

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA



**FACULTE DES SCIENCES**

**DEPARTEMENT : PHYSIQUE**

**N° : Ph/ENR/.../2025**

**DOMAINE : Sciences de la matière**

**FILIERE : Physique**

**OPTION : Physique Énergétique et  
Energies renouvelables**

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Réalisé Par :**

**LAIZ Chaima**

**CHETTA Lamia**

**Intitulé**

**Étude numérique du transfert de chaleur par  
convection naturelle dans des cylindres  
hexagonaux concentriques remplis d'un  
nanofluide**

**Soutenu le 10 / 06 /2025 devant le jury composé de :**

Djedid Taloub

BOURAS Abd elkrim

AMROUNE Amina

TAHROUR Farouk

Pr Université de M'sila

Pr Université de M'sila

Dr Université de M'sila

Dr Université de M'sila

Président

Rapporteur

Examineur

Examineur

**Année universitaire : 2024/2025**

## *Remerciements*

Nous remercions Dieu pour le courage et la volonté sans lesquels cette étude n'aurait jamais vu le jour. Nos vifs remerciements vont à nos très chers parents pour leurs efforts fournis et leurs conseils pendant toute ces années d'études.

D'abord nous tenons à exprimer toutes nos gratitude à notre encadreur **Dr. BOURAS Abd elkarim**

Pour son inestimable aide et sa disponibilité, sa gentillesse et ces conseils judicieux tout au long de ce travail, qui sans sa méthodologie, ses orientations et ses conseils précieux,

N'aurait pas été accompli.

Nos vifs remerciements vont également aux Membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos remerciements les plus vifs au **Pr. Djedid Taloub** pour avoir accepté de présider le jury, nous tenons à exprimer nos remerciements au, **Dr. TAHROUR Farouk, Dr. AMROUNE Amina.**

Et enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## ***Dédicaces***

***Je dédie ce travail :***

***A mon cher père et ma chère mère.***

***A mes chers frères et sœurs.***

***A toute ma famille.***

***À toutes mes amis(es).***

***A tous mes professeurs depuis mes premières années d'études.***

***A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.***

## Résumé

Une étude numérique de la convection naturelle laminaire à l'état stationnaire a été réalisée dans des cylindres hexagonaux concentriques, où le cylindre interne est chauffé et le cylindre extérieur maintenu froid. Cet espace est parcouru par un nanofluide Cu-eau, étudié pour différents nombres de Rayleigh et différentes fractions volumiques de nanoparticules. Le système d'équations gouvernant le problème a été résolu numériquement à l'aide du logiciel Fluent, basé sur la méthode des volumes finis, en s'appuyant sur l'approximation de Boussinesq. Les surfaces intérieure et extérieure sont maintenues à température constante. L'étude couvre des nombres de Rayleigh allant de  $10^3$  à  $3 \times 10^5$ . Nous avons analysé l'effet des nombres de Rayleigh et des fractions volumiques des nanoparticules sur la convection naturelle. Les résultats sont présentés sous forme d'isothermes, de lignes de courant et de nombres locaux et moyens de Nusselt. Le but de cette étude est de déterminer l'influence du nombre de Rayleigh thermique et de la fraction volumique des nanoparticules sur le taux de transfert de chaleur.

**Mots clés** : convection naturelle, nombres de Rayleigh, nano fluide, fraction volumique.

## Abstract

A numerical study of steady-state laminar natural convection was conducted in concentric hexagonal cylinders, where the inner cylinder is heated and the outer cylinder is maintained cold. The cavity is filled with a Cu-water nanofluid, analyzed for various Rayleigh numbers and different nanoparticle volume fractions. The governing equations were solved numerically using the Fluent software, based on the finite volume method, and employing the Boussinesq approximation. The inner and outer surfaces are maintained at constant temperatures. The study covers Rayleigh numbers ranging from  $10^3$  to  $3 \times 10^5$ . The effects of Rayleigh number and nanoparticle volume fraction on natural convection were investigated. Results are presented in terms of isotherms, streamlines, and local and average Nusselt numbers. The main objective of this study is to determine the influence of the thermal Rayleigh number and nanoparticle volume fraction on the heat transfer rate.

**Key words**: natural convection, Rayleigh numbers, Nano fluid, volume fraction.

## ملخص

تم اجراء دراسة عددية لعملية الحمل الحراري الطبيعي في حالة استقرار وانتظام في تجاويف اسطوانية سداسية متحدة المركز، حيث يتم تسخين الأسطوانة الداخلية بينما تبقى الأسطوانة الخارجية باردة. تم ملء التجويف بسائل نانوي من نوع نحاس ماء، وتمت دراسة تأثير اعداد رايلي المختلفة وكذلك نسب حجمية مختلفة للجسيمات النانوية. تم حل نظام المعادلات الحاكمة للمشكلة عدديا باستخدام برنامج فلوانت المستند الى طريقة الحجوم المنتهية، مع اعتماد تقريب بوسيناسك. كما تم الحفاظ على درجات حرارة ثابتة للأسطح الداخلية والخارجية. شملت الدراسة اعداد رايلي تم تحليل عدد رايلي والنسبة الحجمية للجسيمات النانوية على عملية الحمل الحراري الطبيعي. تم عرض النتائج على شكل خطوط تساوي درجة الحرارة، وخطوط التيار، وكذلك اعداد نوسلت المحلية والمتوسطة. الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو تحديد تأثير رايلي الحراري والنسبة الحجمية للجسيمات النانوية على معدل انتقال الحرارة.

**الكلمات المفتاحية**: الحمل الحراري الطبيعي، أعداد رايلي، السوائل النانوية، التركيز الحجمية.

## Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Table des Matières.....	i
Nomenclature.....	iv
Symbole grecs.....	v
Indice.....	vi
Nombre adimensionnel.....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	viii
<b>Introduction général</b>	
<b>Chapitre I : I.1. Synthèse bibliographique.....</b>	<b>1</b>
I.1 Introduction.....	1
I.2. Synthèse bibliographique.....	2
Références.....	7
<b>Chapitre II : Généralités sur le transfert de chaleur et les Nano fluides.....</b>	<b>10</b>
<b>II.1. Généralité sur le transfert de chaleur.....</b>	<b>10</b>
II.1.1 Introduction.....	10
II.1.2 Transfert de chaleur par conduction.....	10
II.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement.....	11
II.1.4 Transfert de chaleur par convection.....	11
II.1.4.1. La convection forcée.....	12
II.1.4.2. La convection naturelle.....	12

II.1.4.3.	
II.1.4.4. La convection mixte.....	13
<b>II.2. Généralité sur les Nano-fluides.....</b>	<b>14</b>
II.2.1. Introduction.....	14
II.2.2. Définition de nano-fluides.....	14
II.2.3. Préparation des nano fluides.....	15
II.2.4. Applications des nano fluides.....	16
II.2.5. Autres applications.....	17
II.2.6. Avantage des nano fluides.....	17
II.2.7. Inconvénients des nano fluides.....	17
II.2.8. Propriétés thermo physiques .....	18
Références.....	22
<b>Chapitre III : Formulation Mathématique et Numérique.....</b>	<b>25</b>
III.1. Mise en équation du problème.....	26
III.1.1. Modèles physique .....	26
III.1.2. Modèle mathématique.....	26
III.1.2.1. Equations générales .....	27
III.1.2.1.1. Equation de continuité .....	27
III.1.2.1.2. Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes).....	27
III.1.2.1.3. Equation de l'énergie .....	28
III.2. Propriétés thermo-physiques de nanofluide.....	29
III.3. Equations du problème .....	29
III.3.1. Equations de continuité .....	29
III.3.2. Equations de quantité de mouvement .....	29
III.3.3. Equations de l'énergie .....	30

III.4. Formulation adimensionnelle du problème .....	30
III.4.1. Forme adimensionnelle de l'équation de continuité .....	30
III.4.2. Forme adimensionnelle des équations de quantité de mouvement.....	30
III.4.3. Forme adimensionnelle de l'équation d'énergie.....	31
III.4.4. Conditions aux limites .....	3&
III.5. Les nombres sans dimension .....	32
III.5.1. Nombre de Reynolds .....	32
III.5.2. Nombre de Prandtl.....	32
III.5.3. Nombre de Grashof.....	33
III.5.4. Nombre de Rayleigh .....	33
III.5.5. Le nombre de Nusselt .....	33
III.6. Modèle Numérique.....	34
III.6.1. Procédure Numérique.....	34
III.6.2. Maillage.....	35
III.7. Présentation des logiciels Gambit et Fluent.....	37
III.7.1. GAMBIT.....	37
III.7.2. FLUENT.....	37
Références.....	39
<b>Chapitre IV : Résultats et Discussion.....</b>	<b>40</b>
IV.1. Introduction .....	40
IV.2. Choix du maillage.....	41
IV.3. Validation des résultats.....	41
IV.4. Influence du nombre de Rayleigh thermique.....	42
IV.5. Nombre de Nusselt .....	49
IV.5.1. Variation du nombre de Nusselt local sur la paroi de la cavité carrée extérieur.....	49

---

IV.5.2. Variation du nombre de Nusselt local sur la paroi du transformateur intérieur .....	51
IV.5.3. Nombre du Nusselt moyen.....	53
Conclusion générale.....	54

## Nomenclature

### Symboles Latins

$C_p$	La chaleur massique ( $J. Kg^{-1}. K^{-1}$ )
$C_{p f}$	La chaleur massique de fluide ( $J. Kg^{-1}. K^{-1}$ )
$C_{p p}$	La chaleur massique de fluide ( $J. Kg^{-1}. K^{-1}$ )
$C_{p_{nf}}$	La chaleur massique de nano fluide ( $J. Kg^{-1}. K^{-1}$ )
G	Accélération de la pesanteur ( $m. s^{-2}$ )
h	Le coefficient d'échange par convection ( $W. m^{-2}. K^{-1}$ )
K	La conductivité thermique ( $W. m^{-1}. K^{-1}$ )
$k_f$	La conductivité thermique du fluide de base ( $W. m^{-1}. K^{-1}$ )
$k_p$	La conductivité thermique des particules solides ( $W. m^{-1}. K^{-1}$ )
$k_{nf}$	La conductivité thermique de nano fluide ( $W. m^{-1}. K^{-1}$ )
L	Longueur de cavité (m)
n	Est un facteur de forme empirique
M	Emissance [ $W/m^2$ ].
m	La masse (Kg)
p	Pression du fluide (Pa)
p	Pression adimensionnelle
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur [ $m^2$ ].
T	La température (0 C) ou (K)
T <sub>c</sub>	La température de paroi chaude
T <sub>f</sub>	La température de paroi froide
$\frac{dT}{dx}$	Gradient de température.
$\frac{dE}{dt}$	La variation de l'énergie interne.
V <sub>p</sub>	Volume des particules solides [ $m^3$ ]
V <sub>T</sub>	Volume totale [ $m^3$ ]
$\vec{F}$	Les forces volumiques.

**Symbole grecs**

$\alpha$	La diffusivité thermique ( $m^2 s^{-1}$ ).
$\beta$	Coefficient d'expansion thermique ( $k^{-1}$ ).
$\beta_p$	Coefficient d'expansion thermique de nanoparticule ( $k^{-1}$ ).
$\beta_f$	Coefficient d'expansion thermique de fluide ( $k^{-1}$ ).
$\beta_{nf}$	Coefficient d'expansion thermique de nano fluide ( $k^{-1}$ ).
$\varphi$	La fraction volumique
$\mu$	La viscosité dynamique (N.s. $m^{-2}$ ).
$\mu_f$	La viscosité dynamique du fluide de base
$\mu_{nf}$	La viscosité dynamique du nano fluide.
$\rho_f$	Masse volumique du fluide
$\rho_p$	Masse volumique de la nanoparticule.
$\rho_{nf}$	Masse volumique du nano fluide.
$\Lambda$	Conductivité thermique du milieu ( $W. m^{-1} K^{-1}$ ).
$\Phi$	Flux de chaleur

---

**Indice**

$C$	Chaude
$f$	Froid
$f$	Fluide de base
$n_f$	Nano fluide.
$S$	Particules solide.

