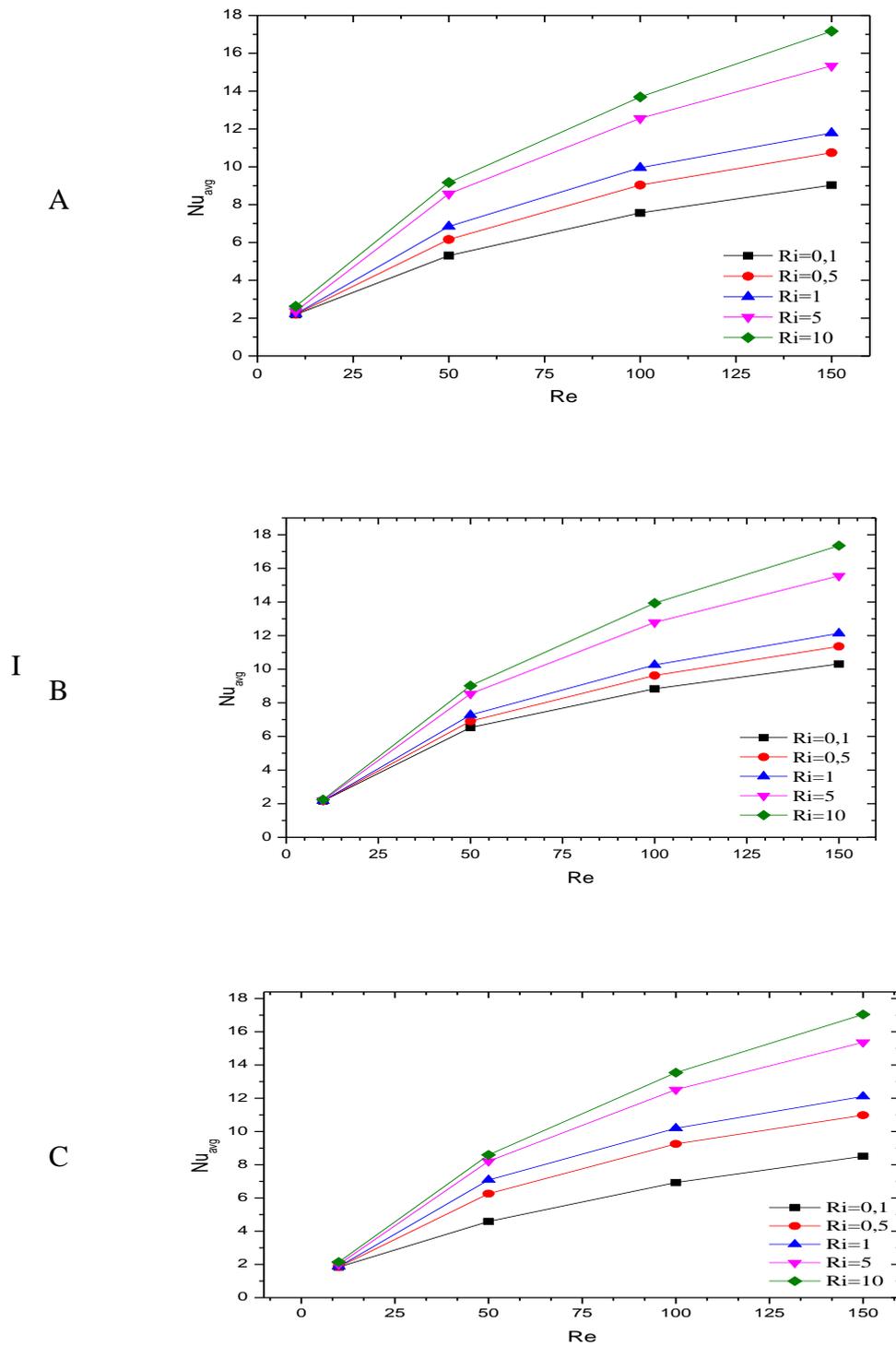
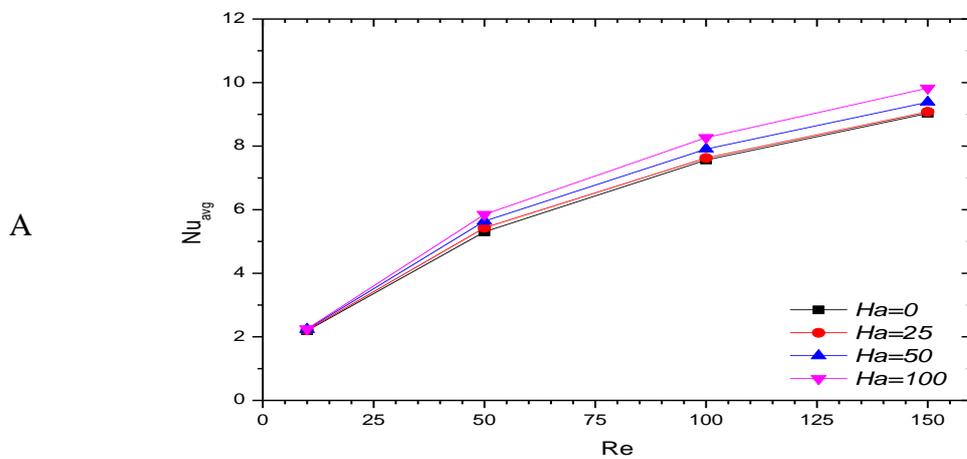
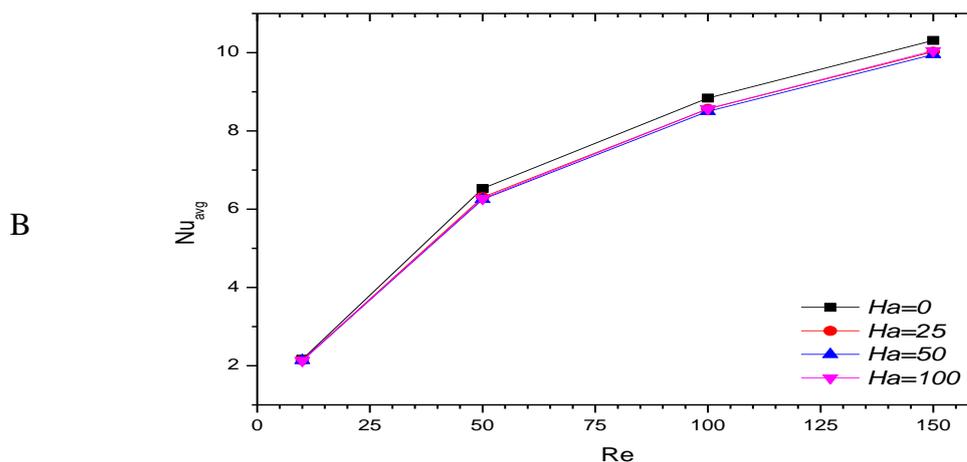


Figure IV.5. Variation de  $Nu_{avg}$  avec  $Re$  pour divers  $Ri$  de différentes formes de cavité à ( $Ha = 0$  et  $\phi = 0,02$ ).

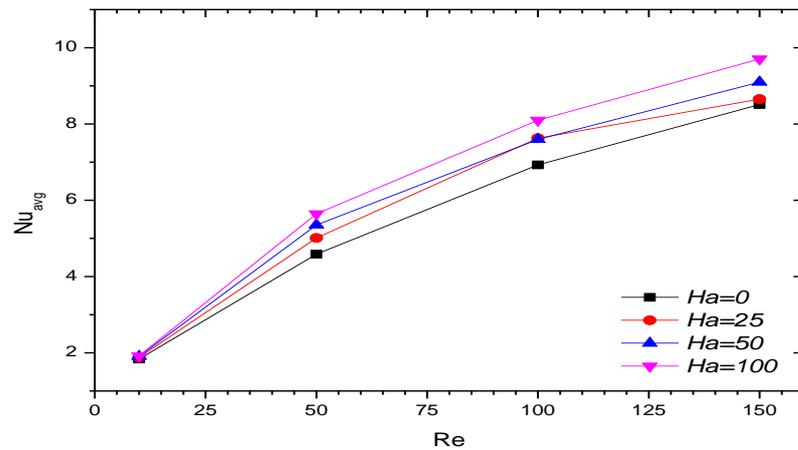
La Figure IV.6. Illustre l'évolution du nombre moyen de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds pour divers nombres de Hartmann à ( $Ri = 0,1$  et  $\varphi = 0,02$ ). L'évolution de  $Nu_{avg}$  en fonction du nombre de Reynolds  $Re$  pour différents  $Ha$  montre que  $Nu_{avg}$  s'accroît avec des valeurs croissantes de  $Re$  pour le paramètre  $Ha$ , mais diminue en augmentant  $Ha$  dans la deuxième cavité (B). La moyenne du transfert de chaleur augmente, et cette augmentation décroît avec le changement du champ magnétique. Cette variation est attribuée à l'influence du champ magnétique externe qui prédomine sur le champ d'inhibition de l'écoulement. En conséquence, on anticipe une augmentation du nombre moyen de Nusselt avec l'augmentation du nombre de Hartmann.



II



C



**Figure IV.6.** Évolution du nombre moyen de Nusselt avec Reynold pour différents Ha de différentes formes de cavités à ( $\varphi = 0,02$  et  $Ha = 0$ ).

La figure IV.7. Montre l'évolution du nombre de Nusselt moyen en fonction de Reynold pour divers  $\varphi$  à ( $Ha = 0$  et  $Ri = 0,1$ ). Le comportement de la dépendance du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique des nanoparticules (NPs) est illustré dans cette figure. On observe une augmentation du nombre de Nusselt moyen avec l'augmentation du nombre de Reynolds, et cette augmentation devient significative pour  $Re > 50$ .

Figure IV.8. Représente l'évolution du nombre de Nusselt moyen en fonction de Reynolds pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 0$  ;  $\varphi = 0,02$  et  $Ri = 0,1$ ). Les résultats révèlent une amélioration du nombre de Nusselt moyen au niveau de la deuxième cavité de la paroi droite, qui est repliée vers l'intérieur. Cette dernière est caractérisée par un  $Nu_{avg}$  plus faible par rapport à la première et à la troisième. De plus, il est observé que tant  $Re$  que  $Nu_{avg}$  montrent une amélioration.

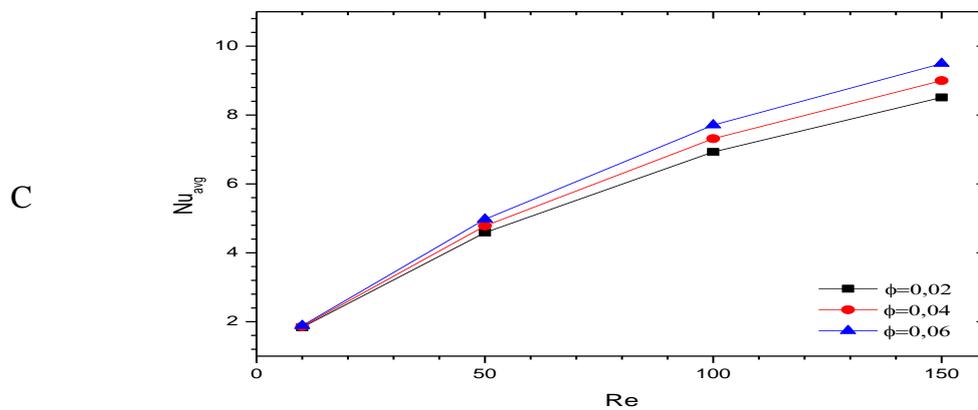
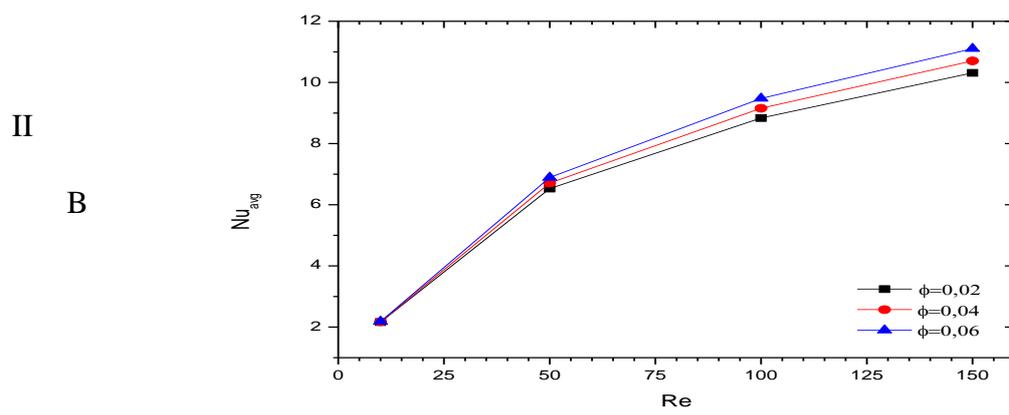
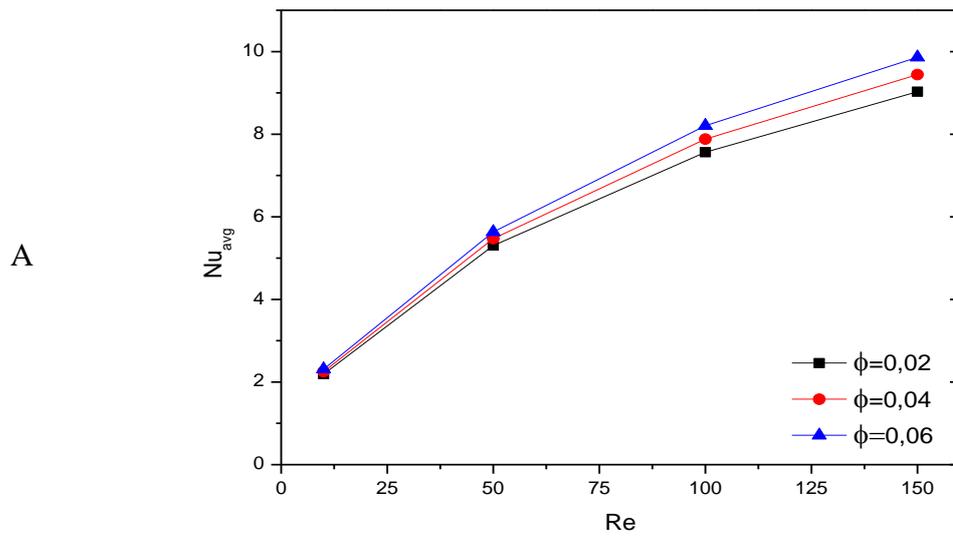
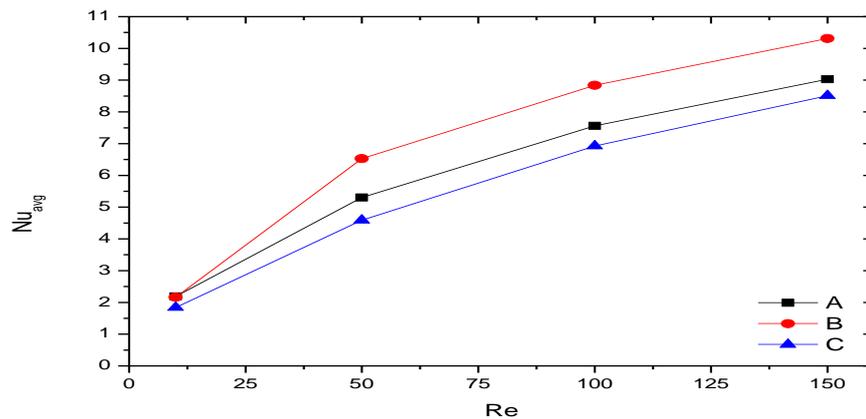
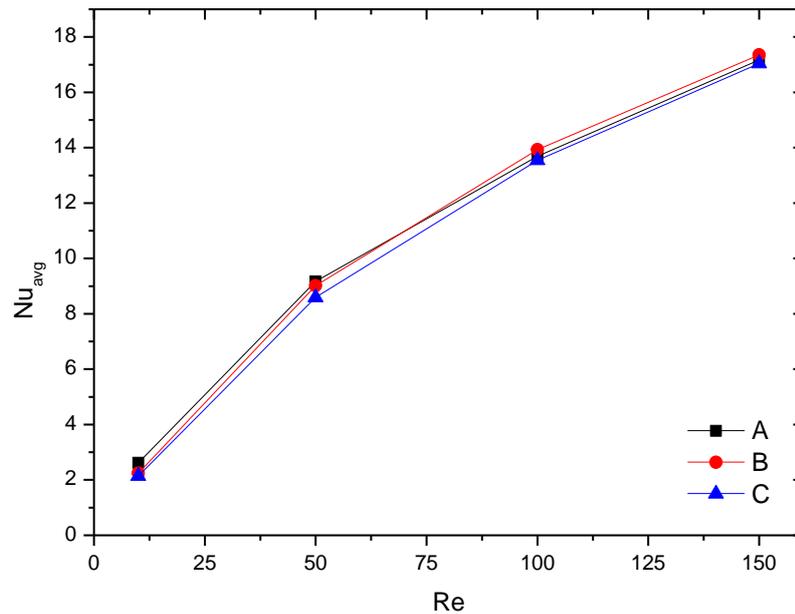


Figure IV.7. Variations de  $Nu_{avg}$  avec  $Re$  pour divers  $\phi$  de différentes formes de cavités à ( $Ha = 0$  et  $Ri = 0,1$ ).



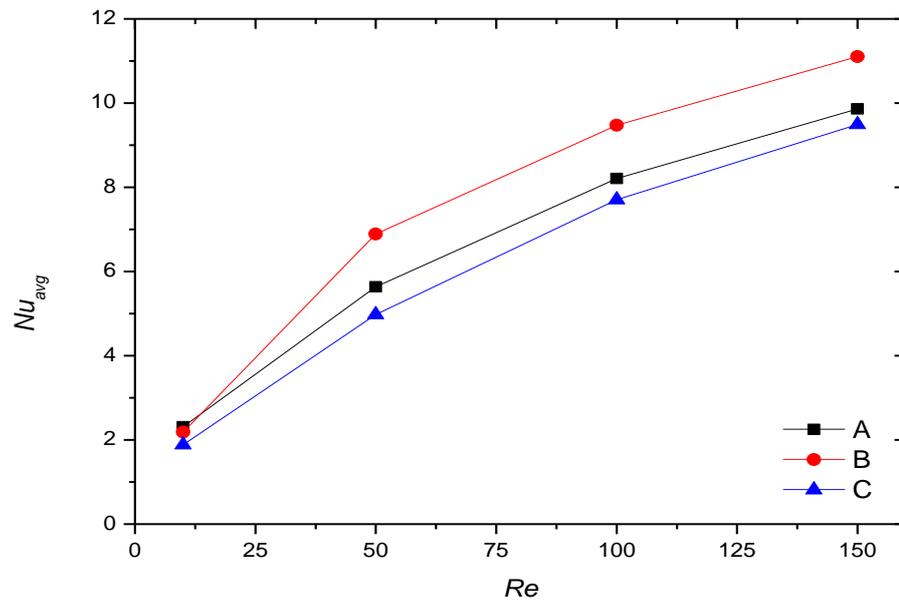
**Figure IV.8.** Evolution du nombre de Nusselt moyen avec Reynolds pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 0$  et  $\varphi = 0,02$  et  $Ri = 0,1$ ).

La figure IV.9. Montre l'évolution du nombre de Nusselt moyen en fonction de Reynolds pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 0$  et  $\varphi = 0,02$  et  $Ri = 10$ ), Avec l'augmentation du nombre de Richardson  $Ri$  dans les trois cavités, on observe une convergence notable du nombre de Nusselt moyen lorsque  $Ri$  atteint la valeur de 10. Ainsi, le changement de forme de la cavité ne semble pas influencer significativement le transfert de chaleur à des valeurs élevées de Richardson  $Ri = 10$ .

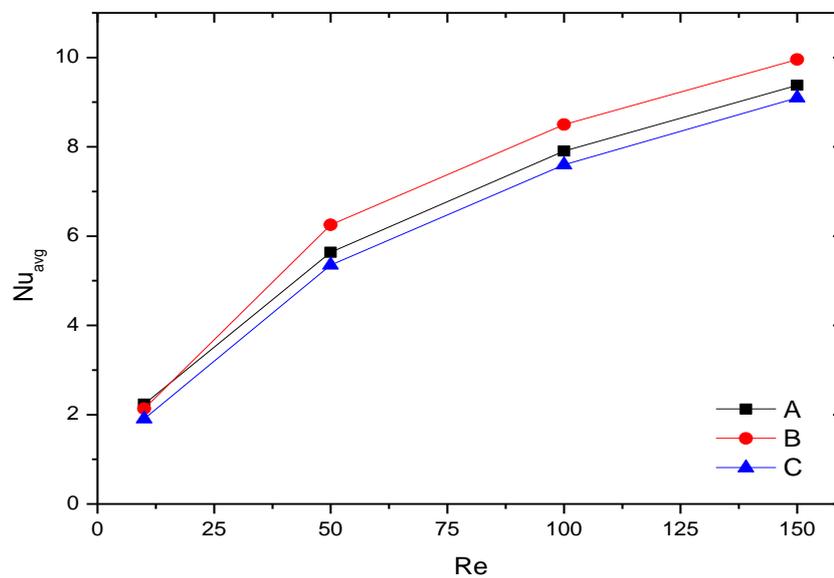


**Figure IV.9.** Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du Reynolds pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 0$  et  $\varphi = 0,02$  et  $Ri = 10$ ).

La figure IV.10 illustre l'évolution du nombre de Nusselt moyen en fonction du Reynolds pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 0$  et  $\varphi = 0,06$  et  $Ri = 0,1$ ). La Figure IV.11 illustre les variations du  $Nu_{avg}$  avec  $Re$  pour diverses formes de cavité à ( $Ha = 50$  et  $\varphi = 0,02$  et  $Ri = 0,1$ ). Les Figures IV.10 et IV.11 examinent le nombre de Nusselt moyen pour différentes formes de cavités. Lorsque les valeurs de  $Ha$  et  $\varphi$  sont plus élevées et que le nombre de Reynolds augmente, une amélioration du Nusselt est observée dans la deuxième cavité (B), surpassant celle de la première (A) et de la troisième (C) cavité. Ainsi, l'amélioration des paramètres  $Ha$  et  $\varphi$  conduit à une amélioration du transfert thermique convectif.



**Figure IV.10.** Changement du nombre moyen de Nusselt avec Reynolds pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 0$  ;  $\varphi = 0,06$  et  $Ri = 0,1$ ).



**Figure IV.11.** Changement du nombre moyen de Nusselt avec Reynold pour diverses formes de cavités à ( $Ha = 50$  ;  $\varphi = 0,02$  et  $Ri = 0,1$ ).