**Nombre adimensionnel**

$Pr$	Nombre de Prandtl
$Ra$	Nombre de Rayleigh
$Re$	Nombre de Reynolds
$Nu$	Nombre de Nusselt local sur la surface de la source de chaleur
$Nu_m$	Nombre de Nusselt moyen au le long de la partie chauffée

## Liste des figures

Fig. II.1: Schéma du phénomène de transfert de chaleur par convection.....	12
Fig. II. 2 : Principe physique de la convection naturelle .....	13
Fig. II .3 : Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre à 0,5 % ; eau + alumine ; eau + or à 2 nm.....	15
Fig. II .4 : Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape, Ribeiro et Grüss .....	16
Fig. III.1. Le domaine physique et informatique.....	26
Fig. III.2. Volume de contrôle bidimensionnel.....	35
Fig. III.3. Schéma du maillage.....	36
Fig. III.4. Le maillage utilisé.....	36
Fig. III.5. Evolution de résidu.....	37
Fig. IV.1. Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque $Rat=10^3$ .....	45
Fig. IV.2. Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque $Rat=10^4$ .....	46
Fig. IV.3. Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque $Rat=10^5$ .....	47
Fig.IV.4. Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque $Rat=3.10^5$ .....	49
Fig. IV. 5. Evolution du nombre de Nusselt local le long de la paroi de la cavité externe.....	51
Fig. IV. 6. Evolution du nombre de Nusselt local le long de la paroi interne.....	52
Fig. IV. 7. Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh Thermique.....	53

## Liste des tableaux

Tableau III.1 : propriétés thermo physiques des nanoparticules et les fluides caloporteurs.....	29
Tableau III.2 : Les caractéristiques thermo physiques des liquides (eau) et des nanoparticule(Cuivre)...	31
Tableau III.3: conditions aux limites hydrodynamique et thermiques sous forme adimensionnelles.....	32



*Introduction générale*

# *Introduction générale*

L'amélioration du transfert thermique représente un enjeu majeur dans la conception des systèmes thermiques modernes, en particulier dans les applications à haut densité thermique telles que les transformateurs électriques, les échangeurs de chaleur et les composants électroniques. La conductivité thermique des fluides caloporteurs joue un rôle déterminant dans l'efficacité de ces systèmes. Cependant, les fluides conventionnels comme l'eau ou les huiles minérales présentent une faible conductivité thermique, limitant ainsi leurs performances dans des conditions extrêmes.

Pour surmonter ces limitations, les nanofluides sont apparus comme une solution prometteuse. Ces fluides sont obtenus par la dispersion de nanoparticules solides à haute conductivité thermique (comme le cuivre (Cu), l'alumine ( $Al_2O_3$ ) ou le dioxyde de titane ( $TiO_2$ )) dans un fluide de base. De nombreuses recherches ont montré que l'ajout de telles nanoparticules permet non seulement d'augmenter la conductivité thermique effective du fluide, mais aussi d'améliorer significativement le transfert de chaleur par convection naturelle.

L'évaluation de l'efficacité thermique de ces nanofluides s'appuie sur des grandeurs adimensionnelles telles que :

Le nombre de Rayleigh (Ra), qui exprime le rapport entre les forces de flottabilité et les forces visqueuses dans un fluide soumis à un gradient de température.

Le nombre de Nusselt (Nu), qui mesure l'amélioration du transfert de chaleur par convection par rapport à celui obtenu par conduction seule.

Ce travail de recherche a pour objectif principal d'étudier, de manière numérique, le comportement thermique d'un système fermé contenant un nanofluide soumis à une convection naturelle. L'étude porte notamment sur l'influence de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Rayleigh, sur les distributions de température, les lignes de courant et les nombres de Nusselt.

## Introduction générale

Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

**Chapitre 1** : Une revue générale et bibliographique des principaux travaux théoriques, expérimentaux et numériques sur le refroidissement des transformateurs à l'aide de différents nanofluides.

**Chapitre 2** : Généralités sur les mécanismes de transfert de chaleur et les propriétés des nanofluides.

**Chapitre 3** : Formulation numérique, choix du modèle physique et description du maillage utilisé pour la simulation.

**Chapitre 4** : Présentation, analyse et validation des principaux résultats numériques obtenus à partir des simulations.

Enfin, une conclusion générale viendra récapituler les points essentiels et les résultats finaux de notre étude.

# Chapitre I

## *Synthèse Bibliographiques*

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

La convection est une méthode de transfert de chaleur dans les liquides et les gaz en raison du mouvement des particules, où la partie chaude s'élève en raison de sa faible densité, qui est remplacée par la partie la plus froide, et elle a trois types de force, mixte et naturel qui font l'objet de notre étude dans les cylindres hexagonaux contenant du nano fluide. C'est un liquide contenant des nanoparticules d'un volume de 1 à 100 nm en suspension dans des liquides essentiels tels que l'eau et l'huile, ce qui améliore la conductivité thermique et le taux de transfert de chaleur est utilisé dans le refroidissement, les systèmes d'énergie solaire, les moteurs, en raison de ses propriétés uniques dans l'amélioration de l'efficacité des systèmes libres.

Dans cette revue bibliographique on citera des travaux se rapportant aux cas des cavités pour diverses configurations et pour différentes conditions aux limites set remplies de divers fluides.

## I.2.Synthèse bibliographique

L'étude de la convection naturelle dans des cavités fermées a fait l'objet de nombreuses recherches, tant théoriques qu'expérimentales. De nombreuses publications ont exploré ce phénomène dans des enceintes annulaires de différentes formes, telles que carrée, rectangulaire, triangulaire, cylindrique, elliptique et sphérique. Ces travaux ont trouvé des applications variées, notamment dans l'isolation thermique, les échangeurs de chaleur, le refroidissement des systèmes électroniques et des machines électriques, ainsi que dans des domaines comme la géophysique et les réacteurs nucléaires. Par exemple, DABKA Siham et Smahane [1] Ils ont étudié la convection naturelle à l'intérieur d'une cavité située entre deux cylindres : le premier est un cylindre interne carré chauffé, et le second est un cylindre elliptique refroidi, en utilisant un nano fluide pour différents nombres de Rayleigh. Les résultats ont indiqué une amélioration significative du transfert de chaleur en raison de l'ajout de nanoparticules dans le fluide de base. Le travail de Mohamed Chaour [2] et de ses collègues consistait en une étude numérique de la convection thermique mixte des nano fluides dans un canal horizontal rempli de fluide nanoscopique (cuivre avec de l'eau / oxyde d'aluminium avec de l'eau) avec une fraction volumique des nanoparticules. Les résultats ont montré que le nano fluide contenant du cuivre est un meilleur conducteur thermique que celui contenant de l'oxyde d'aluminium, et que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules entraîne une augmentation du taux de transfert de chaleur .LATTOUI Kheir eddine [3] Ils réalisé le transfert de chaleur par convection naturelle dans un réservoir fermé entre un transformateur interne chaud et un réservoir externe froid, en utilisant un fluide contenant des particules nanométriques d'ester et de titanate de baryum, pour différents nombres de Rayleigh. Ils ont conclu que l'augmentation du nombre de Rayleigh améliore le flux de convection thermique et que les particules nanométriques améliorent le transfert de chaleur. Mustafa Salah Rahomey. [4] a mené une étude numérique sur l'écoulement de fluide et le transfert de chaleur par convection naturelle, induits par la différence de température entre un cylindre interne chauffé avec divers dispositifs de balayage (tels que circulaire, triangulaire, ovale, rectangulaire et rhombique), et un récipient extérieur carré froid, rempli de couches superposées de fluides nanométriques poreux. Cette étude concerne les liquides à l'échelle nanométrique. Ammar Abdulkadhim [5] a étudié le transfert de chaleur par convection naturelle entre un cylindre circulaire chauffé placé à l'intérieur d'un récipient ovale refroidi, rempli d'un nano-fluide composé de cuivre et d'eau, avec génération et absorption de chaleur interne sous l'influence d'un champ magnétique horizontal. Les équations de décision sont résolues numériquement sans dimensions en utilisant la méthode des éléments finis. Atheer Raheem

Alguboori [6] a mené une étude numérique sur le transfert de chaleur par convection naturelle dans une coque annulaire inclinée, remplie de nanofluide hybride  $Al_2O_3$ /aqueux. La surface externe ovale, froide, du réservoir est maintenue à une température constante  $T_C$ , tandis que la paroi interne du cylindre circulaire est chauffée à une température constante  $T_H$ . M. Mushtaq I. Hasan [7] et ses collègues ont utilisé des nano fluides à base d'huile de transformateur pour le refroidissement des transformateurs au lieu de l'huile traditionnelle. Quatre types de particules solides (Cu,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  et SiC) ont été utilisés pour composer ces nano fluides. Les résultats ont montré que l'utilisation de nano fluides améliore l'efficacité du refroidissement du transformateur en réduisant sa température. M. Rafait [8] et ses collègues ont utilisé des nano fluides pour le refroidissement des puces électroniques. Le fluide de base était un mélange d'eau ionisée, avec trois nanoparticules : la silice, l'alumine et le titane. Les résultats ont montré une amélioration du transfert de chaleur lors du refroidissement de la micropuce., Behrouz Takabi, Saeed Salehi [9] Cette étude examine l'effet des nano fluides hybrides  $Al_2O_3$ -Cu/eau sur le transfert de chaleur dans une enceinte ondulée. Les résultats montrent que ces nano fluides hybrides améliorent le transfert de chaleur et offrent un meilleur refroidissement par rapport aux nano fluides et à l'eau. De plus, l'ajout de nanoparticules améliore la performance thermique, mais les modèles traditionnels pour prédire la conductivité et la viscosité sont inexacts à des concentrations plus élevées, Suhail Ahmad Khan et al [10] L'étude a examiné l'impact des nanoparticules sur les propriétés thermo physiques des huiles d'esters naturels (NE) et synthétiques (SE) en fonction de la température. Des concentrations variées d'oxyde de graphène (GO) et de nanoparticules de  $TiO_2$  ont été utilisées pour améliorer ces propriétés. Les résultats ont montré que les nanoparticules amélioraient la conductivité thermique et réduisaient la viscosité des huiles à mesure que la température augmentait, Muzaffar Hussain et al [11]. Ils ont réalisé une série d'études de recherche portant sur la préparation et la synthèse de divers types de nanomatériaux. Les performances des nano fluides, telles que la tension de claquage électrique, le test d'impulsion, ainsi que leur comportement diélectrique et thermique, ont également été discutées en détail, F. Maboo, d · T. A. Yusuf. A. Khan [12] Le document présente une étude numérique sur l'écoulement de nano fluides hybrides sur des surfaces étendues et courbes, ainsi que l'impact d'un champ magnétique sur la convection naturelle. Les résultats montrent une concordance avec les études précédentes et révèlent l'effet du champ magnétique sur le transfert de chaleur. Ces résultats peuvent être appliqués dans le domaine de la nanotechnologie et des nanostructures. BOUDAUD Warda [13] Les résultats montrent que les nano fluides améliorent le transfert de chaleur par rapport aux fluides conventionnels grâce à la Présence de nanoparticules dans les fluides.

L'augmentation de la concentration en nanoparticules améliore le transfert thermique par convection, mais entraîne une légère augmentation des pertes de pression.