### **IV.3. Discussion des résultats d'une simulation numérique sur une cavité carré.**

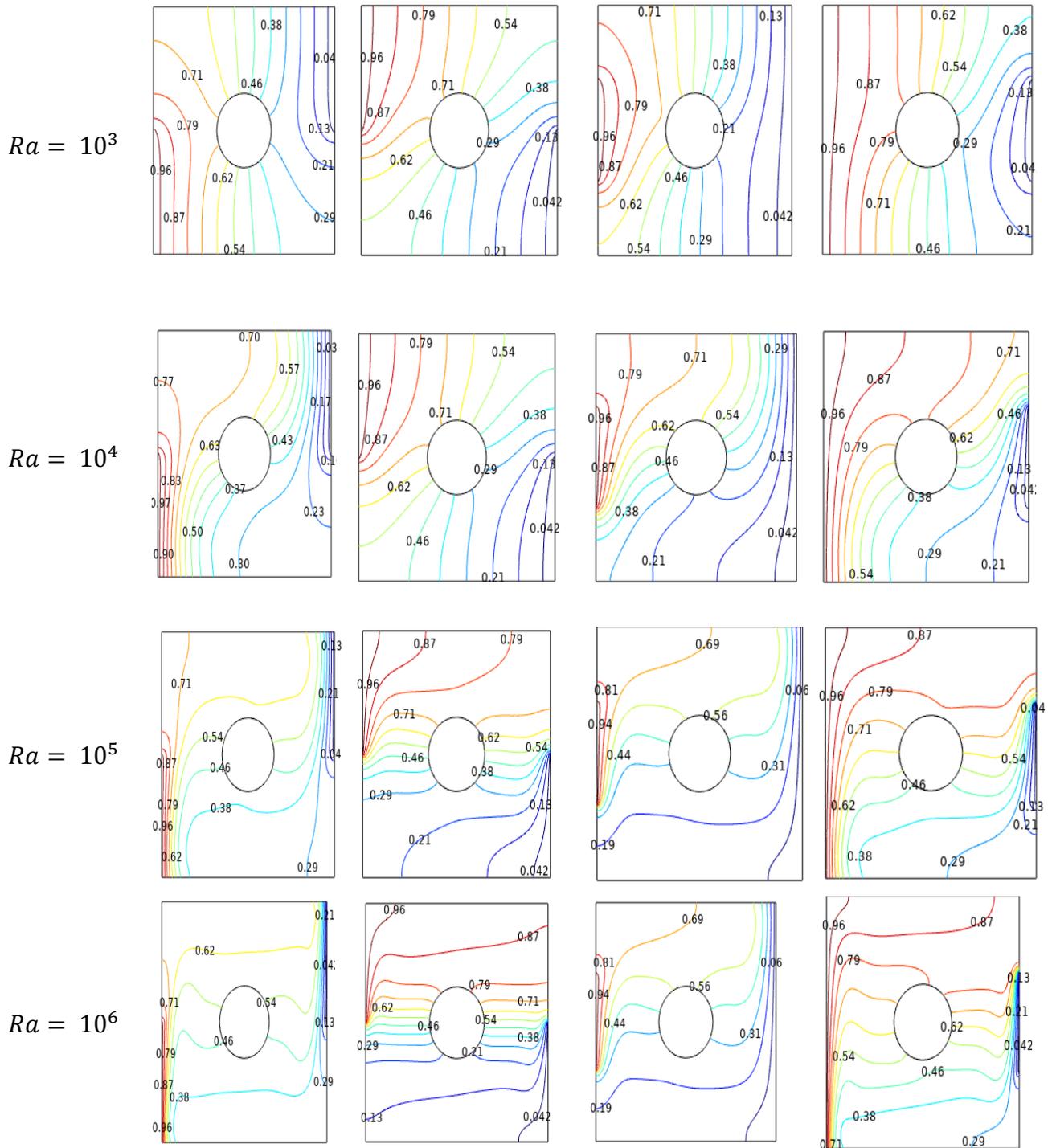
En utilisant le modèle susmentionné, un récipient carré avec un cylindre circulaire est positionné au centre. Dans cette section, nous présentons les données numériques obtenues concernant la génération d'entropie, les lignes de courant et les isothermes. De plus, les courbes du nombre de Nusselt moyen ( $Nu_{avg}$ ) et de l'entropie générale ( $S_{gen}$ ) sont représentées en fonction des différents paramètres suivants : ( $10^3 < Ra < 10^6$ ), ( $0 < Ha < 100$ ), ( $10^{-5} < Da < 10^{-2}$ ), ( $0,02 < \phi < 0,08$ ), ( $0,2 < \varepsilon < 0,8$ ). Le schéma d'écoulement est également pris en compte dans cette analyse.

#### **IV.3.1 Effet du nombre de Rayleigh.**

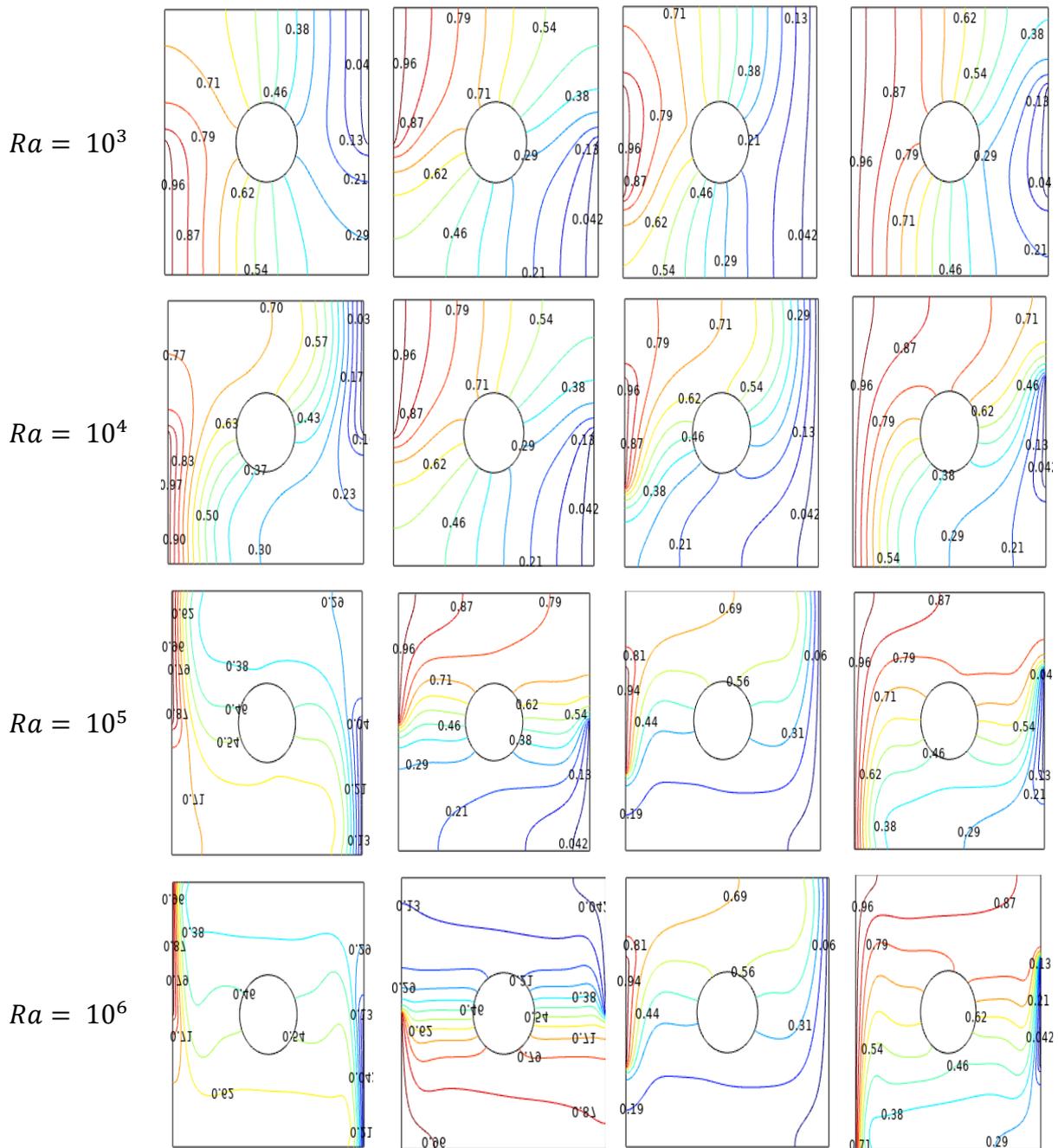
La figure IV.12. Illustration la  $\psi_{max}$  dans les quatre cavités carrées chargées par le nanofluide ( $Al_2O_3-Ag/eau$ ) pour différents nombres de Rayleigh  $Ra$  à ( $Ha = 0$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\phi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ). Bien que l'emplacement de la source de chaleur ait été modifié, le mouvement du nanofluide a dominé toute la cavité avec l'augmentation de  $Ra$ . Les résultats diffèrent avec un changement dans l'emplacement de la source de chaleur. Près de la paroi chauffée, la ligne de courant a formé deux périmètres, tandis que près de la paroi refroidie, la cavité a formé un seul périmètre. Une augmentation de Rayleigh conduit également à une cessation du contrôle vers l'extrémité du côté de refroidissement.

La figure IV.13. Illustration l'isotherme dans la cavité carrée remplie par le nanofluide ( $Al_2O_3-Ag/eau$ ) pour différents nombres de Rayleigh  $Ra$  à ( $Ha = 0$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\phi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ). Nous observons la distribution de la température qui est presque uniforme. Bien que la position de la source de chaleur ait été modifiée, à l'exception de la zone adjacente à la source de chaleur. Avec un  $Ra$  élevé et sous l'influence de la convection naturelle, les profils de température à l'intérieur de la cavité changent légèrement. Ainsi, l'augmentation de température est graduelle pour les zones à haute température.

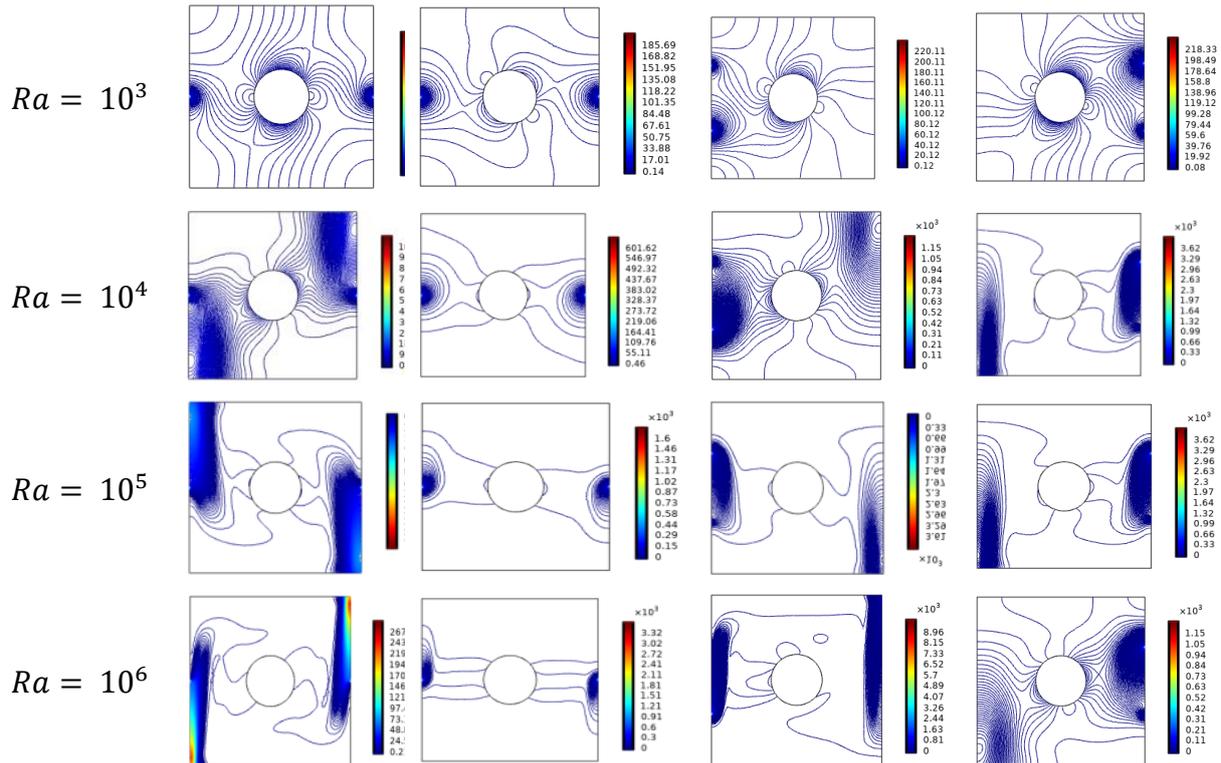
La figure IV.14. Illustration l'entropie dans la cavité remplie par le nanofluide ( $Al_2O_3-Ag/eau$ ) pour différents nombres de Rayleigh  $Ra$  à ( $Ha = 0$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\phi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ). L'entropie générale se manifeste des deux côtés thermiques de la cavité. Dans la région poreuse, les variations d'entropie augmentent pour des valeurs plus basses de  $Ra$ . À mesure que le nombre de Rayleigh augmente, cette tendance se reflète.



**Figure IV.12.** Illustration de la  $\psi_{\max}$  dans les quatre cavités chargées par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents nombres de Rayleigh  $Ra$  à ( $Ha = 0$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\varphi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ).



**Figure IV.13.** Illustration de l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $Al_2O_3$ -Ag/eau) pour différents nombres de Rayleigh  $Ra$  à ( $Ha = 0$  ;  $\epsilon = 0,2$  ;  $\phi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ).



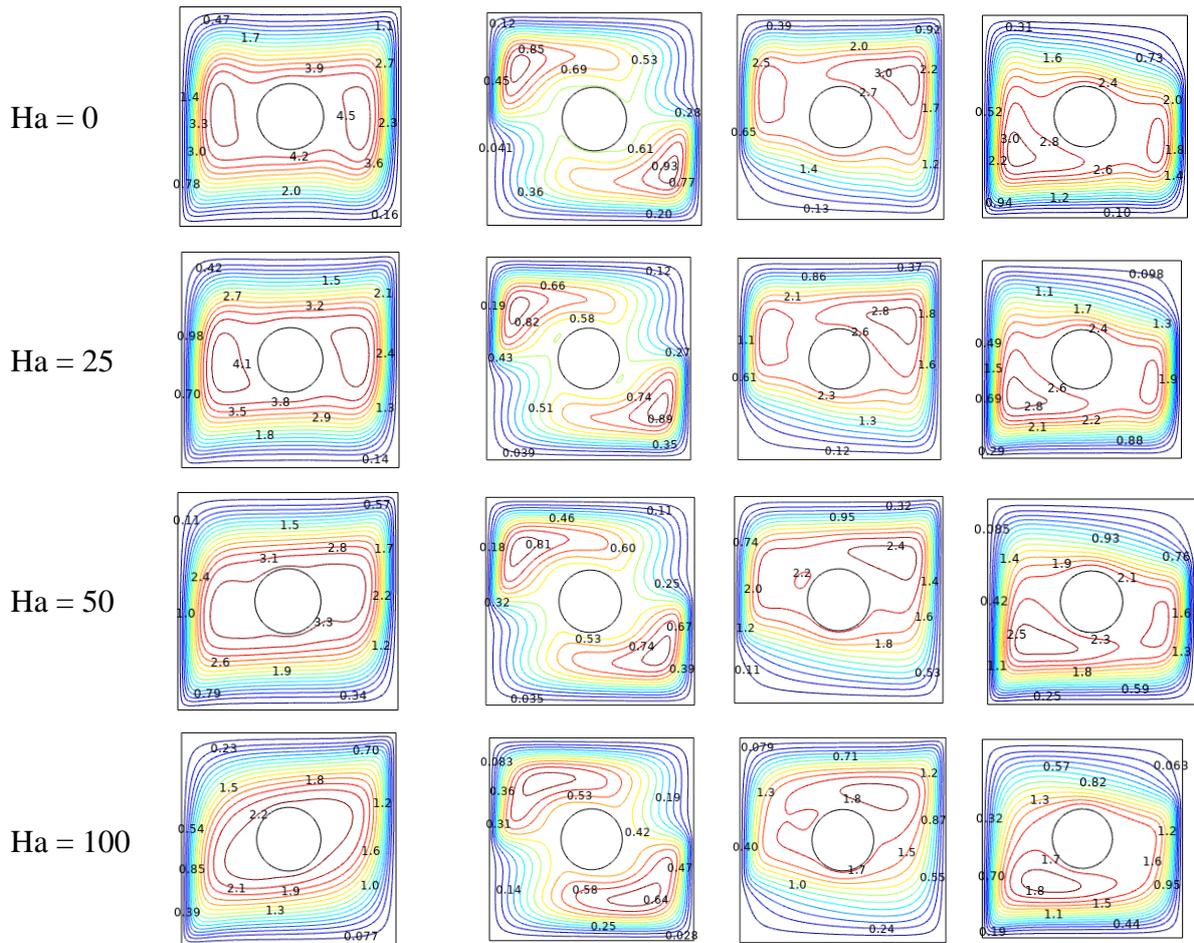
**Figure IV.14.** illustration l'entropie dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $Al_2O_3$ -Ag/eau) pour différents nombres de Rayleigh  $Ra$  à ( $Ha = 0$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\varphi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ).

### IV.3.2. Effet du nombre de Hartmann.

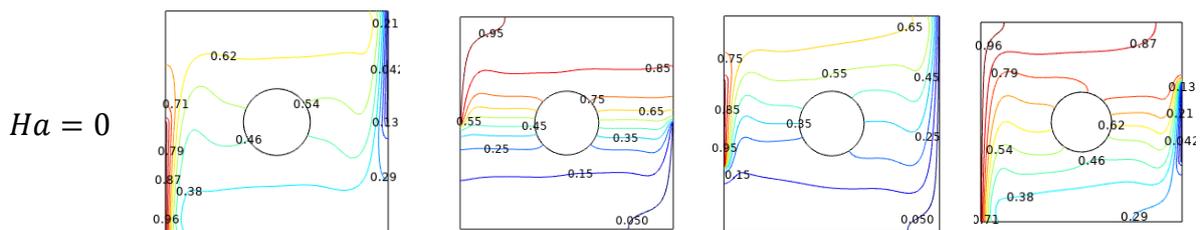
La figure IV.15. Illustre la ligne de courant dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $Al_2O_3$ -Ag/eau) pour différents  $Ha$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\varphi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ). Nous pouvons modéliser les changements visqueux provoqués par les forces électromagnétiques avec les forces opposées à travers le nombre de Hartmann ( $Ha$ ) en considérant les variations de température. Indépendamment de la source de chaleur, une observation commune est la formation de structures circulaires dans la zone chauffée. Cela est attribuable à la résistance élevée à l'écoulement. Lorsque le nombre de Hartmann est plus élevé, la force de ces lignes circulaires s'étend jusqu'au fond de la cavité.

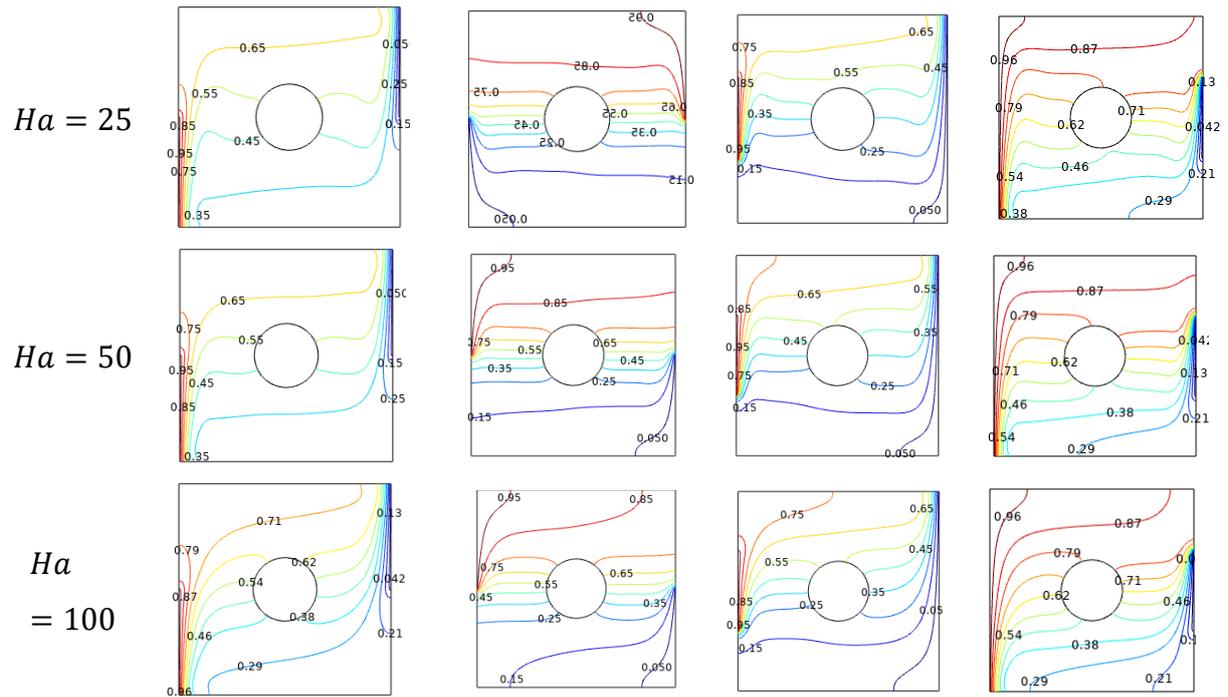
La figure IV.16. Illustration l'isotherme dans quatre cavités remplies de nanofluide ( $Al_2O_3$ -Ag/eau) pour différents  $Ha$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\varphi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ). La température du fluide à l'intérieur de la cavité est légèrement dissipée en raison du confinement magnétique de part et d'autre. L'isotherme s'éloigne de la surface aux valeurs élevées de Hartmann. L'isotherme plus froide couvre la région inférieure de l'alésage.

La figure IV.17. Illustration l'entropie dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $Ha$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\varphi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ). Nous observons que, quelle que soit la source de chaleur, l'entropie du  $Ha$  suit une tendance inverse à celle du  $Ra$ . Lorsque l'effet magnétique augmente, les lignes d'entropie se dispersent aux deux extrémités, puis convergent vers la partie centrale de la cavité, formant ensuite deux périmètres à chaque extrémité.