De plus, le transfert de chaleur augmente avec l'élévation du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique les parois ondulées n'affectent pas l'efficacité du transfert de chaleur, ce qui se reflète également par leur absence d'impact sur la génération d'entropie, car les forces de flottabilité sont principalement influencées par la gravité. Ainsi, la génération de chaleur et d'entropie se concentre le long des parois latérales dans tous les cas étudiés. C. Méndez et al [14] Ils ont étudié et comparé l'impact des nanoparticules de maghémite et de titane sur les performances électriques et thermiques d'un ester naturel commercial utilisé dans les transformateurs électriques. Les résultats ont montré que seuls les nano fluides à base de maghémite ont montré une amélioration des propriétés de transfert de chaleur par rapport à l'huile d'ester naturel, Daya Ch. Shill et al [15]. Les nano fluides ont été préparés en utilisant des nanoparticules de SiO<sub>2</sub>. Après avoir comparé les résultats avec l'huile de base, il a été constaté qu'avec l'augmentation de la concentration en nanoparticules dans l'huile, la conductivité thermique des nano fluides augmente. Une augmentation de la résistance diélectrique de l'échantillon de nano fluide a également été observée, Georgio D. Papas et al [16] Ils ont développé des nano fluides composés d'huile d'ester naturel colloïdale ment stable avec des nanocristaux d'oxyde de fer, et les ont comparés à un système similaire contenant des nanoparticules d'oxyde de fer commercial, qui ont montré un important dépôt. Les techniques d'analyse ont confirmé la haute fiabilité des performances des nano fluides développés.

Zbigniew Nadolny et ses collègues [17] ont étudié l'effet des nanoparticules C<sub>60</sub> et TiO<sub>2</sub> sur les propriétés thermiques de l'ester synthétique. Leurs résultats ont montré que le fullerène C<sub>60</sub> n'affecte pas de manière significative le coefficient de transfert de chaleur  $\alpha$  de l'ester, tandis que le dioxyde de titane TiO<sub>2</sub> a un effet positif modéré, entraînant une augmentation de la valeur du coefficient d'environ 1 à 3 %. A. Santisteban et al [18] Leur travail présente les résultats obtenus par une recherche dans laquelle différents nan fluides, produits à travers des huiles diélectriques commerciales (minérales et naturelles), des nanoparticules d'oxyde de titane et de magnétite, ont été caractérisées thermiquement. Les résultats de cette caractérisation ont été utilisés pour effectuer des simulations basées sur la dynamique des fluides computationnelle. Cette comparaison a permis d'observer les pertes de charge et Bouras et al [19] a étudié l'effet de l'ajout de nanoparticules aux fluides isolants électriques sur les propriétés thermiques des nano fluides résultants et l'amélioration du transfert de chaleur pour le refroidissement des transformateurs électriques de haute puissance.

Dans ce cas, le fluide de base était l'ester synthétique. Les résultats montrent qu'une augmentation de la taille des particules solides de 10 % améliore l'efficacité du fluide utilisé en tant que conducteur thermique, ce qui augmente le taux de transfert de chaleur d'environ 10 % par rapport au fluide de base à débits massiques dans les canaux internes des enroulements d'un transformateur de puissance réel. Taloub et al [20] ont mené une étude numérique sur la convection naturelle double diffusion à l'intérieur d'une région annulaire, située entre deux solides elliptiques confocaux horizontaux et remplie d'un fluide newtonien. Ils ont observé que la distribution de la température et de la concentration varie considérablement en fonction des nombres de Rayleigh. Pour  $Le = 2$ , le transfert massique est plus important que le transfert thermique. De plus, l'augmentation du nombre de Rayleigh thermique entraîne une augmentation des valeurs moyennes des nombres de Nusselt et de Sherwood. ZIDE et ses collègues [21] ont mené une étude numérique sur l'amélioration du refroidissement d'un microprocesseur en utilisant des nano fluides. La convection naturelle a été analysée dans une enceinte fermée contenant une source de chaleur à sa frontière inférieure, chargée de nanoparticules de cuivre mélangées à de l'éthylène glycol. Les résultats ont montré qu'une augmentation du nombre de Rayleigh thermique et de la fraction volumique solide améliore la performance thermique de l'enceinte. Il a également été constaté que l'effet des dimensions de l'enceinte sur le taux de transfert de chaleur varie selon les valeurs faibles et élevées du nombre de Rayleigh thermique. ZIDE et ses collègues [21] ont mené une étude numérique sur l'amélioration du refroidissement d'un microprocesseur en utilisant des nano fluides. La convection naturelle a été analysée dans une enceinte fermée contenant une source de chaleur à sa frontière inférieure, chargée de nanoparticules de cuivre mélangées à de l'éthylène glycol. Les résultats ont montré qu'une augmentation du nombre de Rayleigh thermique et de la fraction volumique solide améliore la performance thermique de l'enceinte. Il a également été constaté que l'effet des dimensions de l'enceinte sur le taux de transfert de chaleur varie selon les valeurs faibles et élevées du nombre de Rayleigh thermique. Amina et al [22]. Ont mené une étude numérique sur la convection naturelle et le transfert de chaleur laminaire stationnaire à l'intérieur d'une cavité rectangulaire fermée contenant une source locale de génération de chaleur volumétrique interne, pour différents nombres de Rayleigh et différentes fractions volumiques de nanoparticules. Leurs résultats ont montré que : L'augmentation de la fraction volumique solide des nanoparticules améliore le transfert de chaleur. L'augmentation du nombre de Rayleigh entraîne une augmentation significative du taux de transfert de chaleur. L'effet de la fraction volumique devient plus prononcé lorsque le nombre de Rayleigh est élevé. CHAMKHA et al [23]. Ont effectué une analyse numérique pour améliorer le processus de refroidissement d'un transformateur

électrique haute tension en utilisant des nano fluides. Un réservoir contenant une source de chaleur à l'intérieur et rempli d'huile minérale mélangée à des nanoparticules de titanate de baryum a été utilisé pour étudier la convection naturelle. Les résultats ont montré que le processus de refroidissement varie en fonction des niveaux bas et élevés du nombre de Rayleigh thermique et dépend également de la fraction volumique des nanoparticules utilisées. B.S. Kim. [24], Il a effectué des calculs numériques pour la charge normale induite par la différence de température entre un cylindre carré extérieur froid et un cylindre carré intérieur chaud. Une solution bidimensionnelle a été obtenue pour une charge normale instable, en utilisant la méthode des limites submergée. Mahmoud Sabour, [25], Il a étudié le test de température locale déséquilibrée pour la charge normale et le transfert de masse de nano fluide dans un récipient triangulaire rempli de milieu poreux. L'effet de la présence de nanoparticules et de l'interaction thermique entre les phases sur l'écoulement, la distribution de température des phases, la distribution de concentration des nanoparticules a été étudié, KLALECHE et al. [26], Il a effectué une simulation numérique du transfert de chaleur par convection forcé entre deux disques coaxiaux dont le disque inférieur est soumis à un flux de chaleur, pendant l'écoulement laminaire de deux liquides conventionnels séparés (eau et Athleen glycol). Par la suite, ces deux fluides ont été utilisés comme fluides de base pour deux liquides à l'échelle nanométrique, par des fractions volumétriques (0 à 10%), la température d'entrée est constante dans toutes les simulations ( $T = 293,2K$ ). L'objectif principal du travail est de définir preuve de l'effet des nano fluides sur les performances thermiques en convection forcée.

**Référence :**

- [1] DEBKA Siham et DEBKA Esmahane "Étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle des nano fluides dans un espace annulaire, situé entre deux cylindres un cylindre extérieur elliptique et un cylindre intérieur carrée." Université de M'sila, 2020.
- [2] Mohamed Chaour, Sofiane Boulkroune et Achour Toufik et Billel Hamadi "Étude numérique du transfert de chaleur des nanofluides dans un canal plan application au panneau solaire thermique", University of Brothers Mentouri, 2023.
- [3] LATTOUI Kheir eddine et REFICE Abdelghafar "Etude numérique de la convection naturelle avec nano-fluides, entre un transformateur à l'intérieur et un réservoir fermé à l'extérieur", 2023
- [4] Mustafa Salah Rahomey, "Comparison of Natural Convection around a Circular Cylinder with Different Geometries of Cylinders inside a Square Enclosure Filled with AgNano fluid Superposed Porous-Nano fluid Layers", University of Babylon December Journal of Heat Transfer 141, (2018)
- [5] Ammar Abdulkadhim, "On Simulation of the Natural Convection Heat Transfer Between Circular Cylinder and an Elliptical Enclosure Filled with Nano fluid [Part I: The Effect of MHD and Internal Heat Generation/Absorption] " Techniques Engineering Department, Al-Mustaqbal University College, Babylon 51001, IraqCorresponding, pp.060416 ,21 November 2019.
- [6] Atheer Raheem Alguboori, "Natural Convection Heat Transfer in An Inclined Elliptic Enclosure with Circular Heat Source ", Journal of Mechanical Engineering Research and Developments vol.43(6), pp 207-222 .2020.
- [7] Hasan, Mushtaq Ismael. "Using the transformer oil-based nanofluid for cooling of power distribution transformer." International Journal of Energy and Environment 8, no. 3 (2017): 229-238.
- [8] Rafati, M., A. A. Hamidi, and M. Shariati Niaser. "Application of nanofluids in computer cooling systems (heat transfer performance of nanofluids)." Applied Thermal Engineering 45 (2012): 9-14

- [9] Behrouz Takabi, Saeed Salehi. Augmentation of the Heat Transfer Performance of a Sinusoidal Corrugated Enclosure by Employing Hybrid Nanofluid; *Advances in Mechanical Engineering*; Volume 2014, Article ID 147059, 16 pages
- [10] Khan, Suhaib Ahmad, Mohd Tariq, Asfar Ali Khan, Basem Alamri, and Lucian Mihet-Popa. "Assessment of thermophysical performance of ester-based nanofluids for enhanced insulation cooling in transformers." *Electronics* 11, no. 3 (2022): 376.
- [11] Hussain, Muzafar, Feroz A. Mir, and M. A. Ansari. "Nanofluid transformer oil for cooling and insulating applications: A brief review." *Applied Surface Science Advances* 8 (2022): 100223
- [12] F. Maboo, d · T. A. Yusuf. A. Khan; Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O hybrid nanofluid flow with melting heat transfer, irreversibility analysis and nonlinear thermal radiation; Vol.:(0123456789)1 *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*
- [13] Boudaoud Warda. Simulation numérique de la convection naturelle dans des cavités remplies des nanofluides. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf, 2019.
- [14] Méndez, C., I. Fernández, A. Ortiz, F. Ortiz, C. Olmo, A. Santisteban, F. Delgado, and C. J. Renedo. "Effect of Magnetic and Non-Magnetic Nanoparticles on Insulation and Cooling Behaviour of a Natural Ester for Power Transformers." In 2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), pp. 111-114. IEEE, 2020.
- [15] Shill, Dayal Ch, Anu Kumar Das, and Saibal Chatterjee. "Insulation and cooling performance of transformer oil based nanofluid." In 2020 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE), pp. 1-4. IEEE, 2020
- [16] Peppas, Georgios D., Aristides Bakandritsos, Vasilis P. Charalampakos, Eleftheria C. Pyrgioti, Jiri Tucek, Radek Zboril, and Ioannis F. Gonos. "Ultra stable natural ester-based nanofluids for high voltage insulation applications." *ACS applied materials & interfaces* 8, no. 38 (2016): 25202-25209.
- [17] Nadolny, Zbigniew, and Grzegorz Dombek. "Electro-insulating nanofluids based on synthetic ester and TiO<sub>2</sub> or C<sub>60</sub> nanoparticles in power transformer." *Energies* 11, no. 8 (2018): 1953

- [18] Santisteban, A., A. Ortiz, F. Delgado, C. Fernández, and J. Sanz. "Hydraulic assessment of nanofluids based on mineral oil and natural ester in windings of power transformers." In International Conference on Renewable Energies and Power Quality, no. 16, pp. 38-41. 2018
- [19] Abdelkrim Bouras, Djedid Taloub, Amina Amroune, Kheireddin Lattoui et Zied Drissd "Enhancing heat onnanoparticle-doped insulating fluids", University Mohamed Boudiaf of M'sila,2024
- [20] Djedid Taloub, Mahfoud Djezzar, Abdelkarim Bouras et Zied Driss "Numerical research of double-diffusive natural convection in elliptical cylinders: Effect of thermal Rayleigh number" University Mohamed Boudiaf of M'sila, 2020.
- [21] ZIED DRISS et TALOUB DJEDID et BOURAS ABDELKARIM "Numerical study on the improvement of the cooling of a microprocessor by the use of nanofluids" University Mohamed Boudiaf of M'sila, 2022.
- [22] AMINA AMROUNE et TALOUB DJEDID et BOURAS ABDELKARIM et ZIED DRISS "The Impact of Nanofluid on Natural Convection in an Isosceles Rectangular Container with a Heat Source", University Mohamed Boudiaf of M'sila, 2022
- [23] Ali J. CHAMKHA, Zied DRISS, TALOUB DJEDID et BOURAS ABDELKARIM. "evaluation of thermal conductivity using nanofluids to improve the cooling of high voltage tranfermers ", 2024
- [24] B.S.Kim" A numerical study of natural convection in a square enclosure with a circular cylinder at different vertical locations «International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 51, April (2008).
- [25] Mahmoud Sabour,"Natural convection in a triangular cavity filled with a Nano fluid saturated porous medium using three heat equation model ", Canadian Journal of Physics, pp-2016-0053.
- [26] KLALECHE Sofiane MADJOUR Abderrahmane, "Simulation Numérique De La Convection Forcée Entre Deux Disques En Présence D'un Nano fluide", UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, (2015).

# Chapitre

## II

## *Généralités sur le transfert de chaleur et les Nanofluides*

### **II.1. Généralités sur le transfert de chaleur**

#### **II.1.1 Introduction**

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échangé thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes [1]. Le transfert de chaleur entre deux corps est défini comme le processus de transfert d'énergie résultant d'une différence de température entre eux. On peut classer le transfert de chaleur en trois modes principaux : la conduction, la convection et le rayonnement, chacun étant régi par des lois physiques spécifiques qui seront abordées ultérieurement.

#### **II.1.2. Transfert de chaleur par conduction**

La conduction thermique est définie comme le processus de transfert de chaleur entre des corps en contact direct. Ce mode de transfert est principalement étudié dans les solides, car la conductivité thermique des liquides et des gaz est relativement faible. Dans les solides homogènes, opaques et compacts, la conduction est le seul mécanisme de transfert de chaleur.

Le transfert de chaleur par conduction se produit de manière progressive et continue :

- Lorsqu'une extrémité d'un solide est chauffée, la chaleur se propage progressivement à travers le matériau.
- Si le solide est coupé, le transfert de chaleur est interrompu.

Ce mode de transfert thermique obéit à la loi de Fourier [2].

$$dQ = -\lambda S \frac{dT}{dx} dt \quad \text{II.1}$$

$dQ$  : La chaleur transmise par conduction(W).

$\lambda$ : Conductivité thermique ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  )

$S$ : Surface de la section de passage de flux de chaleur( $\text{m}^2$  )

$\frac{dT}{dx}$ : Gradient de température en x (K/m)

Le flux de chaleur  $\Phi$  en Watt qui circule en x :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad \text{II.2}$$

### II.1.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement thermique est un mode de transfert de chaleur où l'énergie se propage d'un corps chaud vers un autre plus froid sans nécessiter de support matériel, ce qui en fait le seul mode de transfert possible dans le vide. Il se distingue des autres ondes électromagnétiques par son origine, qui est la température : tout corps émet un rayonnement tant que sa température est supérieure au zéro absolu. Plus la température est élevée, plus le rayonnement émis est important. Lorsqu'un corps est exposé à un rayonnement thermique, il en absorbe une partie, qui est convertie en chaleur. Ce transfert obéit à la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\Phi = \sigma T^4 S \quad \text{II.3}$$

Sachant que :

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  est la constante de Stefan-Boltzmann [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ]

$T$  : température absolue [K]

$S$  : surface [ $\text{m}^2$ ]

### II.1.4 Transfert de chaleur par convection

C'est, de façon générale, un transfert de chaleur entre deux phases de nature différente. Elle intervient, par exemple, à la surface de séparation entre un solide et un fluide (liquide ou gaz), ou aussi bien, à la surface libre entre un liquide et un gaz.

Le transfert de chaleur s'effectue en 2 phases :

**1<sup>ère</sup> phase** : la chaleur est échangée par conduction entre la surface solide et une mince couche de fluide (appelée "film"), au voisinage de la surface.

**2<sup>ème</sup> phase** : le fluide du film est déplacé dans la masse du fluide ; ce déplacement du fluide est, soit naturel (variation de la masse volumique du film chauffé ou refroidi, par rapport celle du fluide en masse), soit artificiel (action d'une pompe, d'un agitateur). On parle alors soit de convection naturelle, soit de convection forcée.

Donc, le transfert de chaleur par convection est provoqué par le déplacement d'un fluide, qui transporte avec lui l'énergie qu'il contient.

Quel que soit le type de convection (libre ou forcée ou mixte) et quel que soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur transmis est donné par la relation dite loi de Newton [3] :

$$\Phi = h \cdot S \cdot \Delta T \quad \text{II.4}$$

Avec :  $\Delta T = (T_f - T_p)$

$T_f$  : représente la température du film laminaire de l'écoulement.

$T_p$  : est la température de la paroi du milieu considéré.

$h$  : le coefficient d'échange convectif [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

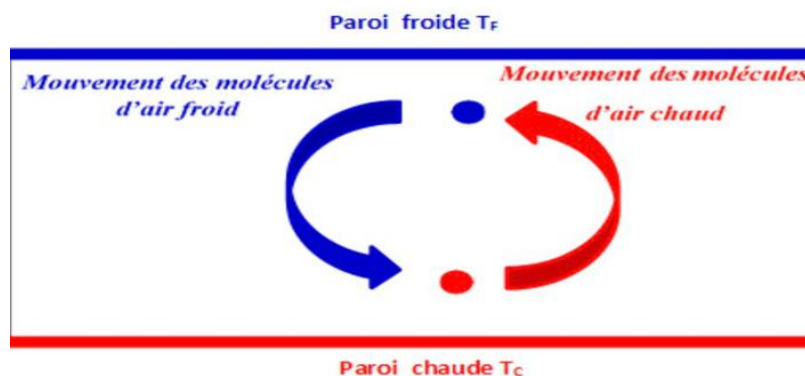


Figure II.1 : Schéma du phénomène de transfert de chaleur par convection.

#### II .1.4.1. Convection forcée

La convection forcée est une situation où un fluide est mis en mouvement par une action mécanique indépendante des processus thermiques. Dans ce cas, c'est la variation de la pression externe qui entraîne le déplacement des particules du fluide. Ainsi, l'étude du transfert de chaleur par convection est étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides. On parle de convection forcée lorsqu'un facteur autre que les variations de température du

fluide sont responsable de son mouvement, ce facteur étant le seul à considérer en raison de son importance relative.

#### II.1.4.2. La convection naturelle

La convection naturelle apparaît spontanément. Elle se produit dans un fluide au sein duquel existe un gradient de température. C'est le cas, dans une pièce où l'air chaud produit au

niveau du sol par un convecteur ou un radiateur va monter au plafond tandis que l'air froid va descendre. Le mouvement est dû au fait que l'air chaud est moins dense que l'air froid et monte donc sous l'effet d'une force dite poussée d'Archimède, comme indiqué sur la figure (II.02) [4].

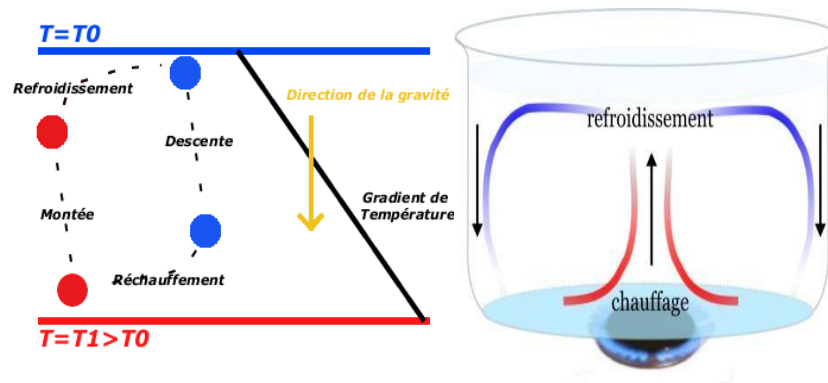


Figure II.2 : Principe physique de la convection naturelle [5]

#### II.1.4.3. La convection mixte

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (Convection naturelle et convection forcée) Les deux convections sont considérées séparément, et l'ordre de grandeur est le même [6]. Ce Le transfert de chaleur par convection mixte et l'écoulement de fluide dans la cavité sont Sujets d'enquête importants car ils affectent de nombreuses applications Ingénierie et phénomènes naturels, tels que l'énergie thermique, l'industrie Pétrochimie, aérospatiale, construction et capteurs solaires, etc. [3]. Le problème de la convection mixte est caractérisé par trois paramètres de non-surveillance Dimension, à savoir nombre de Reynolds  $Re$ , nombre de Graschhof, grand nombre Usine [5].

#### II.4.4.4. La convection dans les enceintes

Le phénomène de la convection naturelle des nanofluides dans une enceinte est largement utilisé dans l'ingénierie, comme le collecteur d'énergie solaire, la conservation de la chaleur des circuits de transport thermique, le refroidissement des unités électriques, etc [7].

## II.2. Généralités sur les Nano-fluides

### II.2.1. Introduction

Ces dernières années, plusieurs systèmes énergétiques ont été développés dans le domaine industriel produisant un flux thermique très élevé. Là où les liquides de refroidissement conventionnels (eau, éthylène glycol et huile) ne sont pas efficaces. L'idée d'améliorer les propriétés thermo physiques des fluides est d'introduire dans le fluide de base des particules solides de très bonnes caractéristiques thermiques et de taille nanométrique. Cette nouvelle génération de fluide est appelée (Nano fluide) ce terme a été introduit par Choi [8] au laboratoire Argonne aux États-Unis d'Amérique 1995 et est encore couramment utilisé pour caractériser ce type de suspension colloïdale.

### II.2.2. Définition de nano-fluides

Les nanofluides sont des fluides contenant des nanoparticules (généralement de taille comprise entre 1 et 100 nanomètres) dispersées dans un fluide de base tel que l'eau ou l'huile.

Ces nanoparticules peuvent être constituées de métaux ou d'oxydes métalliques.

Les études de ces fluides composites montrent des aptitudes particulièrement intéressantes du fait d'une meilleure conductivité thermique et d'un coefficient d'échange convectif significativement accru par rapport à des liquides classiques, l'eau en particulier. Une telle augmentation de la conductivité thermique du nano fluide ne peut pas seulement être imputée à la plus grande conductivité thermique des nanoparticules en suspension, l'amélioration vient d'une combinaison de plusieurs facteurs physiques simultanés. Le choix des liquides de base est primordial pour un nano fluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégaions, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule, les solvants les plus utilisés [5] sont :

- l'eau.
- l'éthylène glycol, EG.
- les huiles.
- le Toluène

La liste des nanoparticules utilisées pour obtenir des nanofluides est très large, on peut citer parmi eux [9] :

- Les nanoparticules des oxydes métalliques : l'oxyde d'aluminium,  $Al_2O_3$ , l'oxyde de cuivre,  $CuO$ , l'oxyde de silicium,  $SiO_2$ , l'oxyde de titane,  $TiO_2$ , Titanate de baryum  $BaTiO_3$ .
- Les nanoparticules métalliques : L'aluminium, Al, Le cuivre, Cu, l'argent, Ag, l'or, Au, la silicone, Si.