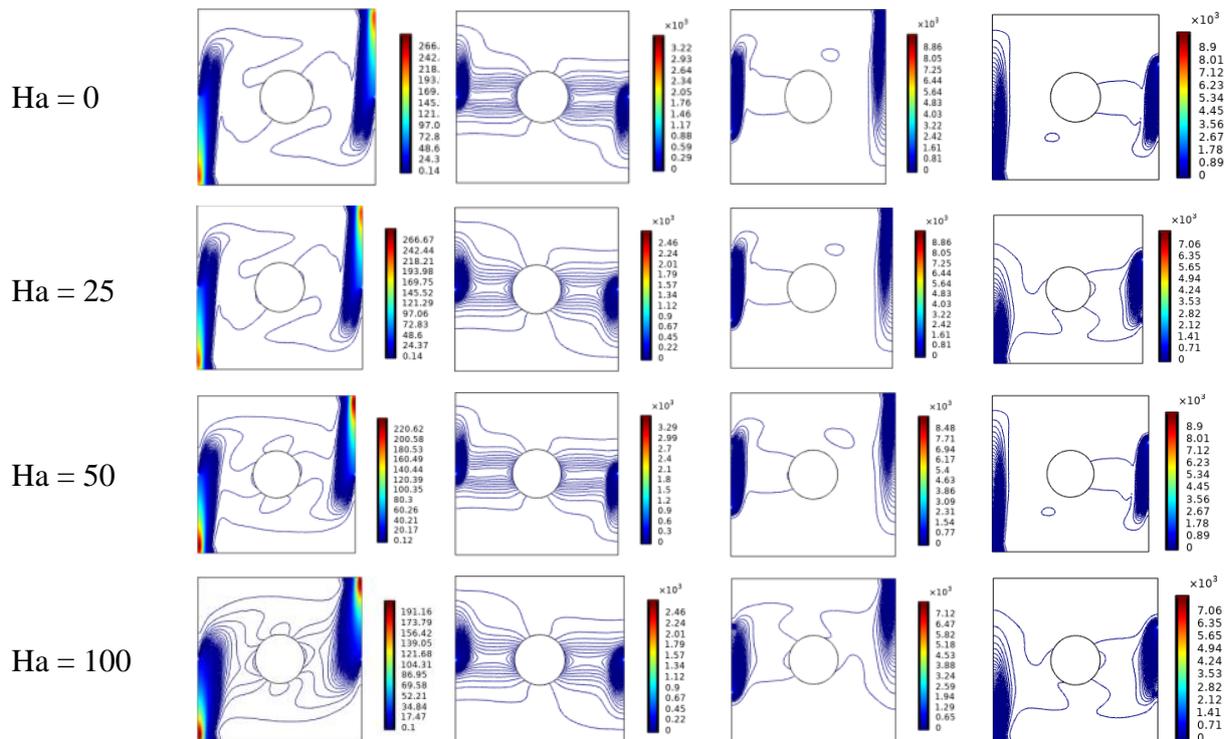


**Figure IV.15.** Illustration de la ligne de courant dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $Ha$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\varphi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ).





**Figure IV.16.** Illustration de l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $Ha$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\epsilon = 0,2$  ;  $\phi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ).

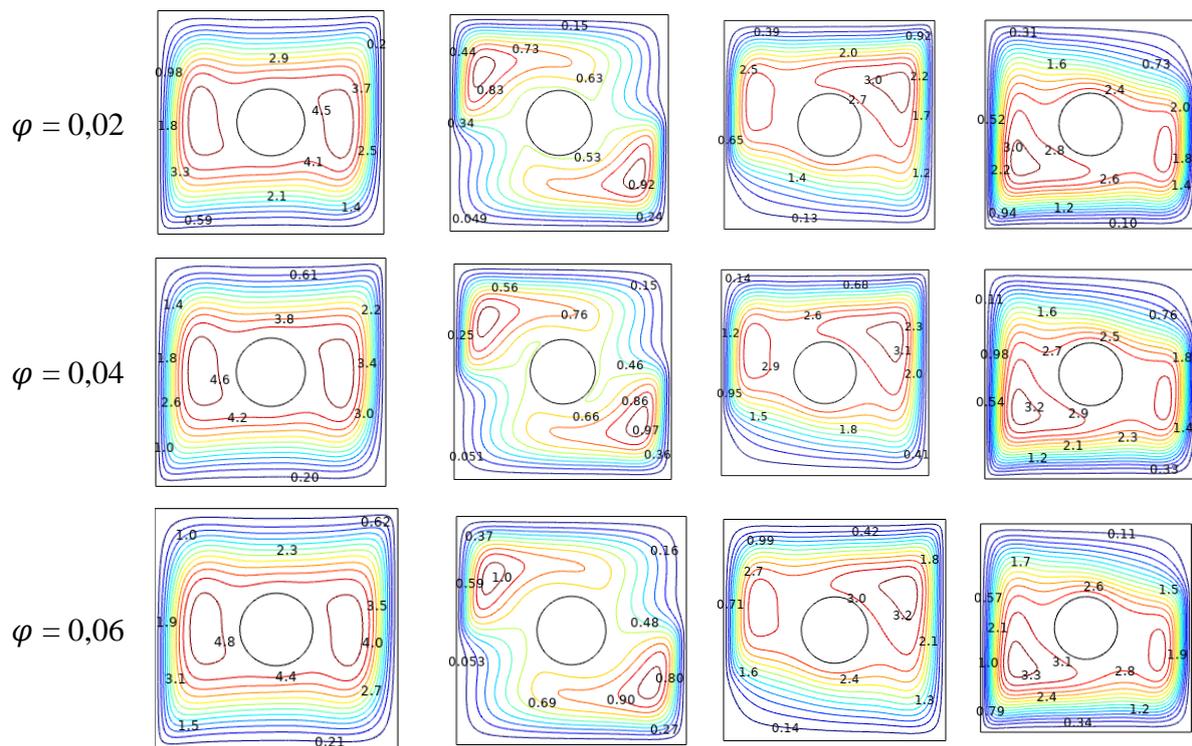


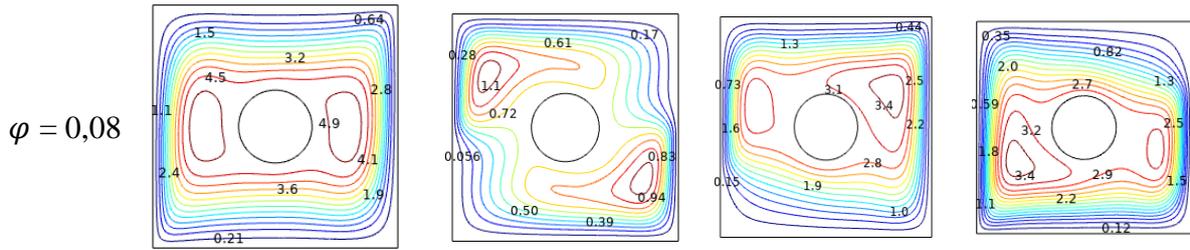
**Figure IV.17.** Illustration de l'entropie dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $Ha$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\epsilon = 0,2$  ;  $\phi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ).

### IV.3.3. Effet de la fraction volumique des solides.

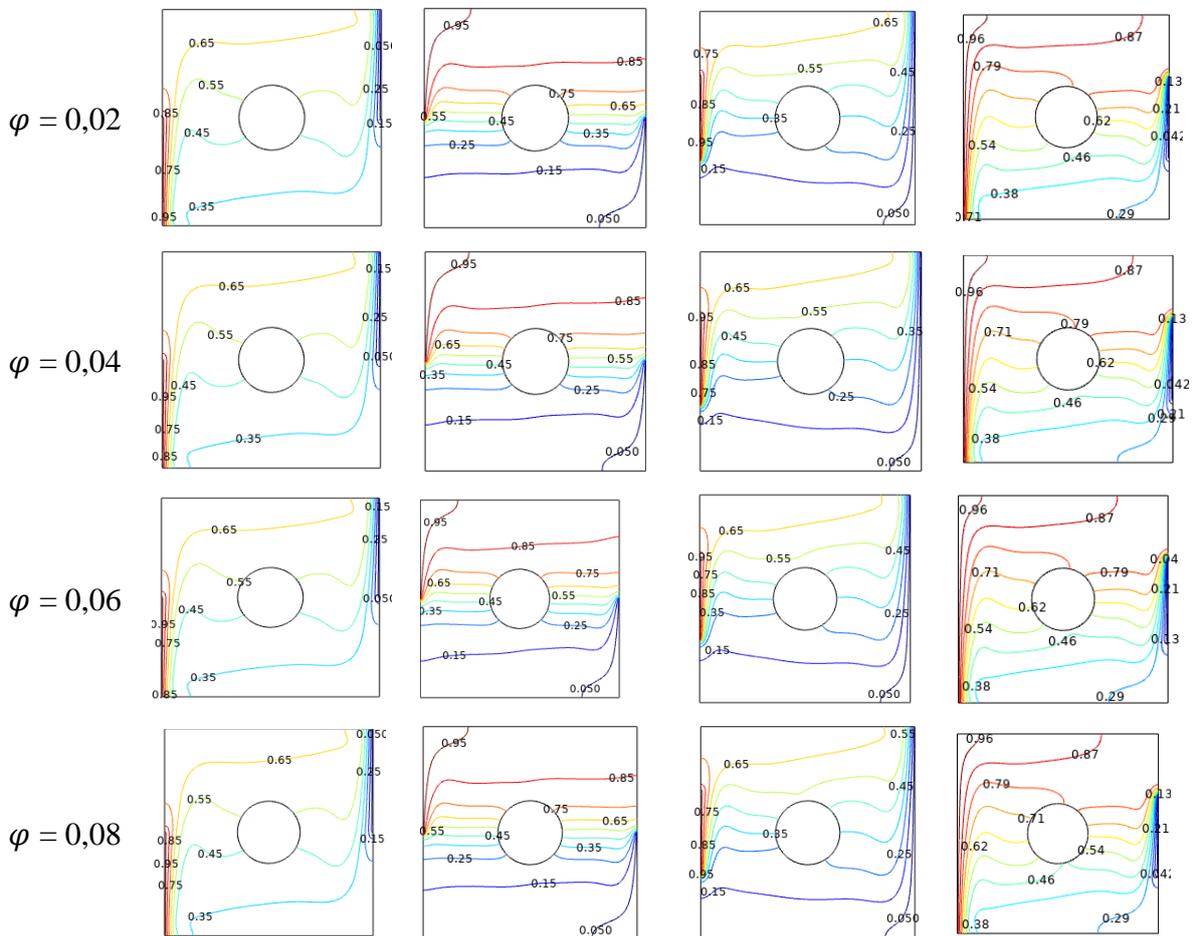
La figure IV.18. Illustration la ligne de courant dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $\varphi$  ( $\text{Ra} = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\text{Ha} = 0$  ;  $\text{Da} = 0,01$ ). L'efficacité thermique et la fluidité sont influencées par la fraction volumique ( $\varphi$ ) des nanofluides. De part et d'autre du cylindre, on observe l'impact de  $\varphi$  sur les lignes de courant. Ces dernières sont dissipées en raison de la formation lente au sein de la cavité, attribuable à l'obstruction causée par les particules ajoutées.

La Figure IV.19. Illustration l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $\varphi$  ( $\text{Ra} = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\text{Ha} = 0$  ;  $\text{Da} = 0,01$ ). Nous concluons que du côté le plus chaud, il y a une plus grande absorption de chaleur, attribuable à l'écoulement lent provoqué par l'augmentation des particules.





**Figure IV.18.** Illustration de la ligne de courant dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $\varphi$  ( $\text{Ra} = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\text{Ha} = 0$  ;  $\text{Da} = 0,01$ ).



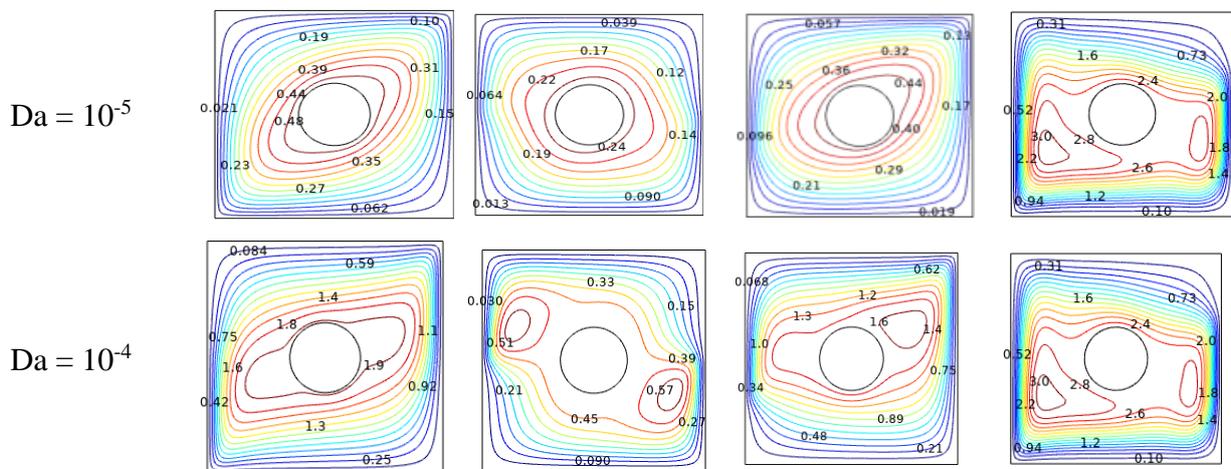
**Figure IV.19.** Illustration de l'isotherme dans quatre cavités remplies de nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $\varphi$  ( $\text{Ra} = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\text{Ha} = 0$  ;  $\text{Da} = 0,01$ ).

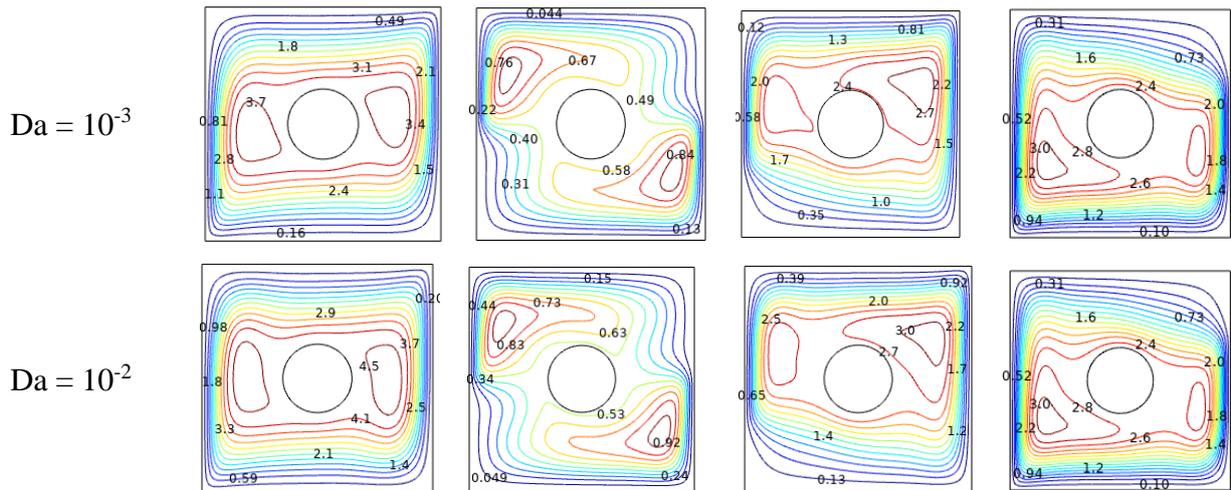
### IV.3.4. Effet du nombre de Darcy.

La figure IV.20. Illustration la ligne de courant dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $Da$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Ha = 0$  ;  $\varphi = 0,02$ ). Le nombre de Darcy a un effet évident sur la structure poreuse de la cavité, favorisant un écoulement plus efficace en augmentant la perméabilité du milieu. Du côté froid, on observe un périmètre plus prononcé, ce qui est attribuable à la perméabilité plus lente du liquide de refroidissement.

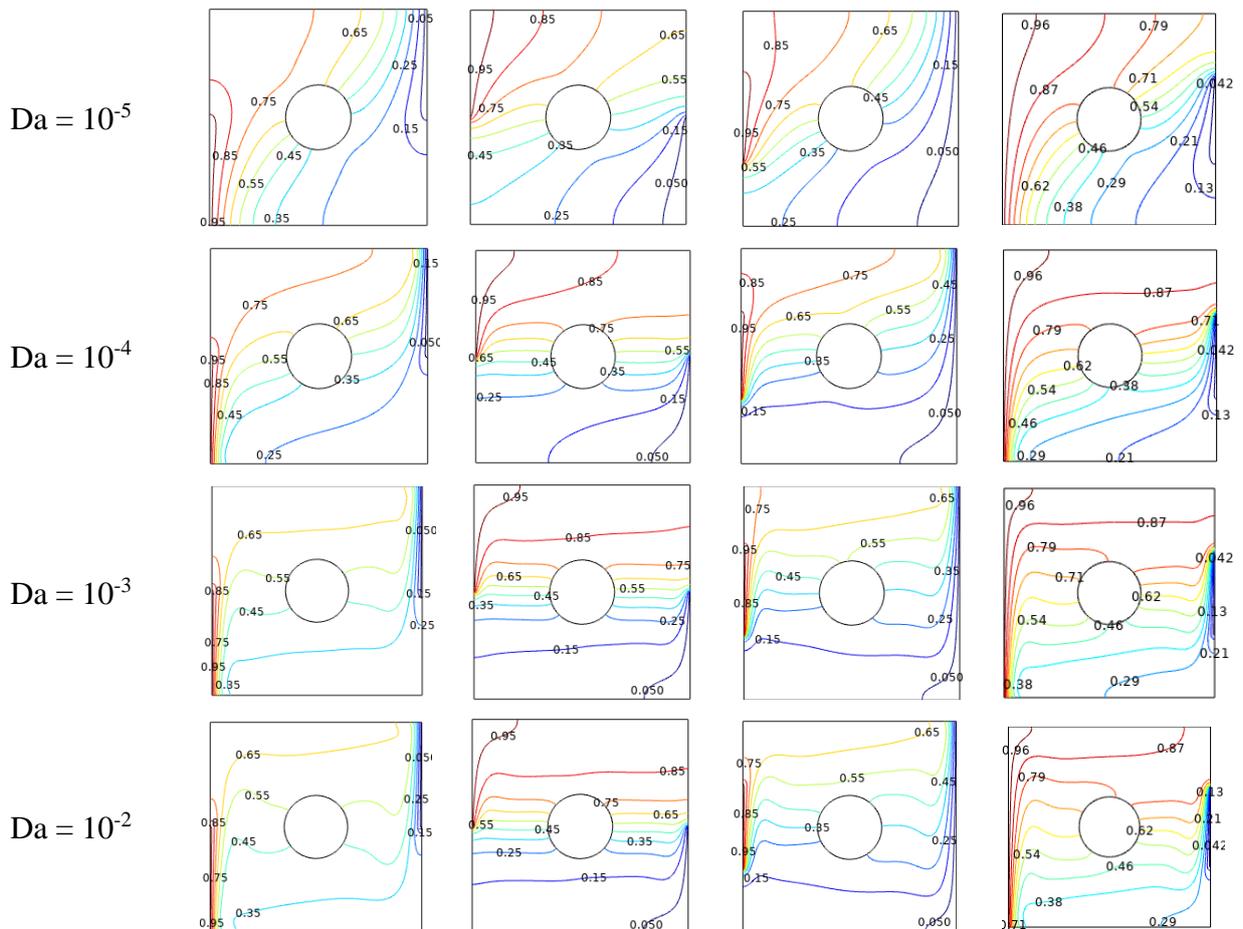
La figure IV.21. Illustration l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $Da$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Ha = 0$  ;  $\varphi = 0,02$ ). L'augmentation de l'entrée du fluide dans le milieu poreux est réalisée par une augmentation du nombre de Darcy. On observe un lissage significatif de l'isotherme pour des valeurs élevées de Darcy, où la température est répartie de manière plus uniforme dans l'intermédiaire poreux et le milieu de l'alésage.

La figure IV.22. Illustration l'entropie dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents  $Da$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Ha = 0$  ;  $\varphi = 0,02$ ). Nous avons observé que pour les valeurs minimales de Darcy, il y a une accumulation due à la résistance du fluide à pénétrer dans le milieu poreux. Le graphique de  $S_{gen}$ , en réaction aux contraintes de perméabilité, montre la perte d'entropie dans le liquide. À des valeurs plus élevées de  $Da$ , les pertes d'entropie se produisent lorsque le flux entre dans la seconde extrémité, entraînant des changements thermiques.