- Les nanoparticules non métalliques : les nanotubes de carbone, CNT, Le diamant, C.

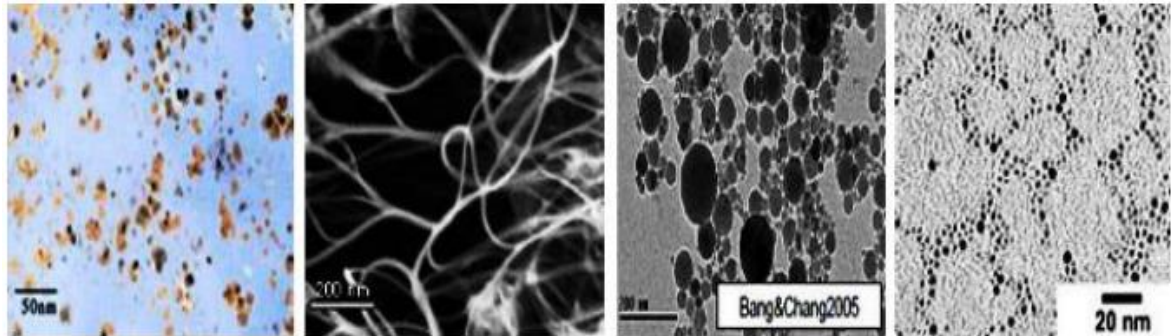


Figure II.3 : Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre à 0,5 % ; eau +Alumine ; eau + or à 2 nm, Bang et Chang.

### II.2.3 Préparation des nano fluides

Les procédés de fabrication des nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories :

Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.

Les procédés chimiques, comme la pyrolyse laser ou la précipitation chimique.

Il existe deux méthodes principales pour produire des nanofluides :

La méthode a une seule étape (one-step method) [10] : consiste à la dispersion des nanoparticules directement dans un fluide de base (synthèse direct dans un fluide de base) et de prévenir l'oxydation des particules de métal pur.

La méthode a deux étapes (two-step method) [11] : la première étape consiste à fabriquer les nanoparticules, et dans la seconde étape les nanoparticules sont disperser dans un fluide de base.

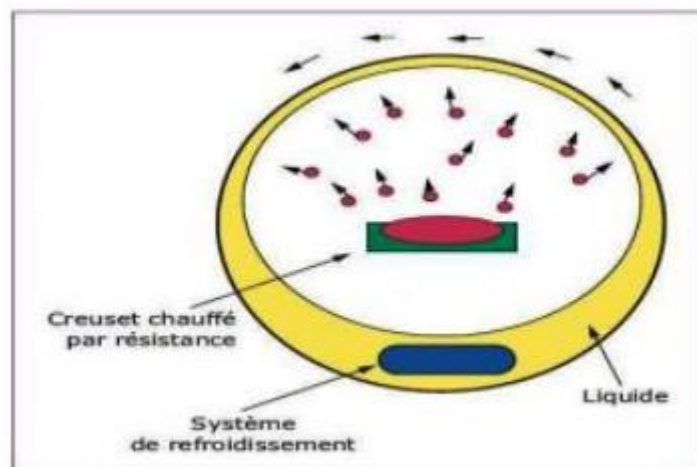


Figure II.4 : Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape, Ribeiro et Grüss

### II.2.4. Applications des nano fluides

Les nano-fluides peuvent être employés pour améliorer le transfert de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques. Dans cette section, quelques exemples d'applications seront présentés tel que le transport, la micro-électronique, la défense, le nucléaire, l'espace et la biomédicale.

- **Refroidissement des systèmes thermiques :**

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides ce dernier améliore le taux de refroidissement. Ce point est étudié par plusieurs groupes de recherches, Tzeng et al [12] ont dispersé les nanoparticules de CuO et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans l'huile de refroidissement du moteur de transmission. Dans une autre application, Zhang et Que [13] ont reporté une autre étude pour réduire l'usure (lubrification) à l'aide des nanoparticules, et améliorer les propriétés tribologiques, et la résistance de l'usure avec la réduction de frottement entre les éléments mécaniques mobiles.

- **Refroidissement des systèmes électroniques :**

Dans les circuits intégrés, les nano-fluides ont été considérés comme fluides de refroidissement pour cela plusieurs études ont été effectuées. Tsai et al [14] ont employé un nano-fluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un ordinateur.

- **Refroidissement des systèmes militaires :**

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermiques très élevés ( $q > 500$  à  $1000$  W/cm<sup>2</sup>) où les nano-fluides ont montré leur efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaires y compris les véhicules militaires, les sous-marins et les diodes lasers à haut puissance. Refroidissement des systèmes spatiaux : Pour les applications dans l'espace. You et al [15] et Vassallo et al [16] ont effectué des études pour montrer que la présence des nanoparticules dans le fluide de refroidissement en électronique générale joue un rôle très important dans les applications de l'espace où la densité de puissance est très élevée.

Refroidissement des systèmes nucléaires :

L'institut de technologie de Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour la nouvelle nanotechnologie (nano-fluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire.

Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nano-fluides sur la sûreté neutronique de la performance économique des systèmes nucléaires.

- **La biomédecine :**

Les nano-fluides et les nanoparticules ont beaucoup d'applications en biomédicale. Par

exemple, pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles de traitement de cancer, les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues. Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de la région chirurgicale, Jordan et al [17] ont effectué une étude où les nano-fluides pourraient être employés pour produire une température plus élevée autour des tumeurs pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines voisines.

### **II.2.5. Autres applications**

Il y a des situations nombreuses où l'augmentation de l'efficacité du transfert thermique peut être liée à la qualité, la quantité et le coût d'un produit d'un processus. Par exemple, dans l'industrie de l'énergie renouvelable, les nano-fluides sont utilisés pour augmenter le transfert de chaleur à partir des captures solaires aux réservoirs de stockage et pour augmenter la densité de l'énergie. Les liquides réfrigérants de nano-fluides ont une application potentielle dans la majorité des industries de transformation. Telles que les matériaux, la production chimique, la nourriture, le pétrole et le gaz.

### **II.2.6. Les avantages des nano fluides**

Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.

Haut dispersion et stabilité avec prédominance mouvement brownien des particules. Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur. Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système. Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particule en fonction des différentes applications. [18].

### **II.2.7. Les inconvénients des nano fluides**

- Manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- Le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.
- Mauvaise caractérisation des suspensions.
- Stabilité des nanoparticules dispersion.
- Chute de pression accrue et la puissance de pompage.
- Viscosité supérieure, chaleur spécifique Basse.

- Le coût élevé des nano-fluides.
- Difficultés dans le processus de production. [18].

## II.2.8. Les propriétés thermo physiques :

### II.2.8.1. Nano fluides :

Les propriétés thermo physiques (conductivité thermique, masse volumique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et cinématique, etc.) des fluides de base sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. Nous supposons, dans notre travail, que les nanoparticules sont bien dispersées de façon uniforme et forment une suspension stable dans le fluide de base et qu'elles sont en état d'équilibre thermique avec ce dernier.

#### La fraction volumique

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nanofluide, puisque le calcul de toutes les autres propriétés se base sur la fraction volumique du Nanofluide. On peut définir la fraction volumique comme étant le rapport de volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base).

$$\varphi = \frac{V_p}{V_T} \quad \text{II.5}$$

$V_p$  : volume des particules solides ( $m^3$ )

$V_T$  : volume totale ( $m^3$ )

#### La Conductivité thermique (K)

Conductivité thermique, exprimée en K ( $W.m^{-1}K^{-1}$ ), est la capacité d'un matériau Conduire ou transférer la chaleur [19] à travers Par rapport à des dizaines de pour cent du fluide de base [20] :

#### A) Modèle de Yu et Choi

Une autre expression pour calculer la conductivité thermique a été introduite par Yu et Choi (2003) [21]. Ils ont proposé de modéliser les nanofluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique, cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules [22].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2(1+\beta)^3(k_f - k_p)\varphi}{k_p + 2k_f + (1+\beta)^3(k_f - k_p)\varphi} \quad \text{II.6}$$

$\beta$  : Rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

#### B) Modèle de Hamilton & Crosser (1962)

Établissement du modèle Hamilton et Cross pour résoudre la limite du modèle Maxwell. Car ce dernier n'est efficace que dans le cas des particules sphériques. La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante [23] :

$$Kn_f = \frac{ks+(n-1)kf-(n-1)(kf-kp)\varphi}{ks+(n-1)kf+\varphi(kf-kp)} Kf \quad \text{II.7}$$

Où (n) est un facteur de forme empirique donné par  $n = \frac{3}{\phi}$  N=3 pour les particules sphériques et n=6 pour les particules cylindriques.

Pour ( $\Psi=1$ ) (particules sphériques) le modèle de Hamilton et Crosser est identique au modèle de Maxwell.

### C) Modèle de Maxwell

La conductivité thermique effective du nanofluide peut être estimée par le modèle suivant Approximation auto-cohérente de Maxwell. Pour les entités à deux composants en suspension particules sphériques [14]. Le modèle de Maxwell (1873) est donné par la formule suivante

$$Kn_f = \frac{kp+2kf+2\varphi(kp-kf)}{kp+2kf-\varphi(kp-kf)} Kf \quad \text{II.8}$$

Où  $Kn_f$  : la conductivité thermique du nano fluide.

$Kf$  : La conductivité thermique du fluide de base.

$Kp$  : La conductivité thermique des particules solides.

Le modèle de Hamilton-Crosser et le modèle de Yu-Choi, qui tiennent compte de la forme non sphérique des nanoparticules [20].

### Viscosité dynamique ( $\mu$ )

La viscosité peut être définie comme une caractéristique du fluide, de sorte qu'il peut résister déformer pendant l'exercice. Par conséquent, nous pouvons dire que la viscosité est tant que mesure du frottement interne du fluide. Un liquide très visqueux est un liquide à friction interne élevée. Au fur et à mesure que la viscosité augmente, la vitesse diminue fortement. [24].

Les différents modèles de viscosités :

### A) Modèle de Brinkman

La formule de Brinkmann (1952) a complété le modèle d'Einstein jusqu'à La concentration volumique est inférieure à 4% [23] La viscosité du nano fluide est donnée par Brinkman :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_n}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad \text{II.9}$$

### B) Modèle de Batchelor

Batchelor montre que la viscosité est une fonction non linéaire de  $\varphi$  en présence de 69 En un semestre.

$$\mu_{nf} = \mu_f (6.2\varphi^2 + 2.5\varphi + 1) \quad \text{II.10}$$

### C) Modèle de Maiga et al

D'autres relations ont été proposées dans la littérature, limitées à de bonnes applications précises. Maiga et ainsi de suite. (2005) propose la corrélation à partir des résultats de mesure [23] :

$$\mu_{nf} = \mu_f (123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \quad \text{II.11}$$

### La masse volumique ( $\rho$ )

La détermination de la masse volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique à une température T donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange.

Dans le cas d'un mélange la masse volumique est donnée par la relation suivante [19] :

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_p + (1 - \varphi)\rho_f \quad \text{II.12}$$

Où :

$\rho_{nf}$ : Masse volumique du nano fluide.

$\rho_p$ : Masse volumique de la nanoparticule.

$\rho_f$  : Masse volumique du fluide.

### La chaleur massique ( $C_p$ ) :

En suivant l'auteur, nous avons trouvé l'une ou l'autre des deux relations Suivant. De nombreux écrivains, dont Pak et Cho. (1998) utilise :

$$(C_p)_{nf} = (1 - \varphi) (C_p)_f + \varphi (C_p)_p \quad \text{II.13}$$

Certains autres dont Xuan et Roetzel (2000) ont utilisé :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \quad \text{II.14}$$

$(C_p)_{nf}, (C_p)_f, (C_p)_p$  désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nano fluide, du fluide de base et des nanoparticules [23].

**Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ) :**

Le changement de densité sous l'action de la température est caractérisé par Le coefficient de dilatation thermique est également appelé coefficient de dilatation à pression égale [19] :

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \quad \text{II.15}$$

Pour de nombreux nano fluides, le calcul de la valeur du coefficient L'auteur a utilisé les premiers travaux sur les nano fluides, etc. La relation avec la densité déterminée est la suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \phi)\beta_f + \phi \beta_p \quad \text{II.16}$$

**Références :**

- [1] Philippe Marty, " Cours De Transferts Thermiques" Génie Des Procédé, Joseph Fourier Université, PP 03, (2012-2013).
- [2] Tanzila Hayat et S. Nadeem, Heat transfer enhancement with Ag–CuO/water hybrid nanofluid. Results in physics, 2017, vol. 7, p. 2317-2324.
- [3] Khaldi Souheyla, 'Généralités Sur Les Transferts De Chaleur ' PP 10-12, (2019).
- [4] Mohamed El Hattab, Rachid Mir, Younes El Hammami, OuriaMediouni," Simulation numérique de la convection naturelle des nano fluides dans une enceinte carrée chauffée par une source de chaleur", Laboratoire De Mécanique, Procédés De l'Energie Et De l'Environnement (LMP2E) Ecole Nationale Des Sciences Appliquées, B.P. 1136, Agadir, Maroc, (2013).
- [5] Klaleche Sofiane Madjour Abderrahmane, "Simulation numérique de la convection forcée entre deux disques en présence d'un nano fluide", Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, (2015).
- [6] DADDA Mouhamed Lamine," Étude de la convection naturelle dans une cavité carrée différentielle ment chauffée", Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, (2016).
- [7] Said B, M'barek F, Hossine E, Etude numérique de la convection naturelle des nano fluides dans un espace annulaire entre deux cavités carrées ', Université Ibn Zohr, Laboratoire LMP2E, ENSA, BP 1136 Agadir, Maroc, 2017
- [8] Abdelraheem M. Aly, Choi S.U.S,"enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles " Developments and application of Non –Newtonians Flow, FFDVol231/MD-vol66(1995), pp:99-105, (1995).
- [9] Soufi, E., H, " Application des nanofluides pour le refroidissement : étude d'un cas d'une géométrie simple" Thèse de Master en Génie Chimique, Université Kasdi Merbah d'Ouargla.
- [10] S.Z. Heris, S.G. Etemad et M.N, Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluide laminar flow convective Heat transfer, International communications in heat and

mass transfer, Vol. 33, pp.529-535, 2006

[11] Y. Li, J. Zhou, S. Tung, Schneider E, Xi S, A review on development of nanofluid preparation and characterization, Powder technology, Vol.106, pp.89-101,2009.

[12] Y. Xuan et Q. Li, Heat Transfer enhancement of nanofluides. International Journal of Heat fluid flow, Vol. 21, N°1, pp.58-64, 2000.

[13] S.c Tzeng C.W. Lin Huang, Heat transfer Enhancement of in Rotary Bland Coupling of Four-Wheel-Drive Vehicles. Ac ta Mechanic a Vol.179, pp.11-23, 2005.

[14] Z Zhang, Q Que, Synthesis, structure and Lubricating properties ofDialkydithiophosphate- Modified Mo-s compound nanoclustres, Wear 209 8.12, 1997.

[15] C.Y Tsai, H.T Chien, P.P Ding. B Chan, T.Y Luch, P.H Chen, Effect of Structuralcharacter of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, Material lettersVol. 58, pp.1461-1465, 2004.

[16] S You, J H Kim et K.H Kim, Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water inpool boiling Heat Transfer. Applied physics, Letters 83, pp 3374-3376, 2003.

[17] P Vassallo, R Kumar et S D'Amico, Pool Boiling Heat Transfer Experiments in Siliciawater Nanofluides, international Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 47, pp. 407-411,2004.

[18] A Jordan, R scholz, P Wust, H Famng et R Falix, Magnetic Fluid Hypothermia (MFH), cancer treatment with AC Magnic Field induced Excitation of Biocompatible super paramagnetic nanoparticles. Journal of Magnétism and magnetic Materials, Vol. 201, pp. 413- 419, 1999

[19] GHADBANE Abdelouahab,' Etude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluid dans un échangeur de chaleur', Université de M'sila, 2019.

[20] Billel BOUDJENIBA, Salah LAOUAR, El Hacene Mezaache,' Etude Numérique De

La Convection Naturelle Dans Une Cavité Rectangulaire Contenant Un Nanofluid',

---

Université 20 Août 1955 De Skikda, 2015.

[21] Lebbihi Saci,' Refroidissement Par Convection Naturelle D'une Source De Chaleur Localisée Au Fond D'une Enceinte Remplie De Nanofluide', Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

[22] Salhi Hicham,' Etude Numérique De La Convection Naturelle Dans Les Enceintes : Nanofluide', Université De Batna, 2015.

[23] Bouchoucha Abd El Malik,"Génération D'entropie Due Au Refroidissement Par Convection Naturelle D'un Nano fluide", Université Des Frères Mentouri – Constantine, (2017).

[24] HamdiMoumni, HediaWelhezi, RidhaDjebali, EzeddineSediki," Accurate finite volume investigation of Nano fluid mixed convection in two-sided lid driven cavity including discrete heat sources"Univ. Tunis El-Manar, Tunisia, (2015).

# Chapitre *III*

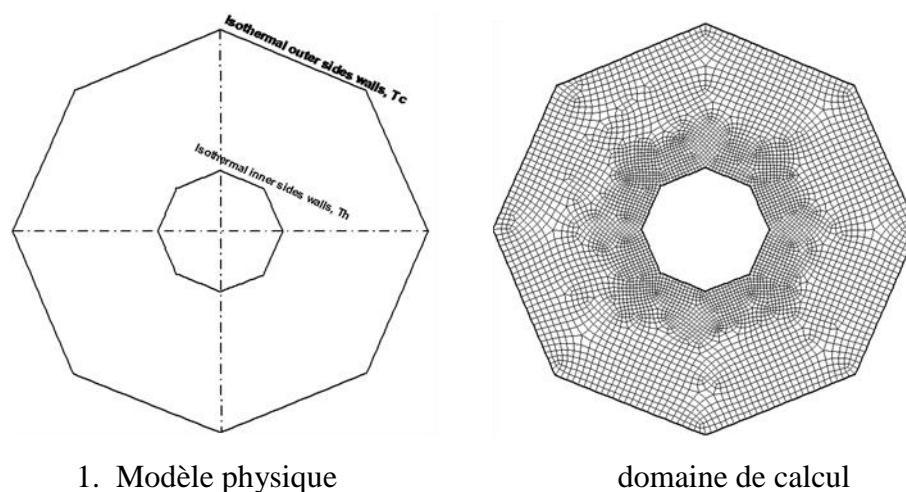
## *Modèle mathématique* *Et* *Approche Numériques*

Dans ce chapitre, nous décrivons et formulons des modèles physiques, mathématiques et Simplifiez les hypothèses et les conditions aux limites appropriées. Chaque Les phénomènes physiques sont généralement représentés par des équations mathématiques (équations différentiel) représente un modèle de ce phénomène. Le comportement des phénomènes temporels et spatiaux doit être exprimée. Et nous avons mentionné le principe de fonctionnement du programme arithmétique utilisé dans ce calcul "FLUENT 6.3.26", qui prend par défaut la résolution de l'équation de transport paramètres et conditions d'écoulement adaptés par la méthode des volumes finis.

### III.1. Mise en équation du problème

#### III.1.1. Modèles physique

La figure.III.1 montre la représentation physique du travail actuel. Le problème traité concerne un cylindre polygonal à huit côtés, situé à l'intérieur d'une enceinte cylindrique polygonale également caractérisée par huit côtés. Les surfaces du polygone extérieur sont maintenues à une température basse constante  $T_f$ , tandis que la surface intérieure est maintenue à une température élevée constante  $T_c$ . Dans ce travail, le nombre de Rayleigh thermique  $Rat$  varie de  $10^3$  à  $3 \times 10^5$ . L'étude est bidimensionnelle, l'écoulement est un écoulement laminaire naturel par convection d'un nanofluide (Cu-eau). Le nanofluide est considéré comme incompressible et newtonien, avec une diffusion visqueuse et une action de pression négligeables. Les phases solide et fluide sont en équilibre thermique avec la même vitesse d'écoulement, et l'approche de Boussinesq est utilisée



**Figure.III.1.** Domaine physique et domaine de calcul

#### III.1.2. Modèle mathématique

Les équations présentées dans cette partie sont basées sur des hypothèses qu'il convient de rappeler :

- L'écoulement est stationnaire
- L'écoulement est bidimensionnel
- Le fluide est supposé newtonien
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable
- Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable

- La variation de la masse volumique n'est considérée que dans le terme de la poussée thermique d'Archimède et elle est supposée constante (égale à  $\rho_0$ ) pour les autres termes des équations
- Le volume reste constant sous l'action d'une pression externe (fluide isovolume), alors que sa masse volumique varie linéairement telle que  $\rho = \rho_0 [1 - \beta(T-T_0)]$  où  $\beta$  est le coefficient d'expansion thermique et  $\rho_0$  la masse volumique à la température de référence  $T_0$  définie par :  $T_0 = \frac{T_C + T_F}{2}$

### III.1.2.1. Equations générales

L'équation qui contrôle le flux est la continuité, Navier-stokes et les équations énergétiques représentent respectivement la conservation de la masse, Volume et énergie. Vous pouvez utiliser les champs de vitesse et de température dans ces équations. Évaluation des paramètres de transfert de chaleur (nombre de Nusselt dans la cavité).

#### III.1.2.1.1. Equation de continuité

C'est l'équation représentant la loi de conservation de la masse Contrôle du matériel. Mathématiquement exprimé sous la forme suivante [1] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot V) = 0 \quad \text{III.1}$$

#### III.1.2.1.2. Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes)

Pour un écoulement incompressible ( $\rho = Cte$ ) à viscosité constante ( $\mu = Cte$ ). L'expression de la conservation de la quantité de mouvement d'un fluide Newtonien incompressible dans le champ de pesanteur  $\vec{g}$  est donnée par l'équation de Navier-Stokes :

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \overrightarrow{grad} p + \mu \cdot \Delta \vec{v} \quad \text{III.2}$$

$\vec{F}$  : représente les forces volumiques.

Où  $p$  est la pression et  $\mu$  la viscosité du fluide

L'équation (III.2) se simplifie dans le cadre des hypothèses (d'Overbeck- Boussinesq) suivantes :

La densité s'exprime comme une fonction linéaire en température. On peut écrire :

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 - \beta(T - T_0)) \quad \text{III.3}$$

$T_0$  : La température de référence.

$\rho$  : La masse volumique

$\rho_0$  : La masse volumique à  $T_0$

Sachant que :  $\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$

$\beta$  : Le coefficient de dilatation à pression constante.

L'équation III.2 s'écrit alors :

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{g} - \overrightarrow{\text{grad}p} + \mu \cdot \Delta \vec{v} \quad \text{III.4}$$

$$\rho_0 \cdot (1 - \beta(T - T_0)) \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho_0 \cdot (1 - \beta(T - T_0)) \vec{g} - \overrightarrow{\text{grad}p^*} + \mu \cdot \Delta \vec{v} \quad \text{III.5}$$

Dans la composition  $\rho = \rho_0 - \rho_0 \cdot \beta \cdot (T - T_0)$  ; le premier terme  $\rho_0$  ne contribue pas au mouvement il est simplement pris en compte dans le terme de pression motrice par :

$$p^* = p + \rho_0 \cdot g \cdot z.$$

Le deuxième terme est le moteur de mouvement et doit être gardé dans les équations de Navier-Stokes.