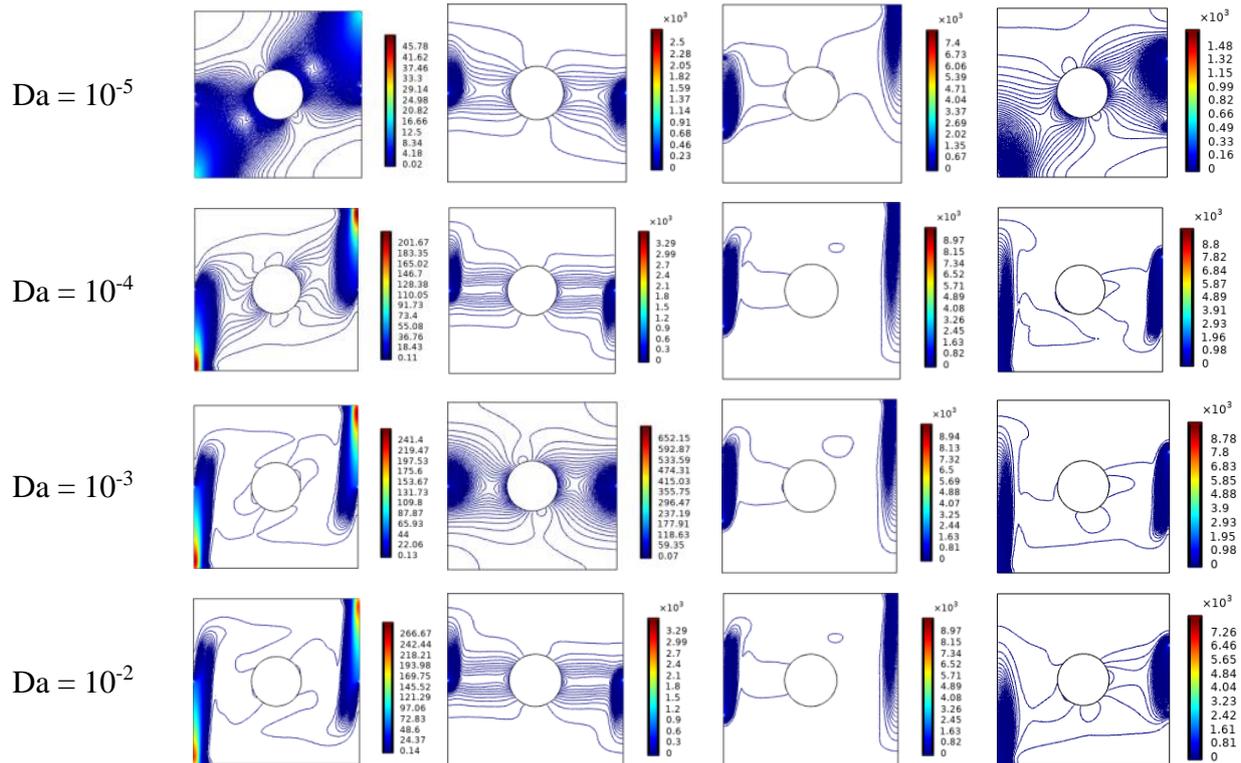




**Figure IV.20.** Illustration de la ligne de courant dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $Al_2O_3$ -Ag/eau) pour différents  $Da$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Ha = 0$  ;  $\varphi = 0,02$ )



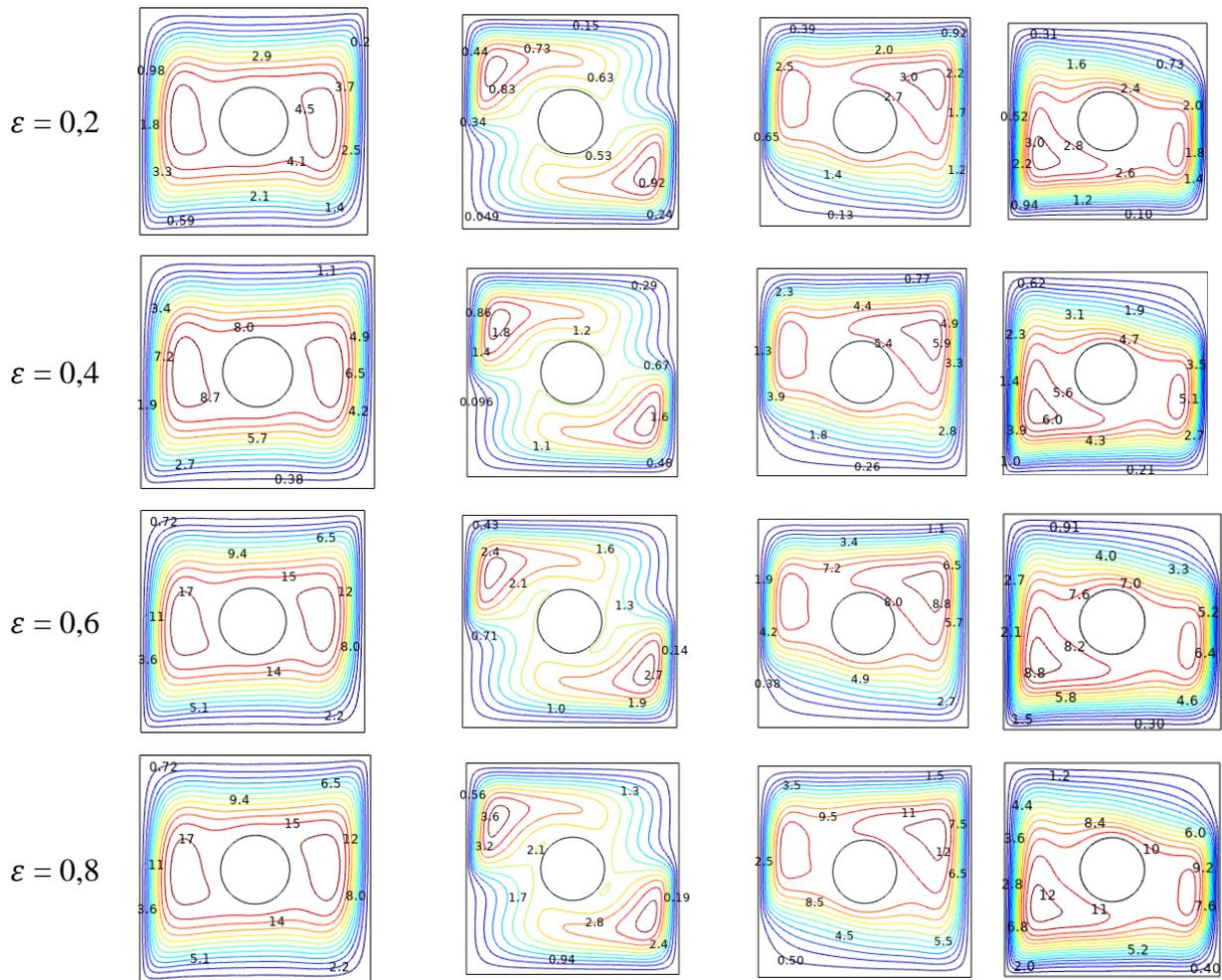
**Figure IV.21.** Illustration l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $Al_2O_3$ -Ag/eau) pour différents  $Da$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Ha = 0$  ;  $\varphi = 0,02$ ).



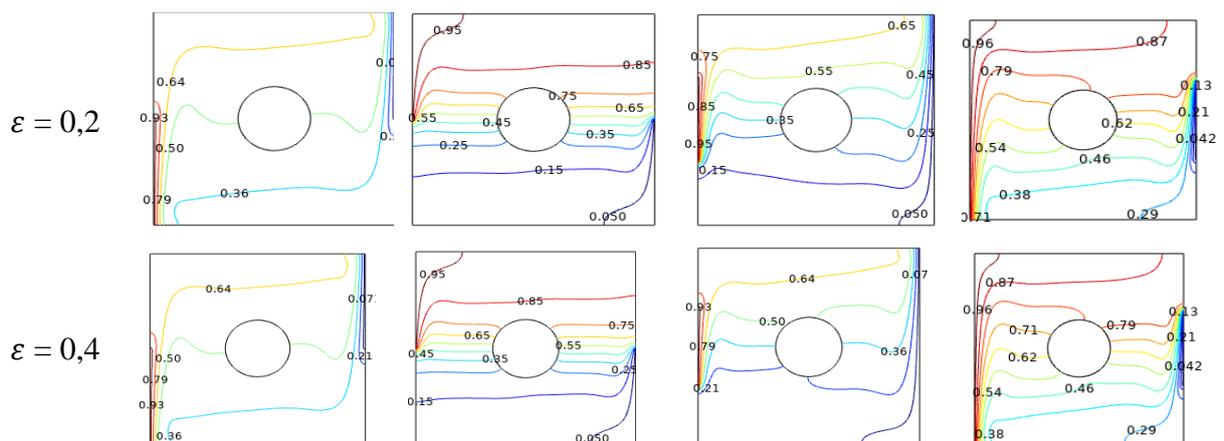
**Figure IV.22.** Illustration l'entropie dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différents Da à ( $\text{Ra} = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $\text{Ha} = 0$  ;  $\varphi = 0,02$ ).

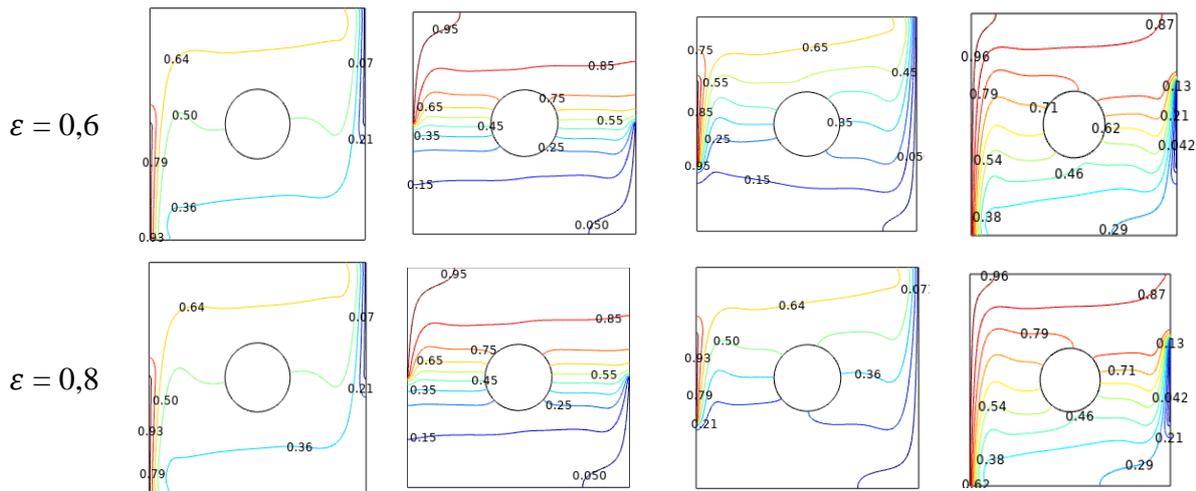
### IV.3.5. Effet de la porosité.

La figure IV.23. Illustration la ligne de courant dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différentes porosités  $\varepsilon$  à ( $\text{Ra} = 10^6$  ;  $\text{Da} = 0,01$  ;  $\text{Ha} = 0$  ;  $\varphi = 0,02$ ). La Figure IV.24. Illustration l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différentes porosités à ( $\text{Ra} = 10^6$  ;  $\text{Ha} = 0$  ;  $\text{Da} = 0,01$  ;  $\varphi = 0,02$ ). Nous observons que la porosité est un paramètre crucial dans l'écoulement des nanofluides par rapport aux liquides classiques, probablement en raison de l'efficacité des nanoparticules suspendues. Peu importe l'emplacement de la source de chaleur, les lignes de porosité  $\varepsilon$  montrent une collecte moins significative au niveau des milieux poreux. Une porosité élevée favorise un meilleur écoulement dans la cavité, bien que la ligne de courant change légèrement. Quant à l'isotherme de la Figure IV.24, nous observons que la porosité a un effet relativement faible, sans modifications claires et significatives des contours.



**Figure IV.23.** Illustration de la  $\psi$  dans quatre cavités chargées par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ag/eau) pour différentes porosités  $\varepsilon$  à ( $\text{Ra} = 10^6$  ;  $\text{Ha} = 0$  ;  $\text{Da} = 0,01$  ;  $\varphi = 0,02$ ).

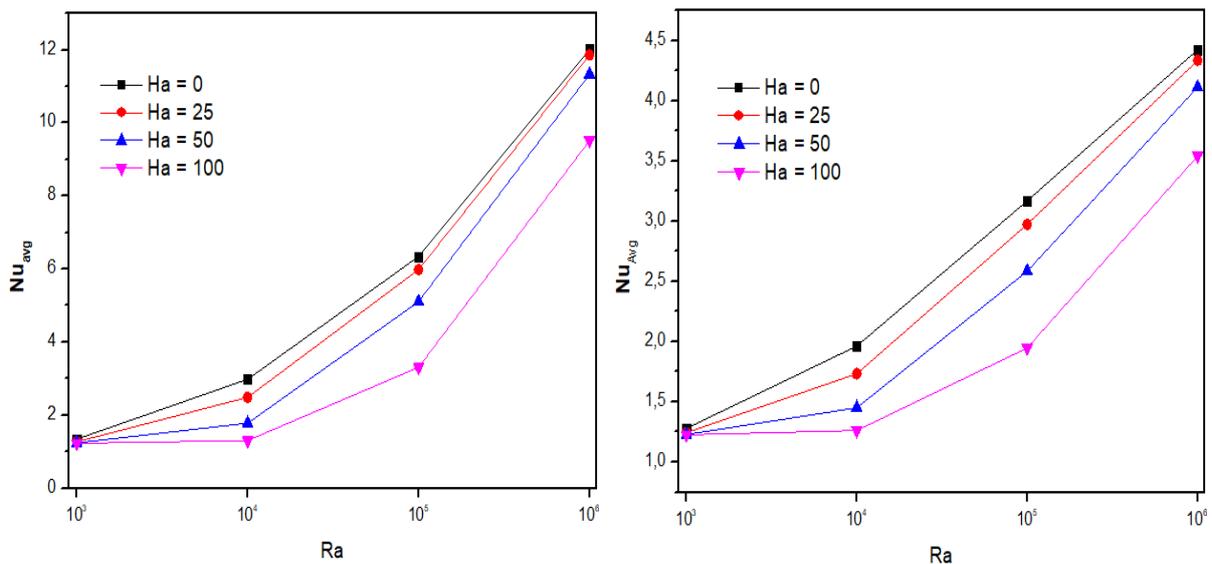


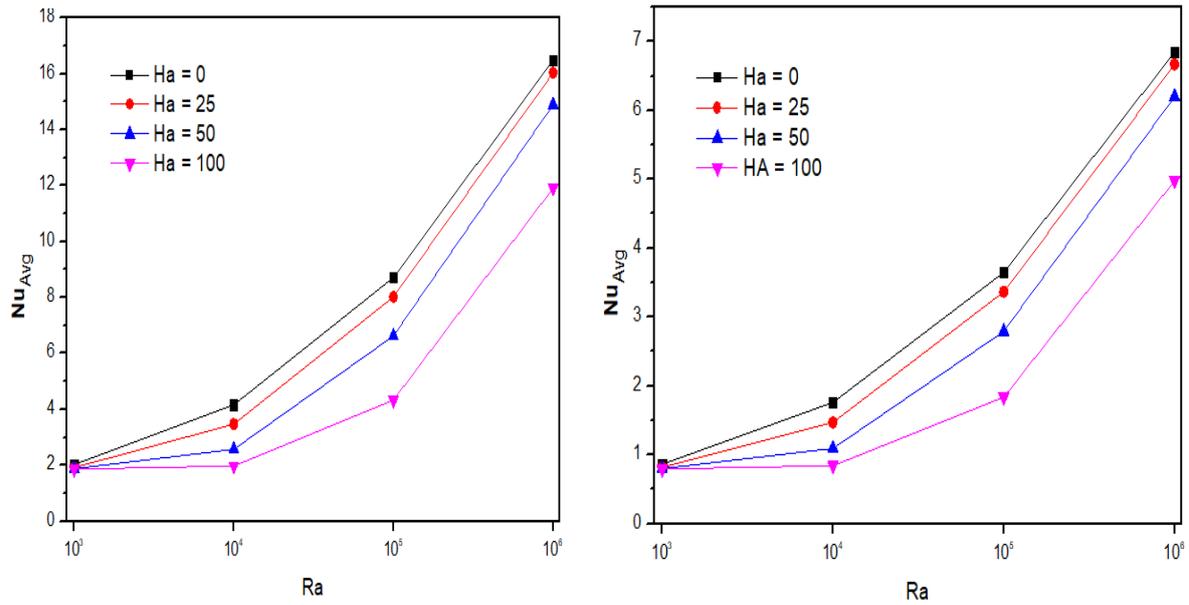


**Figure IV.24.** Illustration de l'isotherme dans quatre cavités remplies par le nanofluide ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag/eau}$ ) pour différentes porosités  $\varepsilon$  à ( $Ra = 10^6$  ;  $Ha = 0$  ;  $Da = 0,01$  ;  $\phi = 0,02$ ).

### IV.3.6. Effet de divers paramètres sur le nombre de Nusselt.

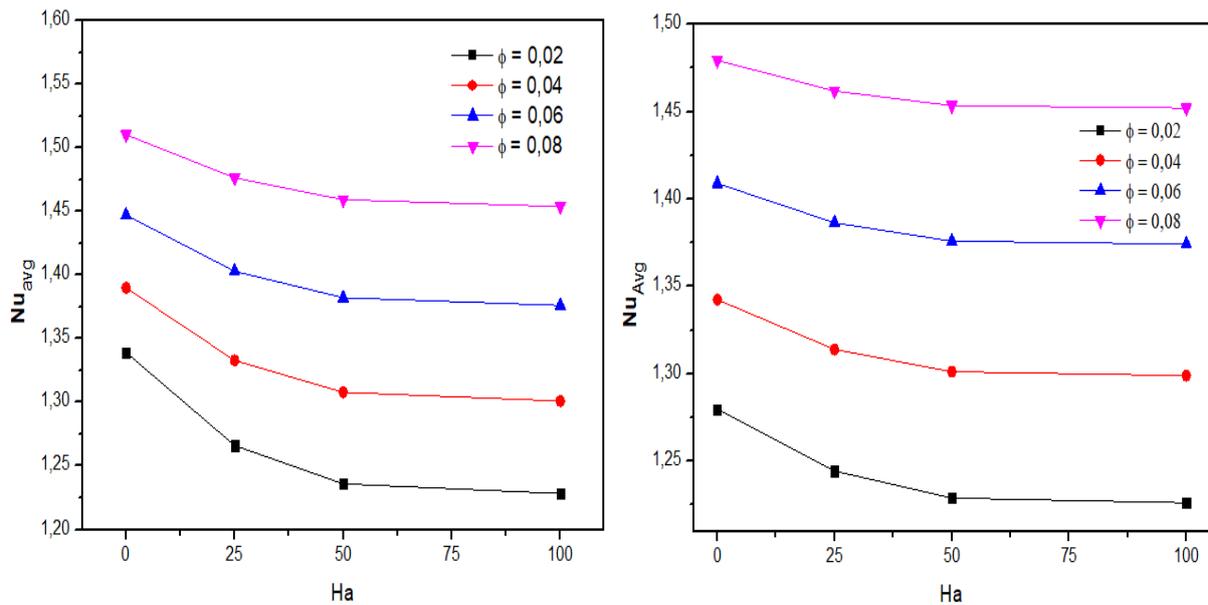
La figure IV.25. Montre le changement de  $Nu_{avg}$  avec  $Ra$  dans quatre cavités pour divers  $Ha$  à ( $\varepsilon = 0,2$  ;  $\phi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ) montre que  $Nu_{avg}$  augmente quand l'augmentation de  $Ra$ . Nous observons une relation similaire dans les quatre cas de la cavité carrée. Cette similitude est due à une augmentation de la force de flottaison causée par l'augmentation de  $Ra$ , ce qui conduit à une augmentation de la vitesse du nanofluide à l'intérieur de la cavité. Cependant, avec la force de Lorentz et l'augmentation de  $Ha$ , le nombre de Nusselt moyen diminue. La force de Lorentz s'oppose à la formation de tourbillons, entraînant une diminution de la vitesse du nanofluide dans la cavité, et par conséquent, le nombre de Nusselt diminue.

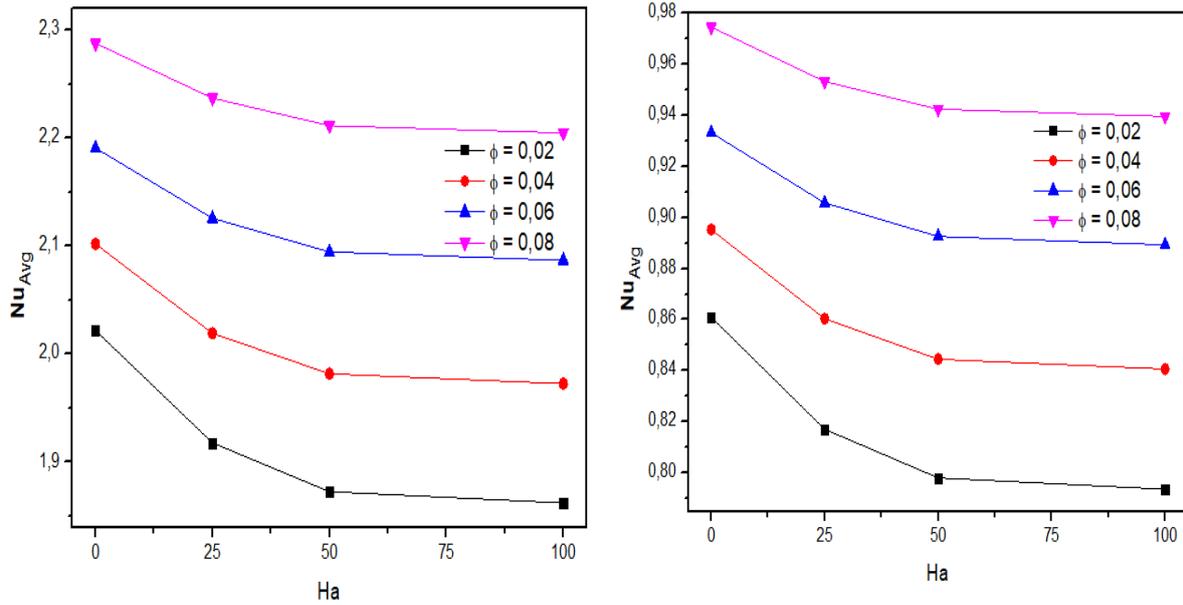




**Figure IV.25.** Changement de  $Nu_{avg}$  avec  $Ra$  dans quatre cavités pour divers  $Ha$  à ( $\varepsilon = 0,2$  ;  $\varphi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ).

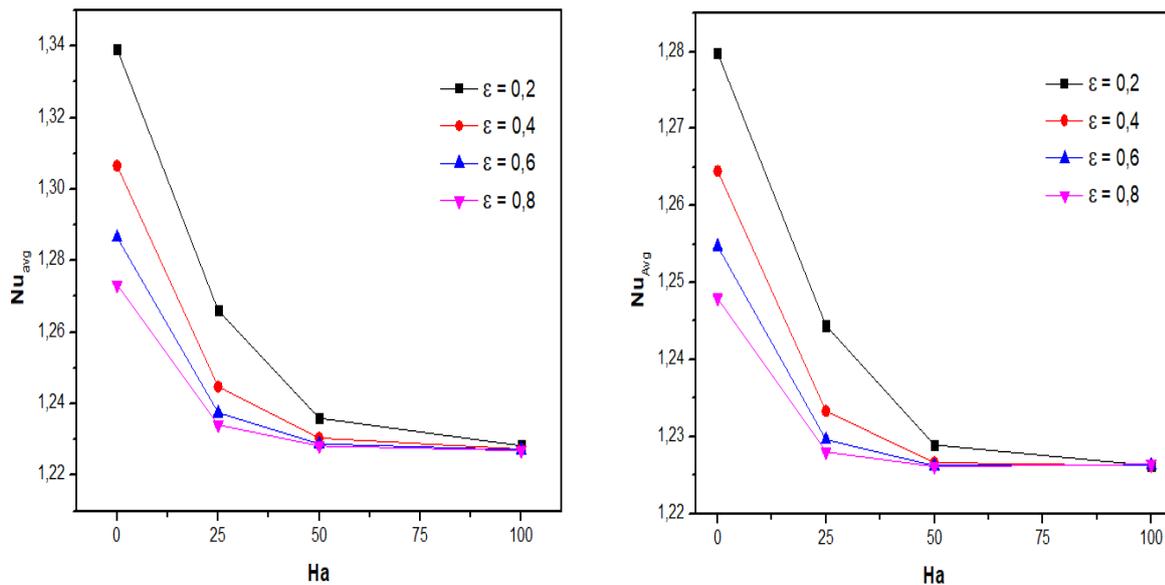
La figure IV.26. Montre l'évolution de  $Nu_{avg}$  avec  $Ha$  dans quatre cavités pour diverses  $\varphi$  à ( $\varepsilon = 0,2$  ;  $Ra = 10^{-6}$  ;  $Da = 10^{-2}$ ). Dans toutes les valeurs de  $\varphi$  avec un  $Ha$  plus élevé, l'intensité du transfert de chaleur diminue. Cependant, on observe un taux plus élevé de correspondance de  $Nu_{avg}$  à la hauteur de la fraction volumique de la nanoparticule.

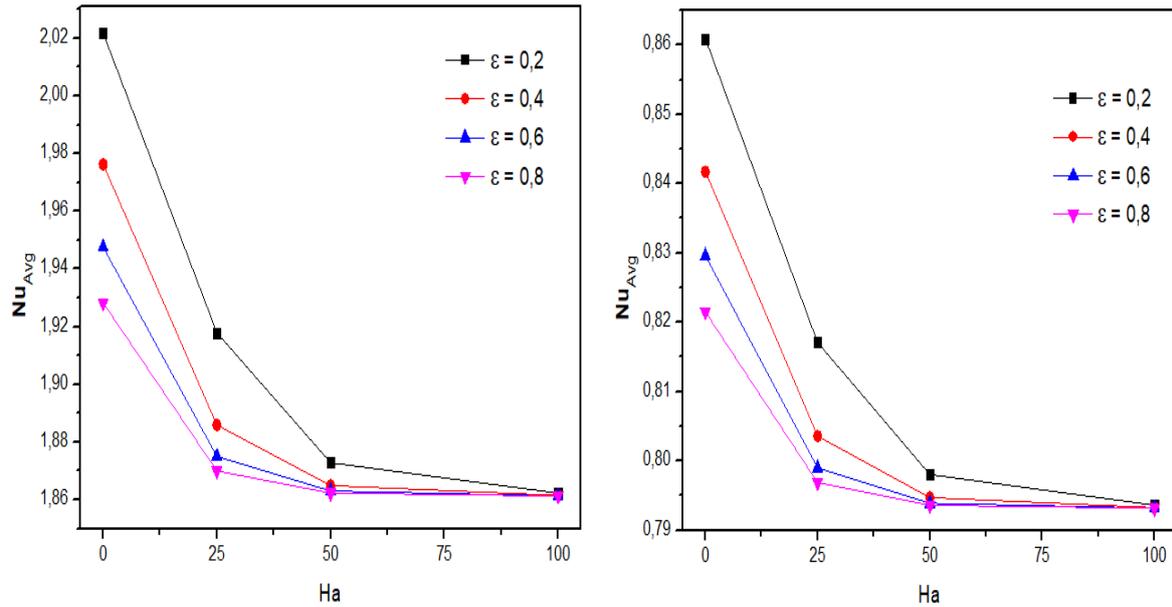




**Figure IV.26.** Changement de  $Nu_{avg}$  avec  $Ha$  dans quatre cavités pour divers  $\phi$  à ( $\varepsilon = 0,2$  ;  $Ra = 10^6$  ;  $Da = 0,01$ ).

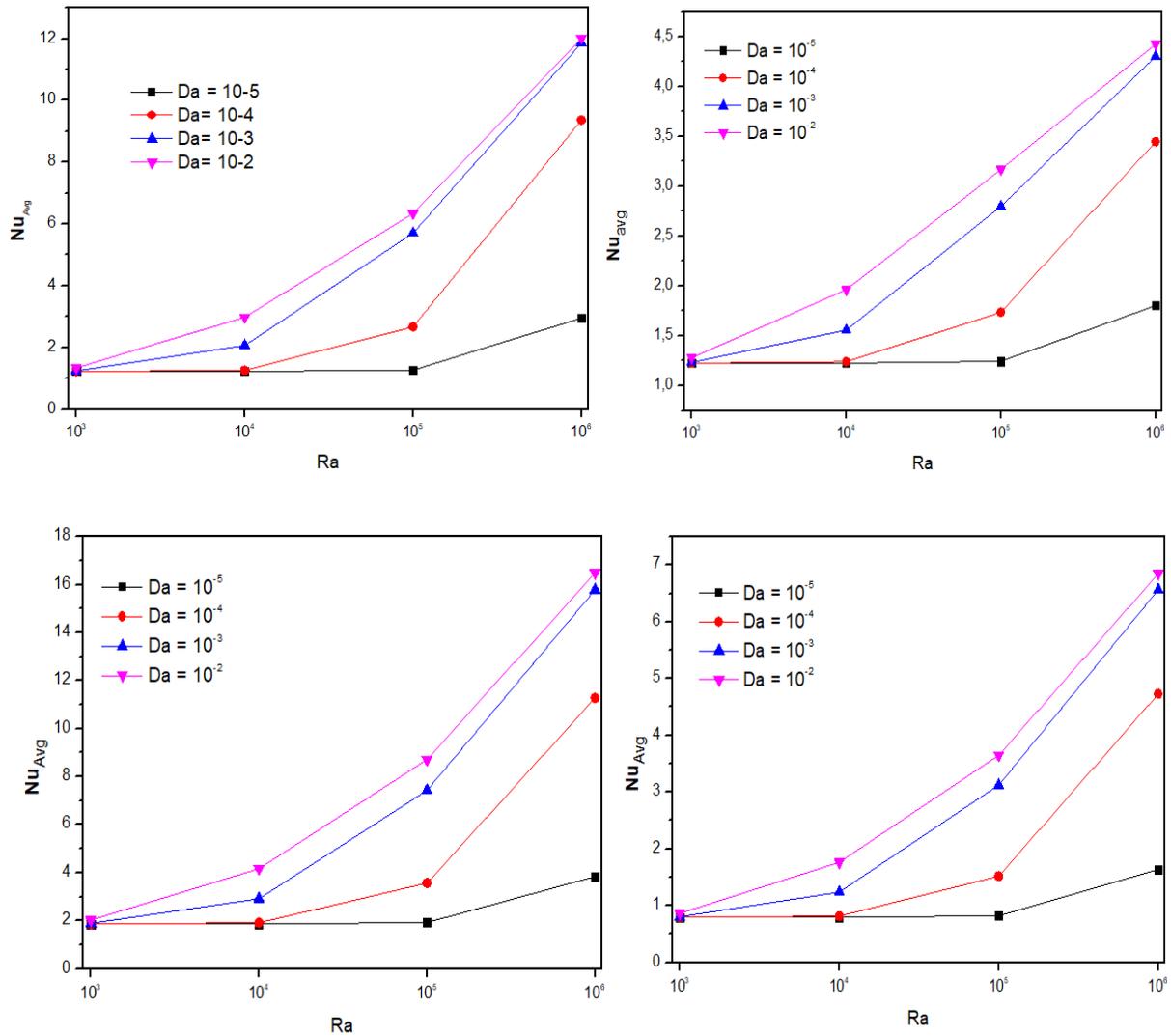
La figure IV.27. Montre l'évolution de  $Nu_{avg}$  avec  $Ha$  dans la cavité pour des  $\varepsilon$  variés à ( $Ra = 10^{-6}$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Da = 0,01$ ). Les valeurs du nombre de Nusselt moyen et du nombre de Hartmann ( $Ha$ ) diminuent car le flux convectif est fortement réduit. Ceci est dû à la régulation du paramètre magnétique à l'intérieur de la cavité. Une porosité élevée améliore le transfert de chaleur.





**Figure IV.27.** Variation de  $Nu_{avg}$  avec  $Ha$  dans quatre cavités pour  $\epsilon$  varié à ( $Ra = 10^6$  ;  $\varphi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$ ).

La figure IV.28. Montre l'évolution de  $Nu_{avg}$  avec  $Ra$  dans la cavité pour des  $Da$  variés à ( $\varphi = 0,02$  ;  $Ra = 10^6$  ;  $\epsilon = 0,2$ ). Dans les quatre cas, nous observons une corrélation positive entre le nombre de Nusselt moyen et le nombre de Rayleigh pour toutes les valeurs de Darcy. De plus, un nombre de Darcy plus élevé améliore le transfert de chaleur et le  $Nu_{avg}$  pour des valeurs plus élevées de  $Ra$ . Le mouvement du nanofluide est entravé en raison des pores étroits, limitant le transfert de chaleur, et nous n'observons pas d'effet significatif de  $Ra$  à de faibles valeurs. À une plus petite échelle, l'amélioration devient plus visible. Cependant, un meilleur transfert de chaleur est obtenu grâce à la libre circulation des fluides, favorisée par une bonne convection de la chaleur.

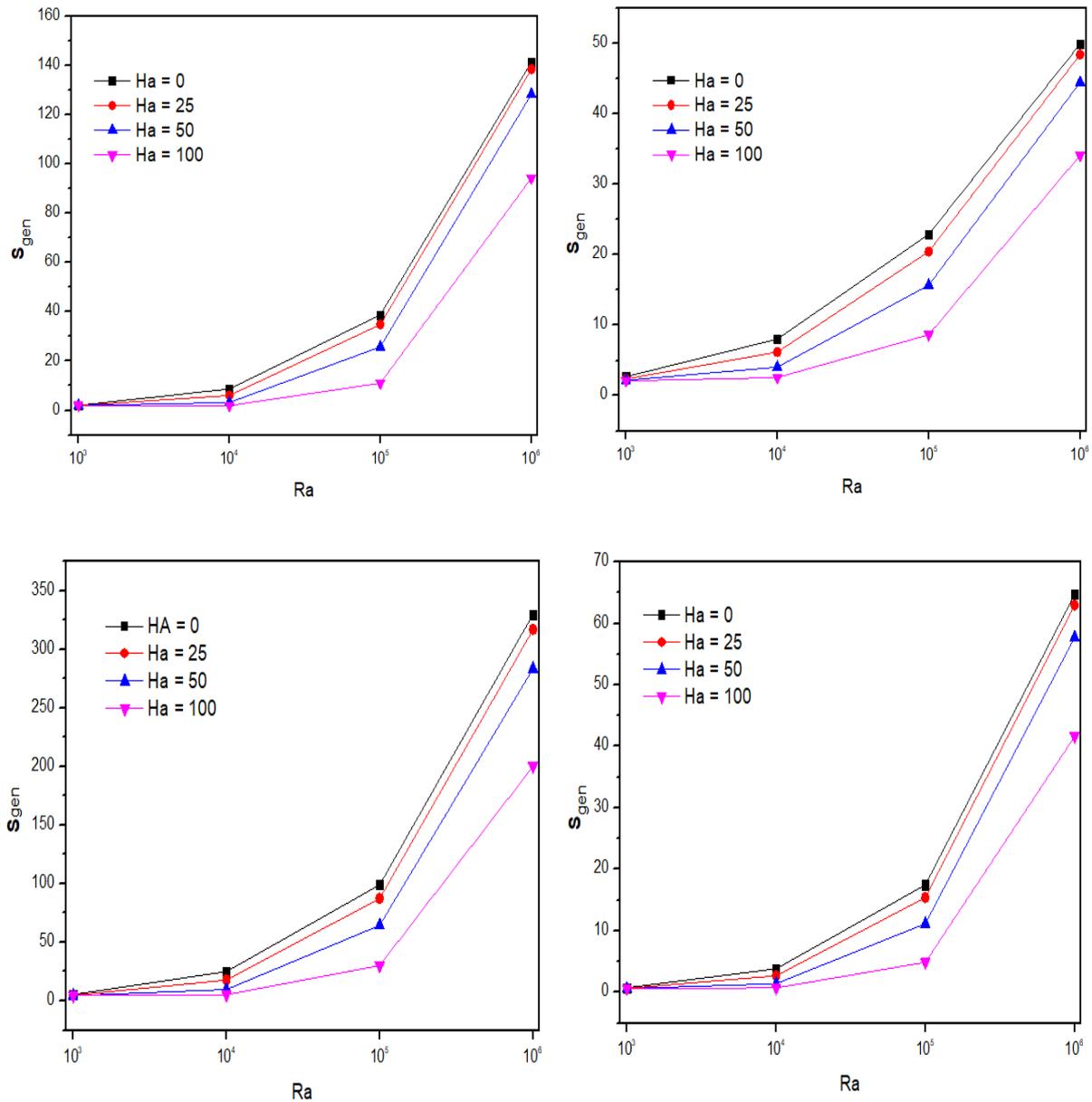


**Figure IV.28.** Modification de  $Nu_{avg}$  avec  $Ra$  dans la cavité pour  $Da$  varié à ( $\varphi = 0,02$  ;  $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$ ).

### IV.3.7. Effet de divers paramètres sur la génération d'entropie.

La figure IV.29. Montre l'évolution de  $S_{gen}$  avec le nombre de Rayleigh dans la cavité pour des  $Ha$  variés à ( $\varphi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$  ;  $\varepsilon = 0,2$ ). La génération d'entropie s'améliore avec l'augmentation de  $Ra$  dans tous les cas, que ce soit pour la position de la paroi chauffée ou pour le nombre de Hartmann. On observe qu'avec l'augmentation de  $Ha$ , il y a une diminution du transfert de chaleur et des tourbillons pour des nombres élevés de  $Ra$ . La force de Lorentz diminue également. Cela indique que l'entropie thermique et la friction des fluides sont supérieures à l'entropie due au champ magnétique dans cette plage de  $Ra$ . De plus, pour la plage

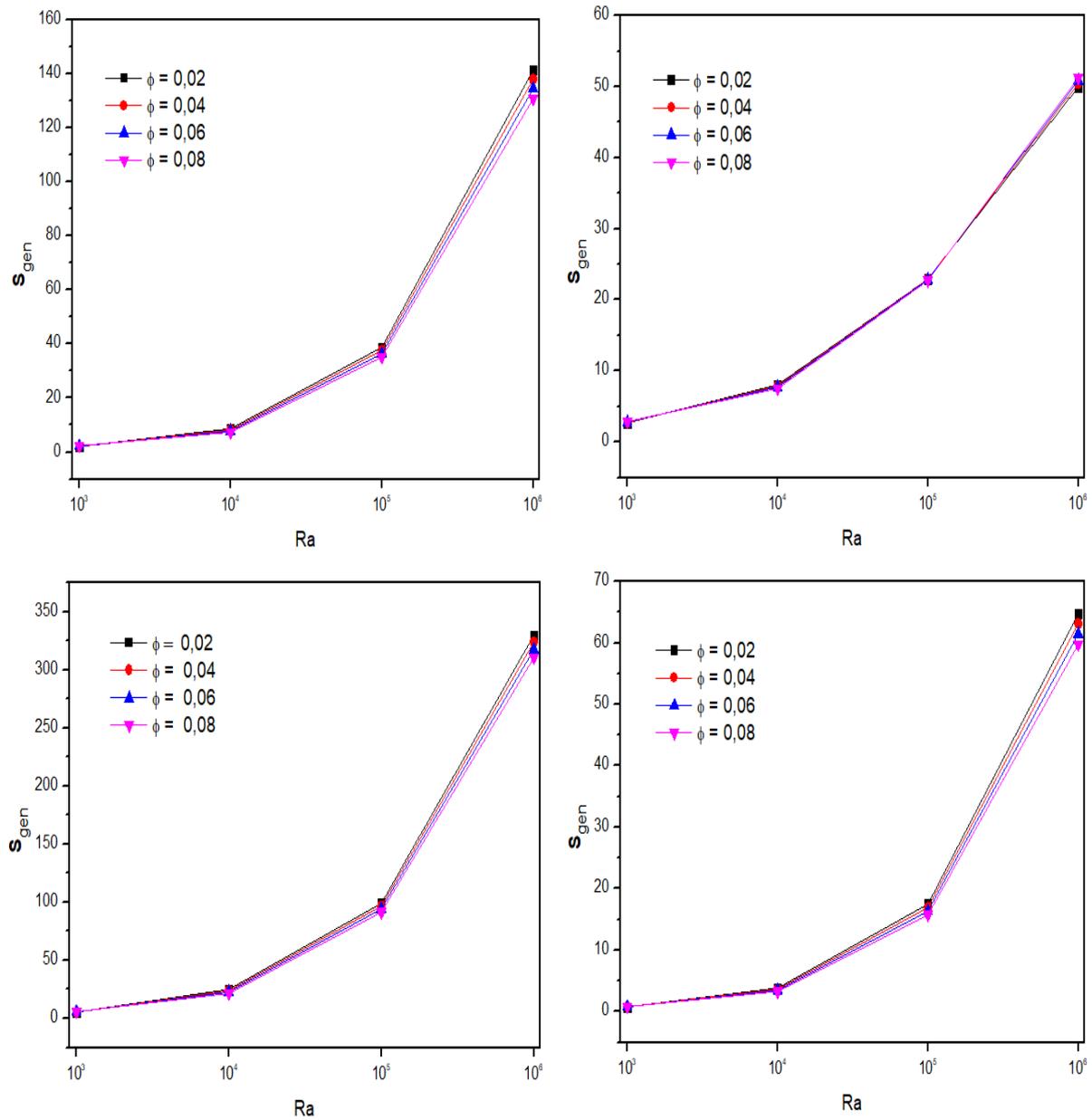
de Ra faible, on observe une moindre friction des fluides et une génération d'entropie thermique réduite, ce qui diminue la génération totale d'entropie. Ha n'a aucun effet significatif dans ce contexte.



**Figure IV.29.** Changement de la génération d'entropie avec le nombre de Rayleigh Ra dans la cavité pour Ha varié à ( $\phi = 0,02$  ;  $Da = 0,01$  ;  $\varepsilon = 0,2$ ).

La figure IV.30. Montre l'évolution de la génération d'entropie avec le nombre de Rayleigh Ra dans la cavité pour divers  $\phi$  à ( $Ha = 0$  ;  $Da = 0,01$  ;  $\varepsilon = 0,2$ ). Dans les quatre cas étudiés, il apparaît que la variation de la fraction volumique des nanoparticules  $\phi$  n'a pas d'impact

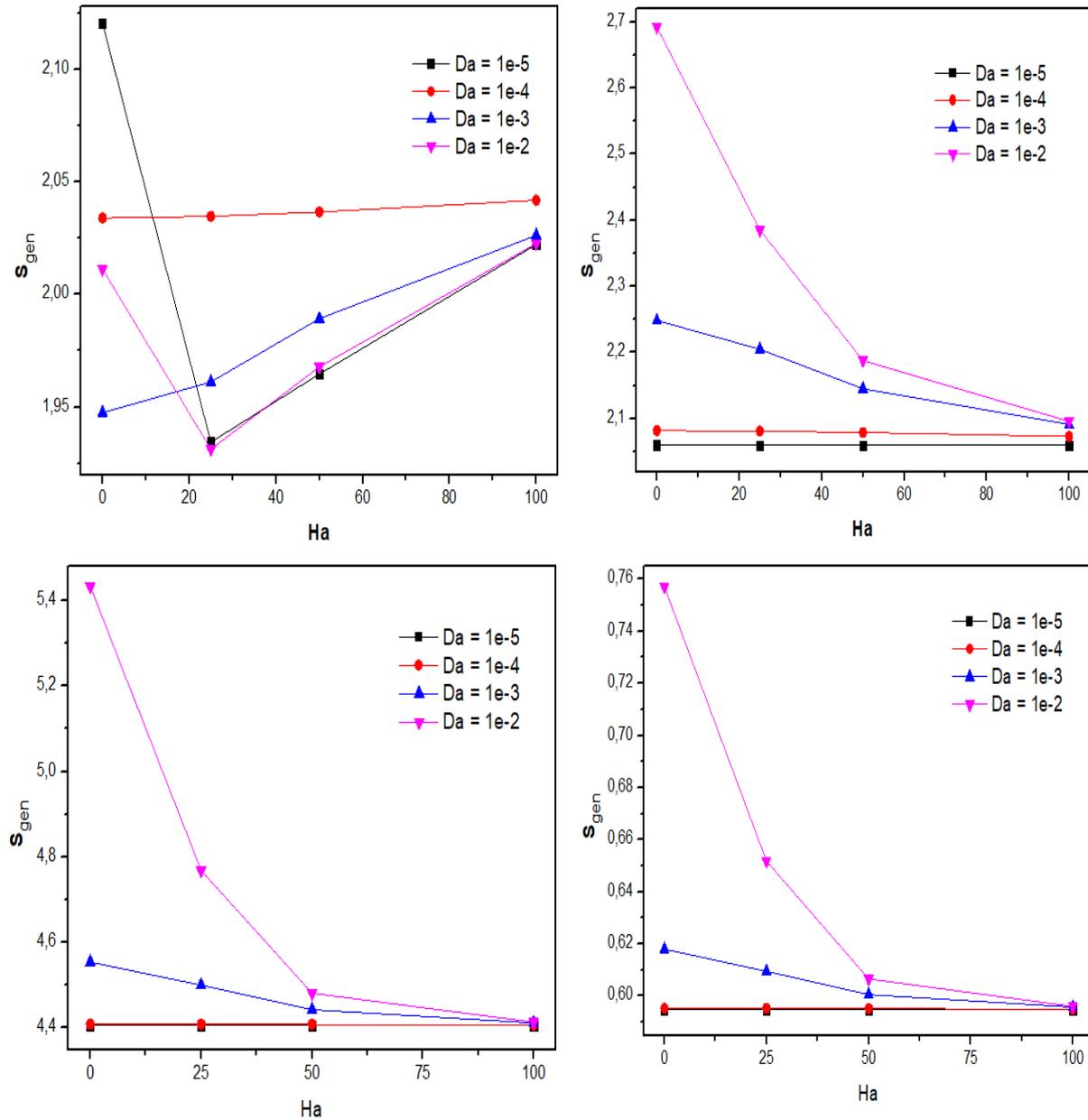
significatif sur le  $S_{gen}$  avec une validité claire. Ceci confirme à nouveau que le  $S_{gen}$  est principalement lié au transfert de chaleur.



**Figure IV.30.** Evolution de  $S_{gen}$  avec le nombre de Rayleigh  $Ra$  dans la cavité pour  $\phi$  varié à ( $Ha = 0$  ;  $Da = 0,01$  ;  $\varepsilon = 0,2$ ).