Par contre, la décomposition  $\rho$  ne fait que modifier légèrement le terme d'inertie par rapport à  $\rho_0 \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$  et on peut faire l'approximation :

Si  $\beta \cdot (T - T_0) \ll 1 \Rightarrow \rho_{nf} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \cong \rho_0 \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$ , le terme  $\beta_{nf} \cdot (T - T_0) \cdot \rho_0 \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$  étant d'un ordre de grandeur inférieur.

Et finalement :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho_0} \overrightarrow{\text{grad}p^*} - \beta_{nf} \cdot (T - T_0) \cdot \vec{g} + \mu_{nf} \cdot \Delta \vec{v} \quad \text{III.6}$$

### III.1.2.1.3. Equation de l'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\rho_{nf} \frac{dE}{dt} = \text{div}(k \cdot \overrightarrow{\text{grad}T}) + T \cdot \beta_{nf} \cdot \frac{dp}{dt} + \phi + q_s \quad \text{III.7}$$

Avec :  $dE = C_p \cdot dT$

Où :

$\frac{dE}{dt}$  : La variation de l'énergie interne.

$C_p$  : La chaleur massique à pression constante.

$k$  : La conductivité thermique.

$\beta_{nf}$  : Le coefficient de dilatation à pression constante.

$\phi$  : La fonction de dissipation.

$q_s$  : La source de chaleur interne.

Si on suppose pour un écoulement à dissipation et l'effet de la pression sont négligeables à conductivité thermique constante, et pas de source de chaleur interne l'équation III.7 se simplifie en :

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \cdot \Delta T$$

III.8

$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$  : La diffusivité thermique.

### III. 2. Propriétés thermo-physiques de nanofluide

Le tableau III.1 sont présentées les propriétés thermo physiques des liquides et des nanoparticules les plus utilisées dans la littérature des nanofluides

**Tableau. III.1:** propriétés thermo physiques des nanoparticules et les fluides caloporteurs

Propriétés physiques	Eau pure	Cuivre Cu	Argent Ag	Oxyde de Titane TiO <sub>2</sub>	Oxyde de Cuivre CuO
$\rho$ (kg .m <sup>-3</sup> )	997.1	8933	10500	4250	6320
$C_p$ (J .kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	4179	385	235	686.2	531.8
$K$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0.613	400	429	8.954	17.65
$\mu$ (Kg .m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0.001002	-	-	-	-
$\beta$ (K <sup>-1</sup> ) $\times 10^5$	21	1.67	1.89	0.9	0.85

### III. 3. Equations du problème :

On peut établir les différentes équations nécessaires à la résolution du problème considéré dans notre étude comme suit :

#### III. 3.1. Equations de continuité :

Après d'application des précédentes hypothèses on obtient :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad \text{III.9}$$

U et V étant les composantes du champ de vitesse V (u, v) dans la direction x et y respectivement.

#### III. 3.2. Equations de quantité de mouvement

Les équations de quantité de mouvement s'écrivent de la manière suivante :

Suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + V \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right) \quad \text{III.10}$$

Suivant y :

$$u \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left( -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right) \quad \text{III.11}$$

### III.3.3. Equations de l'énergie

L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le principe de la conservation de l'énergie dans la direction x et y comme suit :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{III.12}$$

Les équations différentielles de la continuité, de la quantité de mouvement et de l'énergie forment le modèle mathématique de l'écoulement de la convection naturelle laminaire [2] [1] [3].

### III.4. Formulation adimensionnelle du problème

Pour adimensionnaliser les variables dépendantes et indépendantes, nous employons des quantités caractéristiques qui sont constantes dans tout le champ d'écoulement et de temps érature. Ces quantités sont :  $L, V_0, T_p, T_f$  et  $P_0$

Nous considérons des coordonnées cartésiennes et éles variables adimensionnelles suivantes :

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{u}{V_0}, \quad V = \frac{v}{V_0}, \quad \tau = t \frac{V_0}{L}, \quad P = \frac{P-P_0}{\rho V_0^2}, \quad \theta = \frac{(T-T_p)}{(T_f-T_p)},$$

$$x = X \times L, \quad y = Y \times L, \quad u = V_0 \times U, \quad v = V_0 \times V, \quad T - T_p = \Delta T \times \theta, \quad t = \frac{L \times \tau}{V_0},$$

$$P - P_0 = \rho V_0^2 \times P$$

#### III.4.1. Forme adimensionnelle de l'équation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad \text{III.13}$$

#### III.4.2. Forme adimensionnelle des équations de quantité de mouvement

-L'équation de quantité de mouvement suivant x

$$U \frac{\partial u}{\partial x} + V \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \frac{1}{\alpha_f} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \text{III.14}$$

-L'équation de quantité de mouvement suivant x

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \frac{1}{\alpha_f} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \cdot \beta_f} \cdot Ra_t \Pr \theta \quad \text{III.15}$$

**III.4.3. Forme adimensionnelle de l'équation d'énergie :**

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\rho_{nf}}{\alpha_f} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad \text{III.16}$$

Les caractéristiques thermo physiques des liquides (eau) et des nanoparticules (Cuivre) sont indiquées dans le tableau 2.

	$\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )	$C_p$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$K$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )
Pure water	997.1	4179	0.613	$21 \times 10^{-5}$
Copper	8933	385	401	$1.67 \times 10^{-5}$

**Tableau III.2:** Les caractéristiques thermo physiques des liquides (eau) et des nanoparticules (Cuivre)

**III.4.4. Conditions aux limites**

La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable dépendante. Les conditions de températures sont connues sur les parois.

La température de la paroi extérieur est constante et égale à  $T_f$ .

La température de la paroi intérieure est soumise à une température constante  $T_c$ .

La condition adiabatique est adoptée pour les autres parois (supérieure et inférieure). Ces différentes conditions aux limites sous forme adimensionnelles peuvent être résumées dans le tableau III.2

**Tableau III.3:** conditions aux limites hydrodynamique et thermiques sous forme adimensionnelles.

	Conditions Hydrodynamiques	Conditions Thermiques
<b>Paroi externe</b>	$U = V = 0$	$\Theta = 0$
	$U = V = 0$	$\frac{d\Theta}{dY} = 0$
<b>Paroi interne</b>	$U = V = 0$	$\frac{d\Theta}{dY} = 0$
	$U = V = 0$	$\Theta = 1$

### III.5. Les nombres sans dimension

#### III.5.1. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est proportionnel au rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Il peut être exprimé comme :

$$\frac{fa}{fu} = \frac{\text{force d'inertie}}{\text{force de viscosité}} = \frac{\rho L^2 V^2}{\mu L V} = \frac{\rho L V}{\mu} = Re \quad \text{III.36}$$

Où  $V$  : La vitesse moyenne

$L$  : La longueur caractéristique [m].

Le nombre de Reynolds permet de quantifier les écoulements laminaires et turbulents. Les écoulements à nombre de Reynolds élevé sont généraux turbulents, alors que les écoulements où les forces d'inertie sont faibles par rapport aux forces visqueuses sont plus souvent laminaires.

#### III.5.2. Nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl est proportionnel au rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement et la diffusivité thermique. Il caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux.

Il peut être exprimé comme :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad \text{III.37}$$

### III.5.3. Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof est proportionnel au rapport entre les forces de gravité par les forces visqueuses. Il peut être exprimé comme :

$$\frac{F_g}{F_v} = \frac{\text{force de gravité}}{\text{force de viscosité}} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \rho}{\mu^2} \quad \text{III.38}$$

Où  $g$  :  $L$  accélération de la pesanteur [ $m \cdot s^{-2}$ ].

$\Delta T$  : La différence de température [ $0_C$ ].

### III.5.4. Nombre de Rayleigh

Le nombre de Rayleigh est proportionnel entre l'importance relative de la poussée d'Archimède et le produit de la traînée visqueuse par le taux de diffusion thermique.

Il peut être exprimé comme [1] :

$$Ra = \frac{g \beta}{\nu \alpha} (T_s - T_\infty) L^3 c = Gr \cdot Pr \quad \text{III.39}$$

Où  $T_s$  : La température de la paroi [ $0_C$ ].

$T_\infty$  : La température du fluide loin de la paroi [ $0_C$ ].

$\nu$  : La viscosité cinématique [ $Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]

$\alpha$  : La diffusivité thermique [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

### III.5.5. Le nombre de Nusselt

En convection, le phénomène de transfert de chaleur à la surface est évalué et caractérisé par le nombre adimensionnel est le nombre de Nusselt, qu'il désigne le rapport entre les quantités de chaleur échangés par convection et par la conduction pure. Cette grandeur situe donc l'importance du flux thermique échangé par convection à la paroi du flux équivalent transmis par seule conduction (en l'absence tout mouvement du fluide), sous l'effet de même écart de température [1] [2]. Le nombre de Nusselt (Nu) est un rapport de la convection à la conduction pure.

$$\frac{\text{Flux convectif}}{\text{Flux conductif}} = \frac{h \cdot \Delta T}{K \cdot \Delta T / L} = \frac{h \cdot L}{K} = Nu \quad \text{III.40}$$

Où :  $\text{Flux convectif} = h \cdot \Delta T$

Par conséquent, le nombre de Nusselt représente le perfectionnement du transfert de chaleur dans la couche de fluide comme étant le rapport des deux phénomènes. Si la valeur de Nu est grande cela veut dire que la convection est dominante. Si  $Nu = 1$ , cela veut dire que le

transfert de chaleur se fait par conduction pure [1].

Où  $h$ : Le coefficient de transfert par convection [ $W \ m^{-2} \cdot K$ ].

### III.6. Modèle Numérique

- ✓ De nombreuses méthodes numériques existent pour la résolution des types d'équations différentielles, on peut citer à titre d'exemples : [4]

1- La méthode des différences finis

2- La méthode des éléments finis

3- La méthode des volumes finis

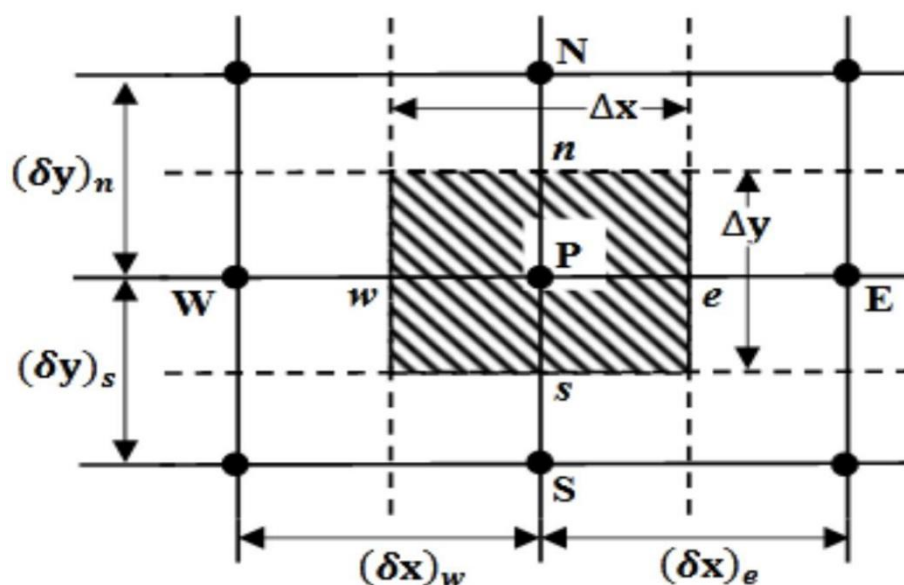
Dans notre travail, nous avons effectué une simulation numérique moyennant le code de calcul « FLUENT 6.3.26 », qui acquiesce la résolution des équations de transport par la méthode des volumes finis. Des paramètres adaptés d'écoulement et des conditions aux limites adéquates sont utilisés. Nous avons réalisé le maillage par le pré-logiciel « GAMBIT 2.4.6 » [2].