La figure IV.31. Montre l'évolution de la génération d'entropie avec le nombre de Hartmann  $Ha$  dans la cavité pour des  $Da$  variés à ( $\phi = 0,02$  ;  $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$ ). Nous notons que l'augmentation de la valeur de  $Ha$  a réduit le processus de transfert de chaleur. Par conséquent, la génération d'entropie reste constante. Cependant, la génération d'entropie est affectée et

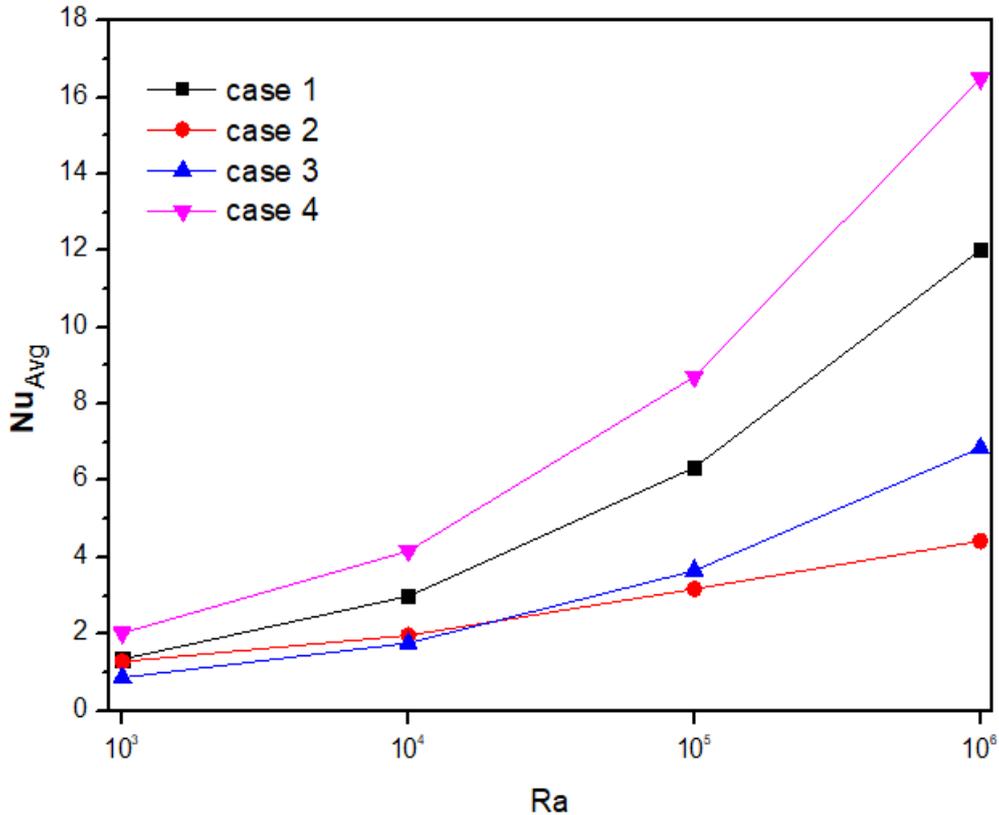
diminuée avec l'augmentation des valeurs de  $Da$  et  $Ha$ . La conclusion principale est que l'augmentation de  $Da$  et  $Ha$  réduit le mouvement du fluide à l'intérieur de la cavité, entraînant une diminution de la production de grandes quantités d'entropie.



**Figure IV.31.** Modification de la génération d'entropie avec le nombre Hartmann  $Ha$  dans la cavité pour des  $Da$  variés à ( $\varphi = 0,02$  ;  $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$ ).

La Figure IV.32. Montre le changement de  $S_{gen}$  avec  $Ra$  dans une cavité carrée à ( $\varphi = 0,02$  ;  $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Da = 0,01$ ). La variation du nombre de Nusselt moyen ( $Nu_{moyen}$ ) avec  $Ra$  est présentée dans chacun des quatre cas (changement de la position de la paroi froide et chaude). Le nombre de Nusselt moyen augmente avec le transfert de chaleur pour des valeurs

de Ra plus élevées. Il est plus élevé dans le premier et quatrième cas, surpassant le deuxième et troisième cas. Aucune amélioration n'est observée pour les faibles valeurs de Ra. Ceci est attribuable au contrôle du transfert de chaleur par conduction à ces faibles valeurs de Ra.



**Figure IV.32.** Modification de  $S_{gen}$  avec le nombre de Rayleigh Ra dans la cavité à ( $\varphi = 0,02$  ;  $Ra = 10^6$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Da = 0,01$ ).

La figure IV.33. Montre l'évolution de  $S_{gen}$  avec Ra dans la cavité à ( $\varphi = 0,02$  ;  $Ha = 0$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Da = 10^{-2}$ ). La figure IV.34. Montre le changement de génération d'entropie avec la fraction volumique de nanoparticules  $\varphi$  dans la cavité à ( $Ra = 10^6$  ;  $Ha = 0$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Da = 10^{-2}$ ). La représentation illustre le changement d'entropie avec Ha et Da dans quatre cas. L'observation révèle une distorsion claire dans la production d'entropie. La quantité de  $S_{gen}$  dans le quatrième cas est beaucoup plus élevée, atteignant jusqu'à deux fois la quantité de production d'entropie dans les trois autres cas. Nous pouvons conclure que la position optimale de la paroi chaude est au milieu, avec un Ha élevé, réduit le mouvement du liquide à l'intérieur de la cavité, entraînant ainsi la production de grandes quantités d'entropie.

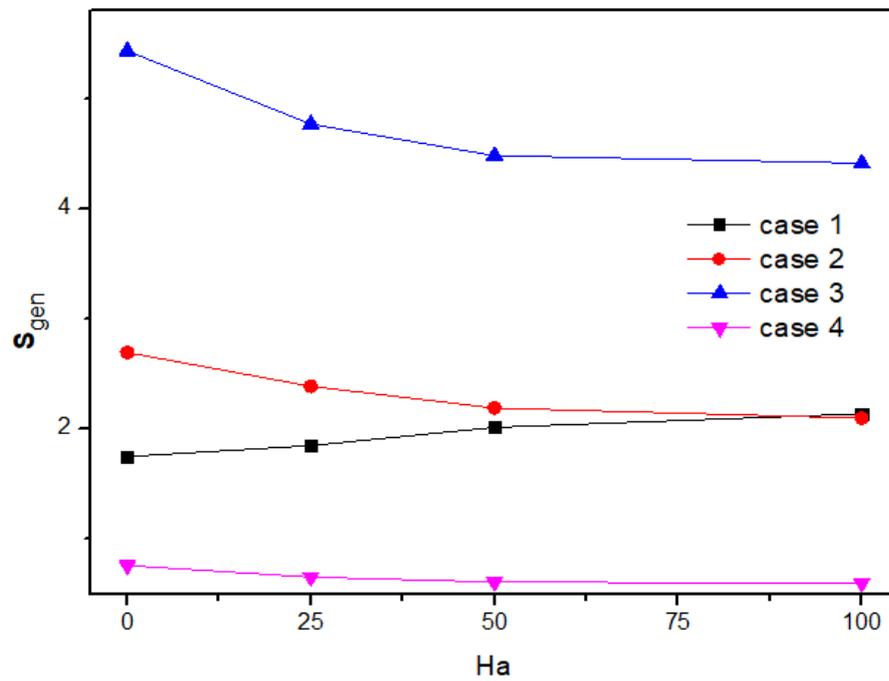


Figure IV.33. Modification de la génération d'entropie avec le nombre de Rayleigh Ra dans les cavités à ( $\phi = 0,02$  ;  $Ha = 0$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Da = 10^{-2}$ ).

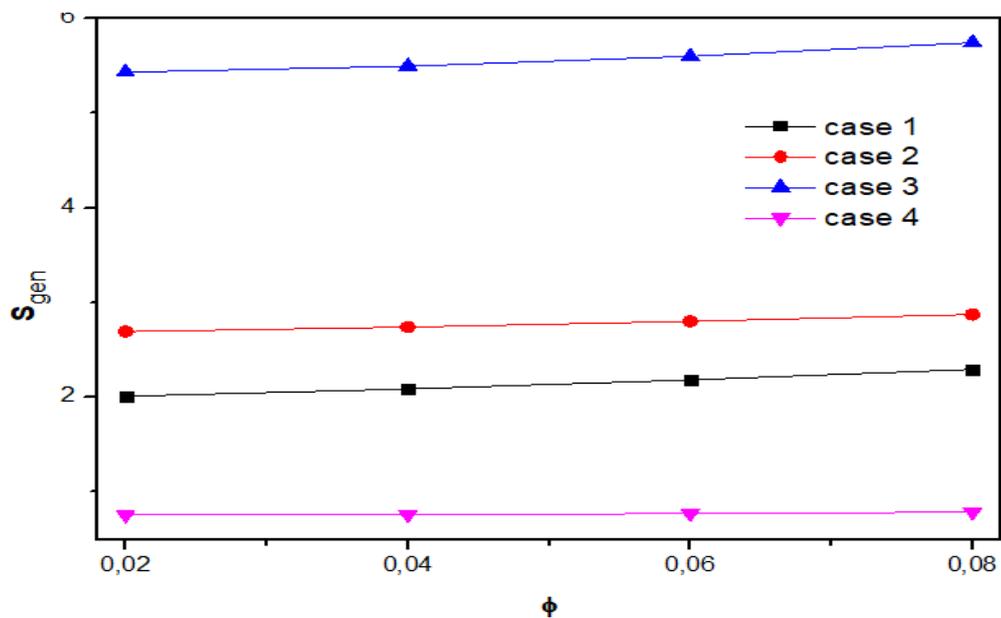


Figure IV.34. Modification de la génération d'entropie avec la fraction volumique de nanoparticules  $\phi$  dans la cavité à ( $Ra = 10^6$  ;  $Ha = 0$  ;  $\varepsilon = 0,2$  ;  $Da = 10^{-2}$ ).

#### **IV.4. Comparaison entre deux résultat étude expérimentale et numérique :**

Dans cette section, nous abordons l'aspect théorique soulevé à travers une étude expérimentale menée par Kalteh et al. [86]. Nous introduisons cette étude expérimentale dans notre modèle (la cavité en forme de triangle) en y ajoutant des domaines magnétiques.

Suite à une simulation numérique, nous comparons les résultats obtenus avec les données de l'étude [86]. La différence entre les deux études réside dans l'ajout du champ magnétique, le changement de Reynolds, la fraction volumique des nanoparticules, et le choix approprié d'une forme de cavité.

##### **IV.4.1. Description de l'étude expérimentale [86] :**

###### **IV.4.1.1. Préparation des nanofluides :**

Dans cet article, des nanoparticules sphériques de  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> d'un diamètre moyen de 40 nm sont utilisées. Ces nanoparticules sont acquises auprès de Plasmachem GmbH. L'eau désionisée est choisie comme liquide de base.

Pour préparer le nanofluide, la masse nécessaire de nanoparticules est calculée afin d'obtenir des solutions avec des concentrations volumiques de 0,1 % et 0,2 %. Ensuite, les nanoparticules sont dispersées dans l'eau désionisée, et la solution est soumise à une vibration dans un appareil à ultrasons pendant 90 minutes. Cette étape vise à garantir une dispersion uniforme des nanoparticules dans la solution.

###### **IV.4.1.2. Dispositif expérimental et section d'essai :**

Comme illustré dans la Figure IV.35, qui représente le schéma de l'installation expérimentale, le dispositif se compose principalement d'un réservoir de liquide, d'une pompe, d'une section d'essai, d'un récipient de collecte et d'un système d'acquisition de données. Le fluide de travail, contenu dans le réservoir, est pompé à travers une vanne et une section d'essai avant d'être recueilli dans un récipient. Le débit massique est minutieusement contrôlé à l'aide d'une vanne, et un dispositif de mesure électronique de haute précision est employé pour évaluer le débit massique du fluide. Un système d'acquisition de données est également déployé pour collecter et afficher les différentes températures au sein de la section d'essai ainsi que celles du fluide.

La Figure IV.36 présente un schéma de la section de l'installation expérimentale d'essai, détaillant les différentes températures mesurées à l'entrée, à la sortie du fluide et dans la section d'essai. La configuration se compose d'une plaquette de silicium d'une épaisseur de 650 mm, fixée au-dessus par quatre bandes de verre très fines de 580 mm d'épaisseur (qui servent de parois extérieures du canal) à l'aide d'une colle. Sur ces bandes de verre, une couche de verre de 0,3 mm d'épaisseur est ajoutée pour former le volume fermé nécessaire à l'écoulement des fluides. Cette configuration aboutit à des dimensions finales du canal de 94,3 mm de long, 28,1 mm de large et 580 mm de haut. Un élément chauffant auto-isolé électriquement (élément chauffant en Kapton d'Omega Eng. Co.) d'une épaisseur de 20,3 mm est fixée au fond de la plaque de silicium pour simuler le flux de chaleur généré par le dispositif électronique. L'alimentation en courant continu alimente ce chauffage. Pour mesurer la température sur le silicium, cinq thermocouples de type T de 0,13 mm de diamètre (espacés de manière égale de l'entrée à la sortie du canal) sont placés entre la plaquette de silicium et le dispositif de chauffage. Enfin, pour assurer une isolation thermique efficace de la section de test, l'ensemble du système est logé dans un boîtier en téflon avec une couche d'isolation thermique fixée à sa base. Les températures d'entrée et de sortie du fluide sont également mesurées à l'aide de deux thermocouples de type T (0,13 mm de diamètre).

Toutes les températures des cinq parois et des deux fluides sont collectées et affichées par un PC à l'aide d'un système d'acquisition de données.

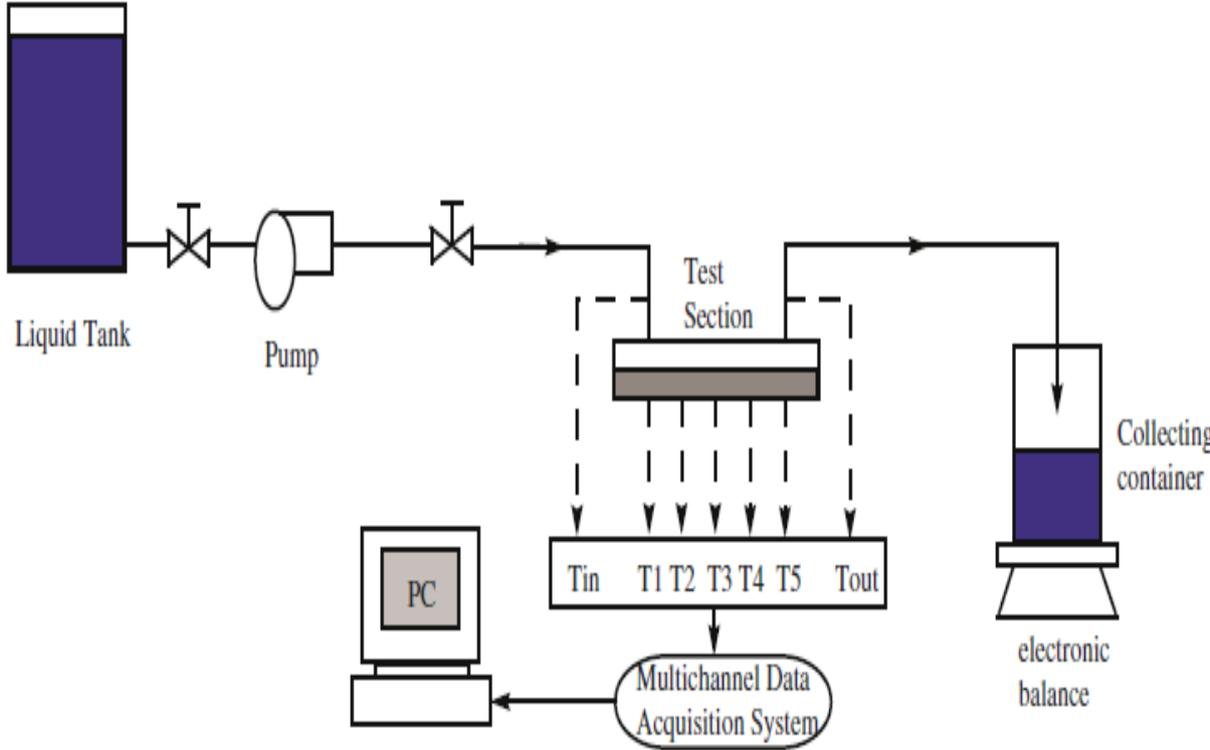


Figure IV.35. Schéma de l'installation expérimentale [86].

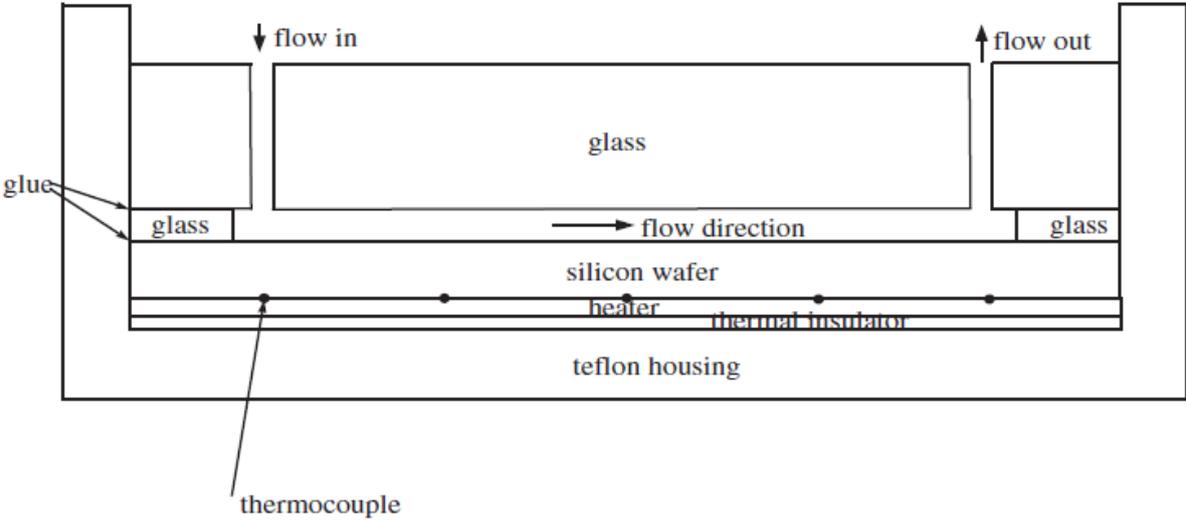


Figure IV.36. Schéma de l'installation expérimentale  
Schéma de la section d'essai [86].

#### **IV.4.1.3. Réduction des données et analyse des erreurs :**

Le coefficient moyen de transfert de chaleur est utilisé pour étudier le transfert de chaleur. Il est défini par :

$$\bar{h} = \frac{Q}{A_h \Delta T_m} \dots \dots \dots \text{IV.1}$$

La chaleur totale évacuée par le fluide en circulation à l'intérieur du micro canal peut être calculée comme suit :

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \dots \dots \dots \text{IV.2}$$

La différence de température moyenne entre la paroi solide et le fluide est définie comme suit :

$$\Delta T_m = \frac{1}{5} (T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_{w4} + T_{w5}) - \frac{1}{2} (T_{in} + T_{out}) \dots \dots \dots \text{IV.3}$$

Où  $T_{w1}$ ,  $T_{w2}$ ,  $T_{w5}$  sont les températures de paroi mesurées. Enfin, le nombre de Nusselt moyen est défini comme suit :

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} D_h}{k_f} \dots \dots \dots \text{IV.4}$$

#### **IV.4.1.4. Procédure expérimentale [86] :**

Après avoir établi la boucle d'essai, le débit massique du fluide est réglé à l'aide d'une vanne. L'alimentation en courant continu est maintenue à une tension et à un courant constants tout au long des expériences. Une fois que le flux a atteint un état stable, le système d'acquisition de données enregistre les températures d'entrée et de sortie du fluide, ainsi que les cinq températures mesurées dans le mur en silicium.

Ce processus est réalisé pour l'eau déionisée ainsi que pour les nanofluides 0,1 % et 0,2 % à différents débits massiques. Dans ces expériences, les gammes de paramètres sont les suivantes : flux thermique de 20,5 kW.m<sup>-2</sup> (80 V et 0,68 A), température d'entrée de 25 - 27 C° et débit massique de 0,6 - 3,4 g.s<sup>-1</sup>.

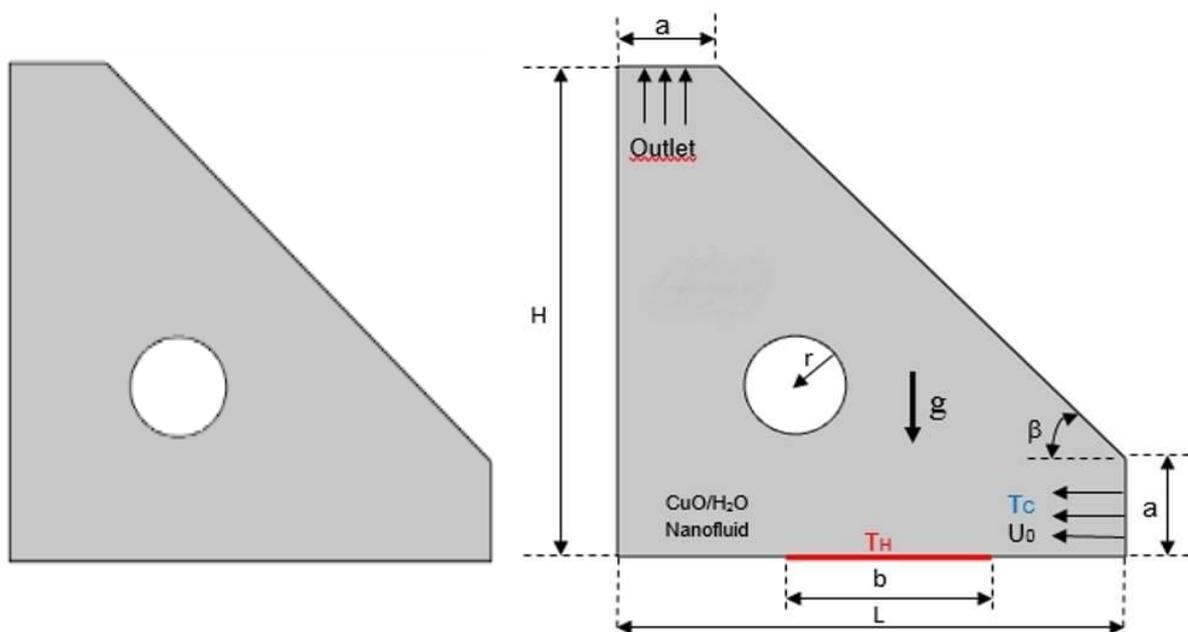
#### **IV.4.2. Description de la méthode numérique :**

On sélectionne l'enceinte B, mais cette fois sans mentionné le champ magnétique, puis on procède à l'élaboration de la simulation numérique. En prenant en considération toutes les équations gouvernantes, la description complète du modèle sans champs magnétique, les conditions aux limites et les propriétés du nanofluide mentionnées dans la première partie du troisième chapitre, nous conservons les caractéristiques et les données tout en faisant varier le

nombre de Reynolds et la taille de la fraction particulaire. Par la suite, ces résultats sont comparés avec ceux de l'étude expérimentale [86].

#### **IV.4.2.1. Configuration géométrique un récipient triangulaire.**

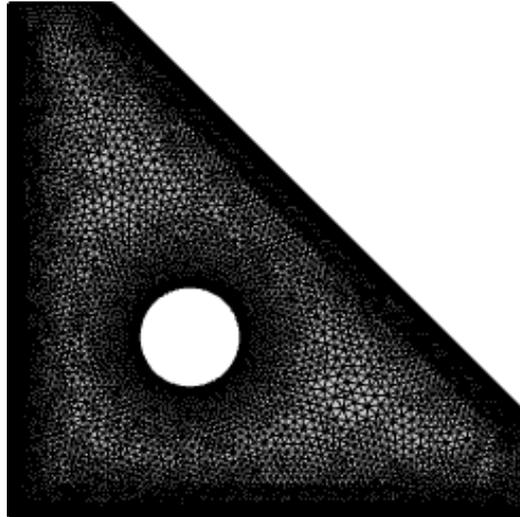
Le nanofluide s'écoule dans un récipient triangulaire de diamètre cylindrique ( $2r$ ) et de volume  $H \times L$ . La Figure IV.37 illustre le problème graphique d'un récipient avec une géométrie de base. La cavité est comblée de nanofluide ( $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$ ), où une portion de la paroi latérale inférieure est considérée comme chaude, tandis que la paroi d'entrée est froide. Au centre du boîtier, nous installons un cylindre maintenu à une température constante. Dans un système bidimensionnel, nous supposons que le nanofluide en écoulement est stable et incompressible.



**Figure IV.37.** Illustration des domaines physiques.

#### **IV.4.2.2. Validation et analyse de l'indépendance du maillage :**

Pour s'assurer que les résultats ne dépendent pas des grilles, Nous avons répété le même travail dans l'axe III.5.6 dans le chapitre précédent.



**Figure IV.38.** Illustration graphique de la distribution du maillage.

### IV.4.2.3. Quelques étapes importantes du programme de simulation pour valider l'étude expérimentale de Kalteh et al [86] :

➤ Entrez les Paramètres :

**Settings**  
Parameters

Label: Parameters 1

Parameters

Name	Expression	Value	Description
rhof	997.1	997.1	fluide de base
cpf	4179	4179	fluide de base
kf	0.613	0.613	fluide de base
betaf	21e-5	2.1E-4	fluide de base
alphaf	$kf/(rhof*cpf)$	1.4711E-7	fluide de base
muf	0.001003	0.001003	fluide de base
vf	$muf/rhof$	1.0059E-6	fluide de base
rhos	6500	6500	solid1Cuo
cps	540	540	solid1Cuo
ks	18	18	solid1Cuo
betas	29e-5	2.9E-4	solid1Cuo
fiyfnf	0.02	0.02	
knf	$(kf*(ks+(2*kf)-2*...)$	0.64687	
rhonfnf	$((1-fiyfnf)*rhof)...$	1107.2	nano fluid
cpnfnf	$((1-fiyfnf)*cpf)+...$	4106.2	nano fluid
betanfnf	$((1-fiyfnf)*betaf)...$	2.116E-4	nano fluid
rhobetanfnf	$(1-fiyfnf)*(rhof*b...$	0.2429	
rhocpnfnf	$(1-fiyfnf)*(rhof*c...$	4.1537E6	
alphanfnf	$knf/(rhonfnf*cpnfnf)$	1.4229E-7	
Th	1	1	

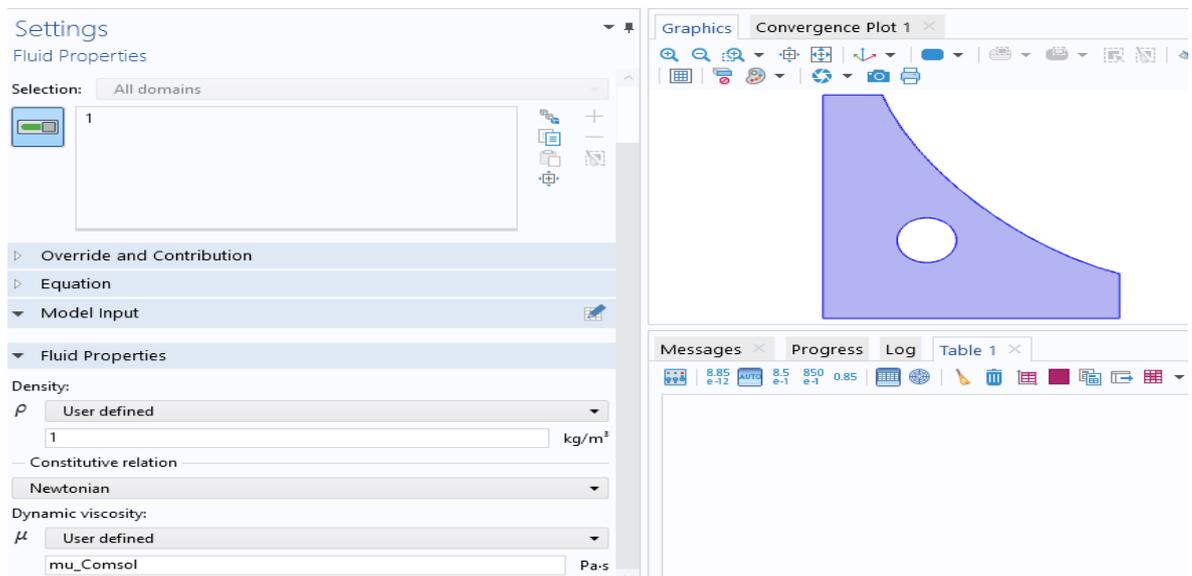
Graphics Convergence Plot 1

Messages Progress Log Table 1

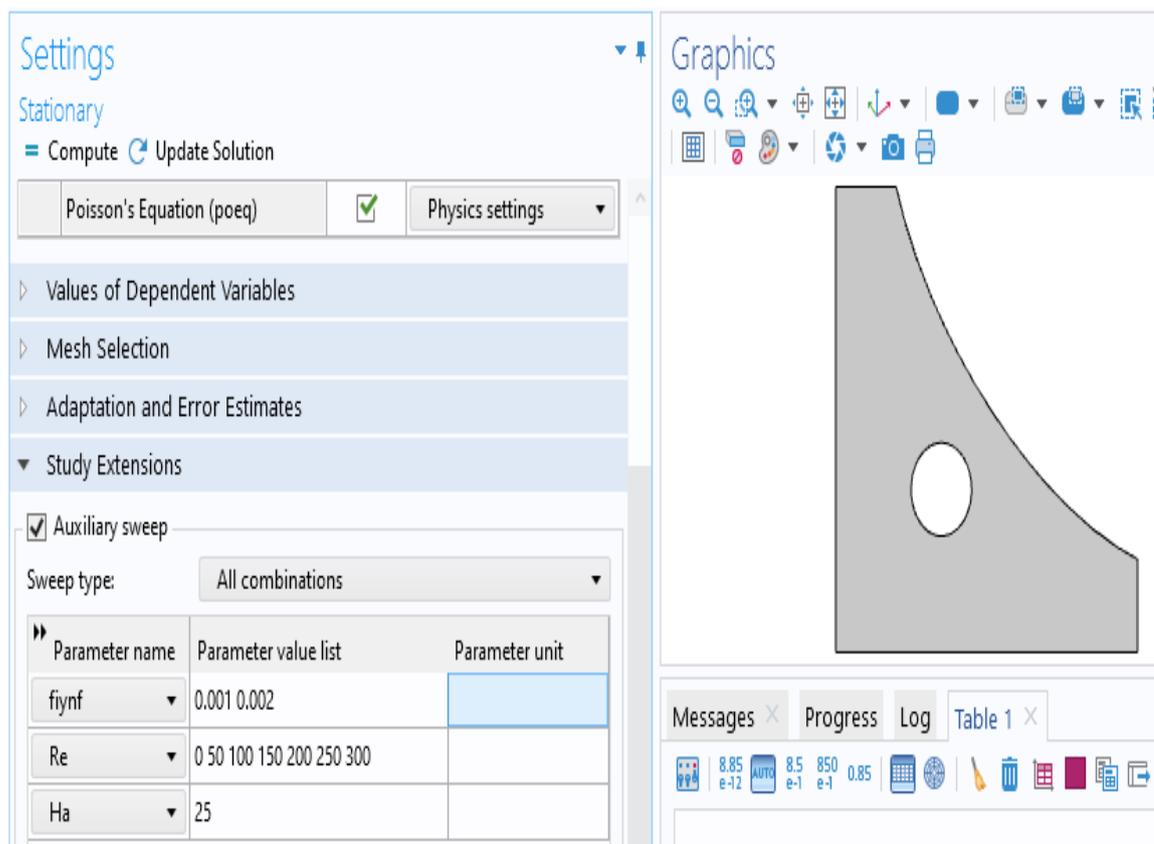
8.85 e-12 AUTO 8.5 e-1 850 e-1 0.85

## Chapitre VI : Simulations numériques et comparaison des résultats à l'aide d'une expérience Data show.

- Entrez les propriétés des fluides :

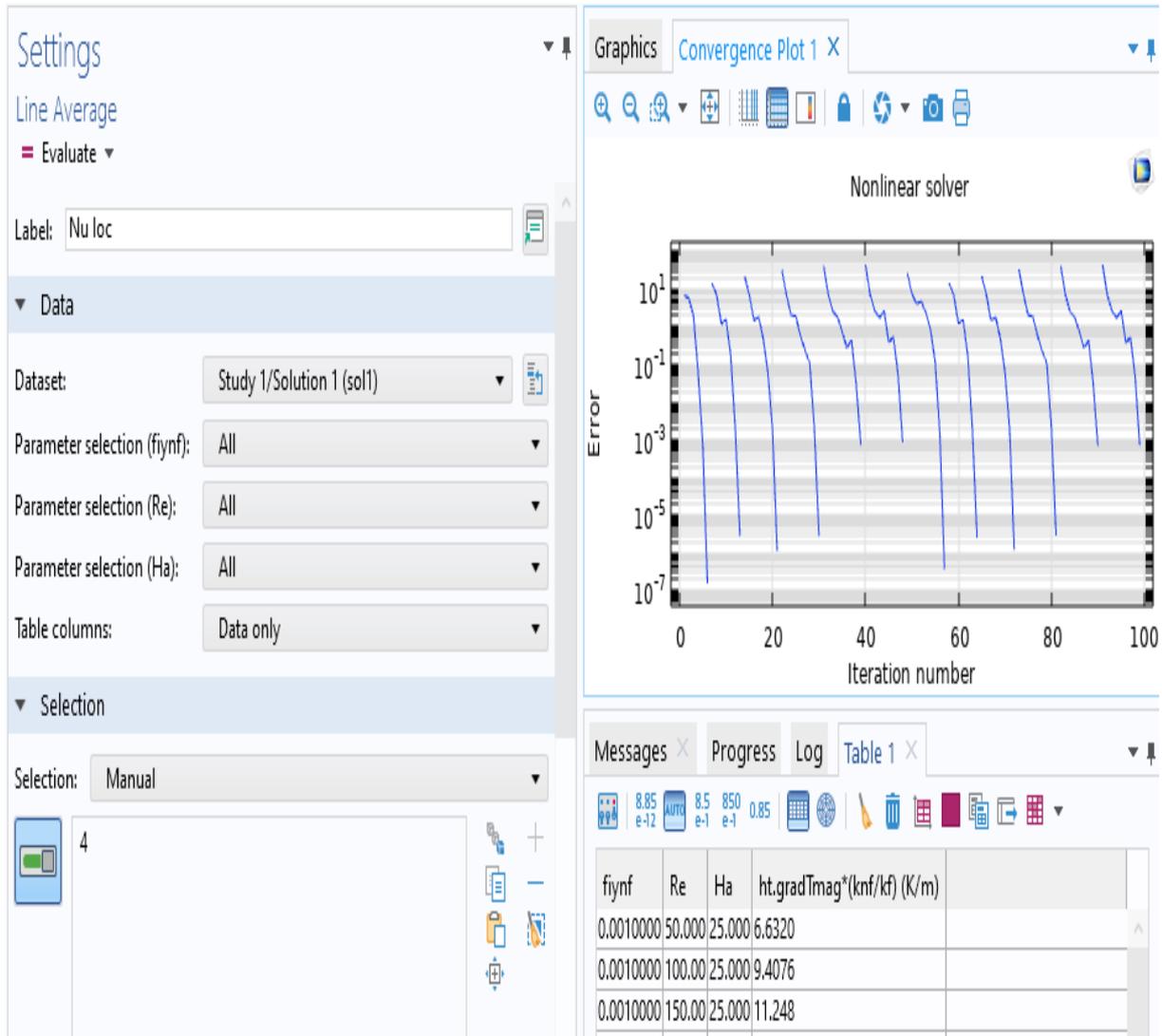


- Entrez les paramètres de Reynolds et volume fraction nanoparticule et numéro de Hartman :



## Chapitre VI : Simulations numériques et comparaison des résultats à l'aide d'une expérience Data schow.

- Fin de la simulation et le résultat obtenu :



#### IV.4.3. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques :

Des résultats impressionnants et très utiles dans l'amélioration et le développement du processus de transport thermique avec un consensus dans les conclusions des études littéraires antérieures.

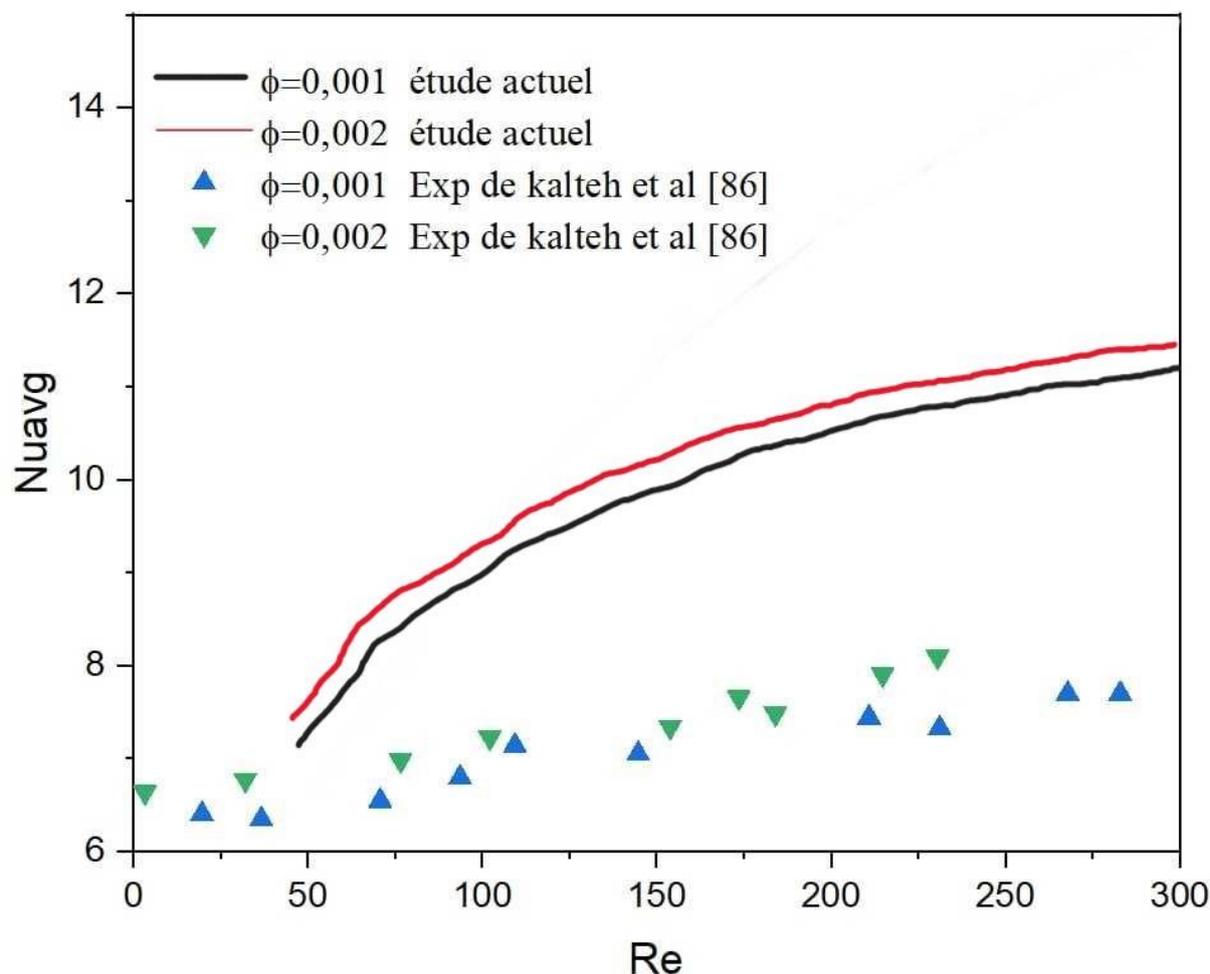


Figure IV.39. Comparaison entre résultats expérimentaux de Kalteh et al [86] et nous résultats numériques a différent  $\phi$  et  $Ha = 25$ .

Une comparaison entre les résultats expérimentaux de Kalteh et al. [86] et les simulations numériques à différents  $\phi$  et  $Ha = 25$  est présentée dans la figure ci-dessus. Tout d'abord, les auteurs ont réalisé deux expériences [86] pour  $\phi = 0,001$  et  $\phi = 0,02$ . On observe une augmentation du nombre de Reynolds, ainsi qu'une amélioration du nombre moyen de Nusselt. En effet, le nombre moyen de Nusselt augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules. La légère différence entre les deux valeurs de la fraction volumique des nanoparticules a entraîné une amélioration du nombre moyen de Nusselt. Il est possible d'améliorer ce dernier en augmentant davantage la fraction volumique des nanoparticules.

Deuxièmement, en comparant les résultats numériques obtenus par notre code proposé avec l'étude expérimentale [86], où nous avons appliqué les données de l'étude expérimentale à notre modèle (deuxième triangle de cavité), nous observons un nombre moyen de Nusselt de l'ordre de ( $\varphi = 0,001$  et  $\varphi = 0,002$ ). Cette observation est attribuable à la grande convergence de la fraction volumique des nanoparticules. Une amélioration des résultats du nombre moyen de Nusselt peut être réalisée en augmentant la fraction volumique des nanoparticules, comme indiqué dans notre étude précédente, où nous avons défini le champ approprié pour la fraction volumique des nanoparticules.

En conclusion, suite à ce volet de recherche, nous observons une amélioration significative du nombre de Nusselt, atteignant jusqu'à 30 % par rapport aux résultats de l'étude expérimentale [86]. Cette amélioration découle de l'importance de la taille des nanoparticules dans la transmission thermique, ainsi que la forme idéale de cavité que nous avons identifiée pour obtenir un excellent transfert de chaleur.

#### **IV.5. Conclusion.**

En ce qui concerne la première partie, l'effet du transfert de chaleur mixte bidimensionnel dans une cavité avec une ouverture d'entrée/sortie, ainsi que l'emplacement de la source de chaleur sur une partie de la paroi inférieure, est analysé à travers trois modèles de suffisance différents. Les résultats suivants peuvent être déduits de cette étude numérique :

- Malgré l'étude des trois cavités, une relation entre la vitesse et la température est observée. En augmentant la vitesse, la température de nano fluide diminue, et vice versa. L'ampleur de cette relation entre la vitesse et la température varie. La température de nano fluide est plus élevée avec une vitesse faible dans la deuxième cavité par rapport à la première et à la troisième cavité.
- En augmentant le nombre de Hartmann, l'intensification du champ magnétique provoque une augmentation de l'épaisseur des lignes de courant, entraînant ainsi une nette diminution du nombre moyen de Nusselt dans la seconde cavité.
- En augmentant la valeur du nombre de Reynolds, le transfert de chaleur augmente, ce qui se traduit par un écoulement plus rapide du fluide.

- La deuxième forme de la cavité permet d'améliorer le transfert de chaleur beaucoup plus efficacement que les deux autres formes.

Dans la deuxième partie, nous analysons la génération d'entropie et le phénomène de convection lorsqu'un nanofluide s'écoule à l'intérieur d'une cavité carrée sous l'influence d'un champ magnétique. L'étude est réalisée sur quatre modèles de formes similaires avec une modification des parois froides et chaudes. Nous examinons les résultats du nombre de Rayleigh (Ra) et du nombre de Hartmann (Ha). Nous pouvons résumer les résultats obtenus dans les points suivants :

- Les champs thermiques et hydrodynamiques sont influencés par la valeur du nombre de Hartmann (Ha) et la proximité de la paroi chaude.
- Lorsque le nombre de Rayleigh (Ra) augmente, la taille du tourbillon à l'intérieur de la cavité augmente. Aussi une porosité élevée améliore le transfert de chaleur.
- Une augmentation de Ra, Ha et Da a un effet direct sur le transfert de chaleur et la génération d'entropie, tandis que  $\epsilon$  améliore le transfert de chaleur. Nous notons que la concentration volumique des nanoparticules solides n'affecte pas significativement le processus de transfert de chaleur et la génération d'entropie, surtout à des valeurs élevées de Ra.
- La génération d'entropie thermique influence les autres composants, et les paramètres ont un effet direct sur le processus de transfert de chaleur, surtout lorsque Ra est élevé. De plus, en modifiant le champ magnétique, nous pouvons contrôler le transfert de chaleur.
- La génération d'entropie et la performance thermique s'améliorent avec des valeurs plus élevées de Ra et de  $\phi$ . Elles diminuent avec l'augmentation de Ha.

- La génération d'entropie dans la troisième cavité est nettement supérieure, suivie de près par la deuxième cavité. En revanche, la quatrième cavité demeure défavorable et présente une faible stimulation dans la génération d'entropie.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

Dans ce volet de recherche, une investigation théorique et numérique est menée pour étudier la dynamique de l'écoulement bidimensionnel laminaire des nanofluides et l'influence d'un champ magnétique sur le transfert de chaleur par convection autour d'un obstacle fixe. Cette étude est réalisée à travers différentes configurations géométriques (trapézoïdale, rectangulaire) sous l'action d'un flux de chaleur constant.

Nous avons utilisé deux types de nanofluide (CuO/eau) et (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ag/eau), en supposant que le nanofluide peut être assimilé à un fluide homogène. Il est vrai que l'ajout de nanoparticules dans l'eau pure augmente sa conductivité thermique et améliore donc le transfert de chaleur par conduction dans les nanofluides par rapport au transfert de chaleur par conduction dans le fluide de base.

Au niveau de cette analyse numérique, la géométrie du modèle utilisé est élaborée et maillée, et la résolution ainsi que l'exploitation des résultats sont obtenues à partir du solveur Comsol Multiphysics version 5.6. Les effets de la forme de la cavité, des changements de position des parois chaudes et froides, du nombre de Reynolds, du nombre de Rayleigh, du nombre de Hartmann, du nombre de Richardson, et de la fraction volumique sur le comportement thermique et dynamique des deux cavités sont présentés et discutés.

En ce qui concerne le transfert de chaleur, l'étude numérique a révélé que les nanofluides sont effectivement supérieurs au fluide caloporteur traditionnel et qu'ils accroissent très rapidement les transferts thermiques en présence d'un champ magnétique et d'un cylindre fixe. Cependant, le nombre de Nusselt moyen croît proportionnellement avec le nombre de Reynolds, qui représente l'échange de chaleur. Ainsi, il existe une relation entre le nombre de Rayleigh et la génération d'entropie.

D'autres recherches théoriques et expérimentales sont nécessaires afin d'utiliser les nanofluides de manière efficace pour l'amélioration du transfert de chaleur par convection.

Les résultats sont présentés en termes de plusieurs paramètres, tels que le nombre de Nusselt moyen, l'entropie et la performance thermo-hydraulique.

A la lumière des résultats obtenus dans cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Un accroissement du nombre de Hartmann se traduit par une augmentation de l'intensité du champ magnétique, entraînant ainsi une augmentation de l'épaisseur des lignes de courant. Cela se traduit par une nette diminution du nombre de Nusselt moyen dans la seconde cavité.
- En augmentant la valeur du nombre de Reynolds, le transfert de chaleur augmente, ce qui entraîne un écoulement plus rapide du fluide.
- Les champs thermiques et hydrodynamiques sont influencés par la valeur du nombre de Hartmann ( $Ha$ ) et par la proximité de la paroi chaude.
- Lorsque le nombre de Rayleigh ( $Ra$ ) augmente, la taille du tourbillon à l'intérieur de la cavité augmente. Aussi Une porosité élevée améliore le transfert de chaleur.
- Une augmentation des valeurs de  $Ra$ ,  $Ha$  et  $Da$  a un impact direct sur le transfert de chaleur et la génération d'entropie, tandis que  $\varepsilon$  améliore le transfert de chaleur. Il est à noter que la concentration volumique des nanoparticules solides n'affecte pas significativement le processus de transfert de chaleur et la génération d'entropie, surtout à des valeurs élevées de  $Ra$ .
- La génération d'entropie thermique influe sur les autres composants. Les paramètres ont un impact direct sur le processus de transfert de chaleur, surtout lorsque le nombre de Rayleigh ( $Ra$ ) est élevé. De plus, en ajustant le champ magnétique, nous pouvons exercer un contrôle sur le transfert de chaleur.
- La génération d'entropie et la performance thermique s'améliorent avec des valeurs plus élevées de  $Ra$  et de  $\phi$ , tandis qu'elles diminuent avec l'augmentation de  $Ha$ .
- La génération d'entropie dans la troisième cavité est bien meilleure. Suivent ensuite les deuxièmes et troisièmes cavités. Alors que la quatrième cavité reste mauvaise et non stimulée dans la génération d'entropie.

**Perspectives :**

Les futurs travaux de recherche seront axés sur une étude des différents modèles de turbulences appliqués aux nanofluides ainsi que sur l'exploration de divers obstacles, y compris différentes formes et mobiles.

# BIBLIOGRAPHIE

### Bibliographie

- [1] L. QiangXUAN Yimin, "SCIENCE IN CHINA (Series E) Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid," 2002.
- [2] I. Tmartnhad, M. el Alami, M. Najam, and A. Oubarra, "Numerical investigation on mixed convection flow in a trapezoidal cavity heated from below," *Energy Convers Manag*, vol. 49, no. 11, pp. 3205–3210, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.05.017.
- [3] D. P. Kulkarni, D. K. Das, and R. S. Vajjha, "Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution," *Appl Energy*, vol. 86, no. 12, pp. 2566–2573, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.03.021.
- [4] J. N. Solanki and Z. V. P. Murthy, "Controlled size silver nanoparticles synthesis with water-in-oil microemulsion method: A topical review," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 22, pp. 12311–12323, Nov. 16, 2011. doi: 10.1021/ie201649x.
- [5] E. Sourtiji, S. F. Hosseinizadeh, M. Gorji-Bandpy, and D. D. Ganji, "Effect of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids on heat transfer and pressure drop in periodic mixed convection inside a square ventilated cavity," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, no. 8, pp. 1125–1134, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.05.009.
- [6] D. Maity et al., "In situ synthesis, characterization, and antimicrobial activity of silver nanoparticles using water soluble polymer," *J Appl Polym Sci*, vol. 122, no. 4, pp. 2189–2196, Nov. 2011, doi: 10.1002/app.34266.
- [7] D. Li and W. Fang, "Preparation and stability of silver/kerosene nanofluids," 2012. [Online]. Available: <http://www.nanoscalereslett.com/content/7/1/362>
- [8] W. Yu and H. Xie, "A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, 2012. doi: 10.1155/2012/435873.
- [9] R. S. Vajjha and D. K. Das, "A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 55, no. 15–16, pp. 4063–4078, 2012, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.048.
- [10] L. T. Tam et al., "Characterization and antimicrobial activity of silver nanoparticles

- prepared by a thermal decomposition technique,” *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 113, no. 3, pp. 613–621, Nov. 2013, doi: 10.1007/s00339-013-7810-4.
- [11] M. M. Sarafraz, F. Hormozi, and S. M. Peyghambarzadeh, “Thermal performance and efficiency of a thermosyphon heat pipe working with a biologically ecofriendly nanofluid,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 57, pp. 297–303, 2014, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.08.020.
- [12] Y. K. Jo et al., “Surface-independent antibacterial coating using silver nanoparticle-generating engineered mussel glue,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 6, no. 22, pp. 20242–20253, Nov. 2014, doi: 10.1021/am505784k.
- [13] M. Batmunkh et al., “Thermal conductivity of TiO<sub>2</sub> nanoparticles based aqueous nanofluids with an addition of a modified silver particle,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 53, no. 20, pp. 8445–8451, May 2014, doi: 10.1021/ie403712f.
- [14] M. M. Rahaman Mollick et al., “Anticancer (in vitro) and antimicrobial effect of gold nanoparticles synthesized using *Abelmoschus esculentus* (L.) pulp extract via a green route,” *RSC Adv*, vol. 4, no. 71, pp. 37838–37848, 2014, doi: 10.1039/c4ra07285e.
- [15] E. Sourtiji, M. Gorji-Bandpy, D. D. Ganji, and S. F. Hosseinizadeh, “Numerical analysis of mixed convection heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid in a ventilated cavity considering different positions of the outlet port,” *Powder Technol*, vol. 262, pp. 71–81, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.04.061.
- [16] A. kadhim AL-Ogaili, A. K. Ali, and T. H. Ali, “Preparation of Silver Nanoparticles and Study the Optical and Antibacterial Properties,” 2015.
- [17] I. Journal, K. Purohit, and V. V. S. Murty, “IRJET-Novel method to synthesize silver nanofluid for solar energy applications Novel method to synthesize silver nanofluid for solar energy applications,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2015, [Online]. Available: [www.irjet.net](http://www.irjet.net).
- [18] Z. Mehrez, A. el Cafsi, A. Belghith, and P. le Quéré, “The entropy generation analysis in the mixed convective assisting flow of Cu-water nanofluid in an inclined open cavity,” *Advanced Powder Technology*, vol. 26, no. 5, pp. 1442–1451, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.apt.2015.07.020.

- [19] G. Y. Ny, N. H. Barom, S. M. Noraziman, and S. T. Yeow, “Akademia Baru Numerical Study on Turbulent-Forced Convective Heat Transfer of Ag/Heg Water Nanofluid in Pipe,” 2016.
- [20] X. F. Zhang, Z. G. Liu, W. Shen, and S. Gurunathan, “Silver nanoparticles: Synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 17, no. 9. MDPI AG, Sep. 13, 2016. doi: 10.3390/ijms17091534.
- [21] F. Khan, M. U. Hashmi, N. Khalid, M. Q. Hayat, A. Ikram, and H. A. Janjua, “Controlled assembly of silver nano-fluid in *Heliotropium crispum* extract: A potent anti-biofilm and bactericidal formulation,” *Appl Surf Sci*, vol. 387, pp. 317–331, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.apsusc.2016.05.133.
- [22] K. B. Narayanan and S. S. Han, “Dual-crosslinked poly(vinyl alcohol)/sodium alginate/silver nanocomposite beads – A promising antimicrobial material,” *Food Chem*, vol. 234, pp. 103–110, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.04.173.
- [23] M. Nakhjavani, V. Nikkhah, M. M. Sarafraz, S. Shoja, and M. Sarafraz, “Green synthesis of silver nanoparticles using green tea leaves: Experimental study on the morphological, rheological and antibacterial behaviour,” *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, vol. 53, no. 10, pp. 3201–3209, Oct. 2017, doi: 10.1007/s00231-017-2065-9.
- [24] N. Bouazizi et al., “Silver nanoparticle embedded copper oxide as an efficient core-shell for the catalytic reduction of 4-nitrophenol and antibacterial activity improvement,” *Dalton Transactions*, vol. 47, no. 27, pp. 9143–9155, 2018, doi: 10.1039/c8dt02154f.
- [25] V. Corumlu, A. Ozsoy, and M. Ozturk, “Fabrication and Investigation of Silver Water Nanofluids for Long-term Heat Transfer Application,” in *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*, Elsevier Inc., 2018, pp. 779–791. doi: 10.1016/B978-0-12-813734-5.00044-5.
- [26] A. Ozsoy and V. Corumlu, “Thermal performance of a thermosyphon heat pipe evacuated tube solar collector using silver-water nanofluid for commercial applications,” *Renew Energy*, vol. 122, pp. 26–34, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.01.031.
- [27] M. M. Sarafraz, V. Nikkhah, M. Nakhjavani, and A. Arya, “Thermal performance of a heat sink microchannel working with biologically produced silver-water

- nanofluid: Experimental assessment,” *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 91, pp. 509–519, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.11.007.
- [28] A. Zeeshan, N. Shehzad, and R. Ellahi, “Analysis of activation energy in Couette-Poiseuille flow of nanofluid in the presence of chemical reaction and convective boundary conditions,” *Results Phys*, vol. 8, pp. 502–512, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.rinp.2017.12.024.
- [29] M. Izadi, N. M. Maleki, I. Pop, and S. A. M. Mehryan, “Natural convection of a hybrid nanofluid subjected to non-uniform magnetic field within porous medium including circular heater,” *Int J Numer Methods Heat Fluid Flow*, vol. 29, no. 4, pp. 1211–1231, Jun. 2019, doi: 10.1108/HFF-08-2018-0428.
- [30] S. A. Umoren, M. M. Solomon, A. Nzila, and I. B. Obot, “Preparation of silver/chitosan nanofluids using selected plant extracts: Characterization and antimicrobial studies against gram-positive and gram-negative bacteria,” *Materials*, vol. 13, no. 7, Apr. 2020, doi: 10.3390/ma13071629.
- [31] S. H. Pourhoseini, “Enhancement of radiation characteristics and reduction of NO<sub>x</sub> emission in natural gas flame through silver-water nanofluid injection,” *Energy*, vol. 194, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.116900.
- [32] L. Yang and K. Du, “A comprehensive review on the natural, forced, and mixed convection of non-Newtonian fluids (nanofluids) inside different cavities,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 140, no. 5. Springer Netherlands, pp. 2033–2054, Jun. 01, 2020. doi: 10.1007/s10973-019-08987-y.
- [33] B. M. Amine, F. Redouane, L. Mourad, W. Jamshed, M. R. Eid, and W. Al-Kouz, “Magnetohydrodynamics Natural Convection of a Triangular Cavity Involving Ag-MgO/Water Hybrid Nanofluid and Provided with Rotating Circular Barrier and a Quarter Circular Porous Medium at its Right-Angled Corner,” *Arab J Sci Eng*, vol. 46, no. 12, pp. 12573–12597, Dec. 2021, doi: 10.1007/s13369-021-06015-6.
- [34] A. M. Alklaibi, L. S. Sundar, and K. V. V. Chandra Mouli, “Experimental investigation on the performance of hybrid Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> coated MWCNT/Water nanofluid as a coolant of a Plate heat exchanger,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 171, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107249.
- [35] Abdelhak, R., Abderrazak, A., Redouane, F., & Khelili, Y. (2023). Mixed Convection Magnetohydrodynamics of Different Forms of Triangular Cavity

- Involving CuO/Water Nanofluid. *Journal of Nanofluids*, 12(4), 1082–1094. <https://doi.org/10.1166/jon.2023.1974>;
- [36] Ghali, D., Redouane, F., Abdelhak, R., Belhadj Mahammed, A., Zineb, C. D., Jamshed, W., Eid, M. R., Eldin, S. M., Musa, A., & Mohd Nasir, N. A. A. (2022). Mathematical Entropy Analysis of Natural Convection of MWCNT—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Water Hybrid Nanofluid with Parallel Magnetic Field via Galerkin Finite Element Process. *Symmetry*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/sym14112312>
- [37] Abdelhak, R., Redouane, F., Jamshed, W., Eid, M. R., Guedri, K., Israr Ur Rehman, M., & El Din, S. M. (2022). Analysis of water conveying aluminum oxide/silver nanoparticles due to mixed convection through four square cavity's variable hot (cold) walled. *Ain Shams Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102072>
- [38] Redouane, F., Jamshed, W., Uma Devi, S. S., Prakash, M., Mahammed, A. B., & Abdelhak, R. (2022). Entropy Study of Hybrid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Cu/H<sub>2</sub>O) Nano-Fluid in a Cylindrical Cavity with Wavy Sides Under the Effect of a Parallel Magnetic Field. *Journal of Nanofluids*, 12(1), 231–241. [doi.org/10.1166/jon.2023.1960](https://doi.org/10.1166/jon.2023.1960).
- [39] S. Ferrouillat, A. Bontemps, J. A. Gruss, O. Poncelet, and O. Soriano, “Influence du facteur de forme des nanoparticules sur les performances thermiques d'un nanofluide.”
- [40] I. C. Bang and S. Heung Chang, “Boiling heat transfer performance and phenomena of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nano-fluids from a plain surface in a pool,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 48, no. 12, pp. 2407–2419, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.047.
- [41] H. Sakuma and K. Ishii, “Gas flow sputtering: Versatile process for the growth of nanopillars, nanoparticles, and epitaxial thin films,” *J Magn Magn Mater*, vol. 321, no. 7, pp. 872–875, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.jmmm.2008.11.053.
- [42] “Nanotechnologies pour l'énergie, l'environnement et la santé.” [Online]. Available: [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)
- [43] Y. Singh, J. R. N. Javier, S. H. Ehrman, M. H. Magnusson, and K. Deppert, “Approaches to increasing yield in evaporation=condensation nanoparticle generation,” 2002. [Online]. Available: [www.elsevier.com/locate/jaerosci](http://www.elsevier.com/locate/jaerosci).
- [44] D. K. Lee, Y. H. Kim, X. L. Zhang, and Y. S. Kang, “Preparation of monodisperse Co and Fe nanoparticle using precursor of M<sup>2+</sup>-oleate<sub>2</sub> (M = Co, Fe),” *Current*

- Applied Physics, vol. 6, no. 4, pp. 786–790, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.cap.2005.04.040.
- [45] D. F A G H A N I 2 A N, “Successive stages and the role of natural vortex dislocations in three-dimensional wake transition,” 2001.
- [46] R. Benoit et al., “Optimisation of the surface properties of SBA-15 mesoporous silica for in-situ nanoparticle synthesis,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 120, no. 1–2, pp. 2–6, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.micromeso.2008.12.017.
- [47] C. C. Cho, “Influence of magnetic field on natural convection and entropy generation in Cu-water nanofluid-filled cavity with wavy surfaces,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 101, pp. 637–647, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.044.
- [48] M. A. Sheremet, H. F. Oztop, I. Pop, and K. Al-Salem, “MHD free convection in a wavy open porous tall cavity filled with nanofluids under an effect of corner heater,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 103, pp. 955–964, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.006.
- [49] B. Ghasemi, S. M. Aminossadati, and A. Raisi, “Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, no. 9, pp. 1748–1756, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.04.010.
- [50] Milton. van Dyke, *An album of fluid motion*. Parabolic Press, 1982.
- [51] D. W I G H T B A R K L E Y ’ A n d R O N A L, “Three-dimensional Floquet stability analysis of the wake of a circular cylinder,” 1996.
- [52] T. Leweke and C. H. K. Williamson, “Three-dimensional instabilities in wake transition.”
- [53] RONALD D. HENDERSON “Nonlinear dynamics and pattern formation in turbulent wake transition,” In *J. Fluid Mech* (Vol. 352)..Cambridge University Press, 1997.
- [54] Persillon , Braza “Physical analysis of the transition to turbulence in the wake of a circular cylinder by three-dimensional Navier-Stokes simulation.”
- [55] M. M. Z. Dravkovich, “DIFFERENT MODES OF VORTEX SHEDDING : AN OVERVIEW †,” 1996.

- [56] C. Norberg, “An experimental investigation of the flow around a circular cylinder : influence of aspect ratio,” 1994.
- [57] T. Wei and C. R. Smith, “Secondary vortices in the wake of circular cylinders,” 1986.
- [58] Thermique, T. (n.d.). Polycopié de Cours Algérie 2017 Khelil Foudil.
- [59] Ayman Altaweel. (n.d.). Synthèse de nanostructures d’oxyde de cuivre par micro-post-décharge micro-ondes à pression atmosphérique Ayman Altaweel. Retrieved November 19, 2022, from <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750767>.
- [60] Wirth, W. ;, & Schramm. (2005). Media and Emotions. Communication Research, Trends, 3–39. <https://doi.org/10.5167/uzh-101679>.
- [61] Sarkar, J. (2011). A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 15, Issue 6, pp. 3271–3277). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.025>
- [62] Y. Xuan and W. Roetzel, “Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids.” [Online]. Available: [www.elsevier.com/locate/ijhmt](http://www.elsevier.com/locate/ijhmt)
- [63] B. C. Pak and Y. I. Cho, “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles,” Experimental Heat Transfer, vol. 11, no. 2, pp. 151–170, 1998, doi: 10.1080/08916159808946559.
- [64] X. Q. Wang and A. S. Mujumdar, “Heat transfer characteristics of nanofluids: a review,” International Journal of Thermal Sciences, vol. 46, no. 1. pp. 1–19, Jan. 2007. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010.
- [65] M. L. Levin and M. A. Miller, “Maxwell’s ‘Treatise on Electricity and Magnetism,’” 1982. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/0038-5670/24/11/A03>
- [66] D. P. H. Hasselman and L. F. Johnson, “Effective Thermal Conductivity of Composites with Interfacial Thermal Barrier Resistance.”
- [67] O. M. Wilson, X. Hu, D. G. Cahill, and P. v. Braun, “Colloidal metal particles as probes of nanoscale thermal transport in fluids,” Phys Rev B Condens Matter Mater Phys, vol. 66, no. 22, pp. 2243011–2243016, Dec. 2002, doi: 10.1103/PhysRevB.66.224301.
- [68] R. L. HAMILTON and O. K. CROSSER, “THERMAL CONDUCTIVITY OF HETEROGENEOUS TWO-COMPONENT SYSTEMS” Ind. Eng. Chem. Fundamen. 1962, 1, 3, 187–191 Publication Date: August 1, 1962 doi.org/10.1021/i160003a005.

- [69] W. Yu and S. U. S. Choi, "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model," 2003.
- [70] D. A. G. Bruggemen, "Berechnzerrg verschCedcner physikalducher Eonstanten von heterogenew Yuhstan.xen 1. DieZeh%rizit&tskonstanten zcnd Leitfähigkeiten d e r MischkSrper a u s isotropen Substanzen."
- [71] J. Koo and C. Kleinstreuer, "A new thermal conductivity model for nanofluids," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 6, no. 6, pp. 577–588, Dec. 2004, doi: 10.1007/s11051-004-3170-5.
- [72] R. S. Vajjha and D. K. Das, "Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 52, no. 21–22, pp. 4675–4682, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.027.
- [73] A. Einstein and A. D. Cowper, "INVESTIGATIONS O N THE THEORY ,THE BROWNIAN MOVEMENT EDITED WITH BY TRANSLATED BY." *The American Mathematical Monthly* Vol. 35, No. 6 (Jun. - Jul., 1928), pp. 318-320 (3 pages) Published By: Taylor & Francis, Ltd.
- [74] H. C. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions," *J Chem Phys*, vol. 20, no. 4, p. 571, 1952, doi: 10.1063/1.1700493.
- [75] G. K. Batchelor, "Brownian diffusion of particles with hydrodynamic interaction," 1976.
- [76] M. Corcione, "Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids," in *Energy Conversion and Management*, 2011, vol. 52, no. 1, pp. 789–793. doi: 10.1016/j.enconman.2010.06.072.
- [77] S. Hussain, M. Jamal, C. Maatki, K. Ghachem, and L. Kolsi, "MHD mixed convection of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu/water hybrid nanofluid in a wavy channel with incorporated fixed cylinder," *J Therm Anal Calorim*, vol. 144, no. 6, pp. 2219–2233, Jun. 2021, doi: 10.1007/s10973-020-10260-6.
- [78] A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, G. Sheikhzadeh, and M. Abbaszadeh, "Numerical study of magnetic field on mixed convection and entropy generation of nanofluid in a trapezoidal enclosure," *J Magn Magn Mater*, vol. 403, pp. 133–145, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.jmmm.2015.11.067.

- [79] Bekhadra, S, Bellakhal, D, & Bekhadra, M. Convection naturelle dans une cavité carrée avec nano-fluide. ASJP/ ESSN 2773-3483, Vol01, N°27, pp34, 45.2023.
- [80] F. Redouane et al., “Influence of entropy on Brinkman–Forchheimer model of MHD hybrid nanofluid flowing in enclosure containing rotating cylinder and undulating porous stratum,” *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-03477-4.
- [81] Selimefendigil, F., & Chamkha, A. J. (2019). Magneto hydrodynamics mixed convection in a power law nanofluid-filled triangular cavity with an opening using Tiwari and Das’ nanofluid model. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(1), 419–436. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7037-x>
- [82] Alireza, A., Khorasanizadeh, H., Sheikhzadeh, G., & Abbaszadeh, M. (2016). Numerical study of magnetic field on mixed convection and entropy generation of nanofluid in a trapezoidal enclosure. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 403, 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.11.067>.
- [83] Ghasemi, B., Aminossadati, S. M., & Raisi, A. (2011). Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(9), 1748–1756. [doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.04.010](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.04.010).
- [84] Oliveski, R. D. C., Macagnan, M. H., & Copetti, J. B. (2009). Entropy generation and natural convection in rectangular cavities. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 29, Issues 8–9, pp. 141-1425). [doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.07.012](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.07.012)
- [85] Chamkha, A. J., & Abu-Nada, E. (2012). Mixed convection flow in single- and double-lid driven square cavities filled with water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid: Effect of viscosity models. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 36, 82–96. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2012.03.00> .
- [86] Kalteh, M., Abbassi, A., Saffar-Avval, M., Frijns, A., Darhuber, A., & Harting, J. (2012). Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 36(1), 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.023>.