#### III.6.1. Procédure Numérique :

Afin de résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles établies dans le chapitre précédent, nous allons procéder à leurs discrétisations dans le but d'obtenir un système d'équations algébriques dont la résolution nous permet de déterminer les champs des variables du problème considéré. La méthode de volumes finis a été adoptée pour accomplir cette discrétisation, et l'utilisation de l'algorithme SIMPLE pour la correction de pression sur un maillage non uniforme. La méthode des volumes finis a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar le principe de méthode des volumes finis basé sur une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volume de contrôle, Chacun de ces derniers englobe un nœud dit nœud principal, comme indiqué dans la Figure III.2. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle. Les différentes étapes de la méthode des volumes finis sont :

- La discrétisation du domaine considéré en volume de contrôle.
- La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles.
- Écriture des équations algébriques aux nœuds du maillage.

- Résolution du système algébrique linéaire obtenu.



**Figure III.2:** Volume de contrôle bidimensionnel

Le volume de contrôle est montré par la Figure II.1, Pour un nœud principal P, les points E et W (Est et Ouest) sont des voisins dans la direction x, tandis que N et S (Nord et Sud) sont ceux dans la direction y. Le volume de contrôle entourant P est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points e et w dans la direction x, n et s dans la direction y.

Dans cette mémoire la résolution de problème est effectuée par le logiciel FLUENT, basé sur la méthode des volumes finis, utilisant le schéma QUICK pour la discrétisation de l'équation de quantité de mouvement et la discrétisation de l'équation d'énergie.

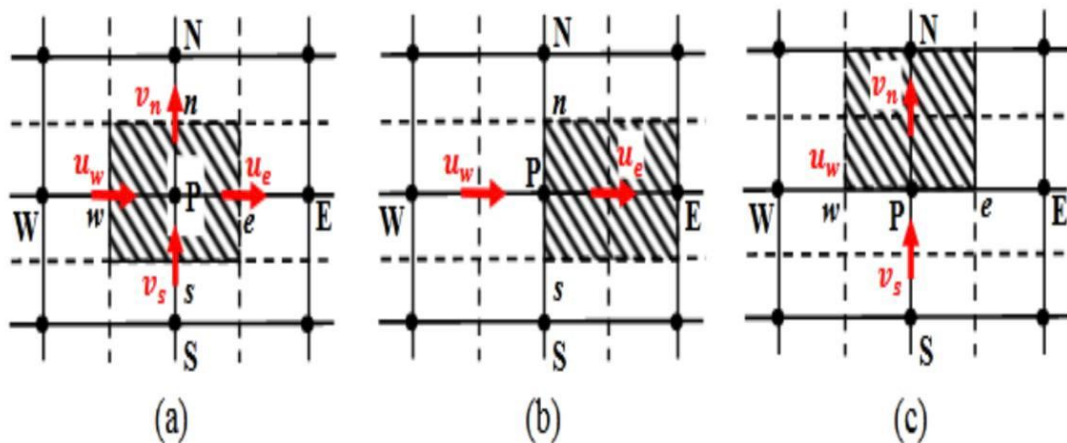
### III.6.2. Maillage

C'est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection représente un nœud, où on trouve la variable P et les composantes u et v de la vectrice qui se trouve au milieu des segments reliant deux nœuds adjacents. La discrétisation du domaine est obtenue par un maillage constitué d'un réseau de points (nœuds). Ainsi, un élément de volume de contrôle est éautour de chaque nœud. Les grandeurs scalaires pression et température sont stockées dans le nœud P.

Du maillage (Figure III.2 (a)), tandis que les grandeurs vectorielles u et v sont stockés aux milieux des segments reliant les nœuds. L'équation générale du transport est intégrée sur le

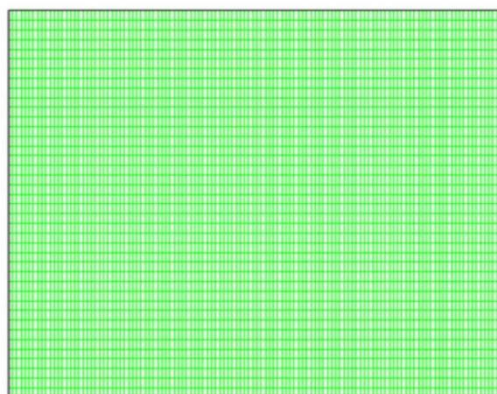
volume de contrôle associé aux variables scalaires et les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur le volume de contrôle associé aux composantes de vitesse.

Le volume de contrôle de la composante longitudinale  $u$  est décalé suivant la direction  $x$  par rapport au volume de contrôle principale (Figure III.2 (b)), celui de la composante transversale  $v$  est décalé suivant la direction de  $y$  (Figure III.2 (c)). Ce type de maillage dit "maillage décalé" permet une bonne approximation des flux convectifs et une meilleure évaluation des gradients de pression ainsi qu'une stabilisation numérique de la solution. La construction des volumes de contrôle et le maillage décalé sont montrés dans Figure. III.3.



**Figure III.3** : Schéma du maillage

La figure III.4 montre la grille utilisée sur le meillieur GAMBIT. Les équations de continuité, de quantité du mouvement bidimensionnelle et d'énergie sont résolues numériquement en utilisant le solveur Fluent.



**Figure III.4**: Le maillage utilisé.

La convergence atteinte pour un nombre d'itération environ 550 itérations Avec une erreur d'ordre  $10^{-6}$  (figure III.5).

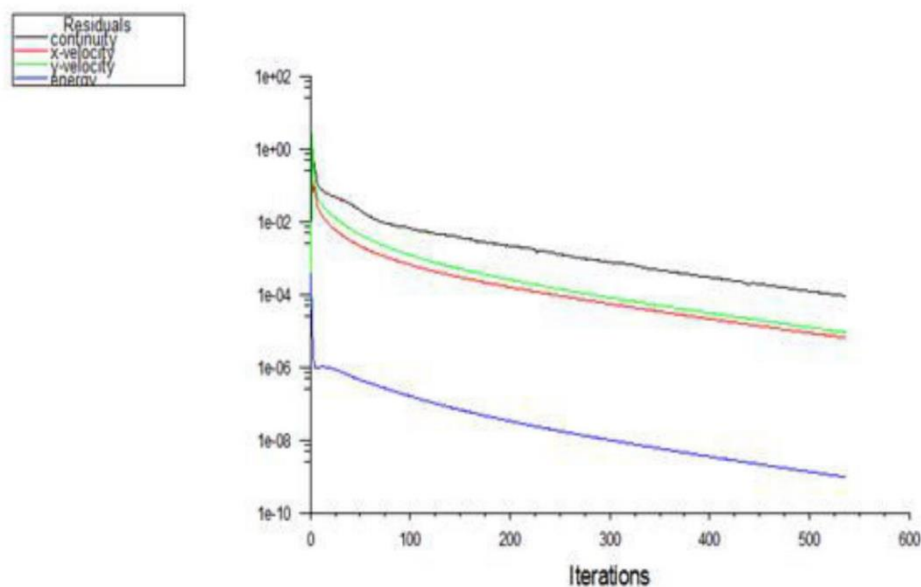


Figure III.A.5: Evolution de résidu

### III.7. Présentation des logiciels Gambit et Fluent

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

#### III.7.1. GAMBIT :

GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Gambit est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, ...etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

#### III.7.2. FLUENT :

FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométrie complexes, avec une relative facilitée. Les types de mailles supportées sont :

Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales

Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales

Des mailles (hybrides) mixtes.

FLUENT est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la

puissance offerte par ce langage (par exemple allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur le même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace.

FLUENT s'utilise à travers une interface graphique, l'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures. Ainsi, à titre non exhaustif, FLUENT permet les capacités de modélisation suivantes :

Écoulements 2D ou 3D.

Écoulement stationnaire ou instationnaire.

Écoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques).

Écoulements non visqueux, laminaires ou turbulents.

Fluide Newtonien ou non.

Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (conjugue) ou radiatif.

Écoulements avec changements de phases. Chapitre II Formulation Mathématiques et Numérique

Écoulements en milieu poreux.

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

Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (maillage) de calcul.

Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, les connues telles que : vitesses, pressions et températures.

Le choix entre ces modèles se base principalement sur les résultats que donne chacun des modèles suivant les conditions aux limites prédéfinies. Il est vrai qu'un modèle peut donner de meilleurs résultats par rapport à un autre, mais ceci est dû principalement à la nature des cas étudiés et à la correspondance du modèle de turbulence avec les conditions aux limites.

**Références**

- [1] DADDA Mouhamed Lamine," Étude de la convection naturelle dans une cavité carrée différentiellement chauffée", Université Echahid Hamma Lakhdar d' El-Oued, (2016).
- [2] Lebbihi Saci,' Refroidissement Par Convection Naturelle D' une Source De Chaleur Localisée Au Fond D' une Enceinte Remplie De Nanofluide' , Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [3] BOUHABEL Bourhane GUERMAT Zouhir,' Etude Numérique De La Convection Naturelle Dans Une Cavité Rectangulaire Incliné Saturée Par Des Fluides Et Des Nanofluides' , Ecole nationale polytechnique de Constantine, 2018.
- [4] Bouchoucha Abd El Malik,' Génération D'entropie Due Au Refroidissement Par Convection Naturelle D'un Nanofluide', Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2017.

# Chapitre

## IV

### *Résultats et discussion*

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

Dans ce chapitre nous avons mené une étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle dans des cylindres hexagonaux concentriques chargés d'un nano fluide. La méthode des volumes finis a été appliquée pour effectuer une simulation numérique d'une convection naturelle laminaire à deux dimensions, le système d'équations régissant le problème a été résolu numériquement par le code de calcul Fluent basé sur la méthode des volumes finis. Dans ces simulations, l'approximation de Boussinesq a été considérée.

Le fluide dans la cavité est un nano fluide Cu – eau. Les surfaces intérieure et extérieure sont maintenues à une température constante. L'étude est réalisée pour des nombres de Rayleigh allant de  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$  et  $3 \cdot 10^5$ , et fraction volumique des nanoparticules. 0, 0.03, 0.06 et 0.09.

Les résultats sont présentés sous forme de lignes de courant, des isothermes et de nombres locaux et moyens de Nusselt.

## IV.2. Choix du maillage

L'effet de la taille du maillage et du nombre de nœuds sur la précision de la simulation du transfert de chaleur vers la zone active (chauffée) du cylindre est évalué à travers l'évolution du nombre de Nusselt moyen, comme illustré dans la figure. Un maillage non uniforme a été adopté, avec un raffinement accru à proximité des parois, afin de mieux capturer les phénomènes physiques dans la zone de la couche limite, où les gradients thermiques sont particulièrement prononcés.

Pour garantir l'indépendance des résultats vis-à-vis du maillage, une étude de raffinement a été menée pour une configuration polygonale fermée contenant un polygone interne isotherme, sous un nombre de Rayleigh de  $10^4$ . Huit configurations de maillage ont été testées :  $62 \times 108$ ,  $72 \times 128$ ,  $82 \times 148$ ,  $92 \times 168$ ,  $102 \times 188$ ,  $112 \times 208$ ,  $122 \times 288$  et  $132 \times 248$  volumes de contrôle.

Les résultats (figure 2) montrent la convergence du nombre de Nusselt moyen au niveau du cylindre intérieur chauffé à mesure que le maillage est affiné. Il a été constaté que la solution devient indépendante du maillage à partir de la configuration  $112 \times 208$ , au-delà de laquelle l'évolution du nombre de Nusselt moyen devient négligeable. Cette configuration a été retenue pour la suite de l'étude, garantissant un bon compromis entre précision et coût de calcul.

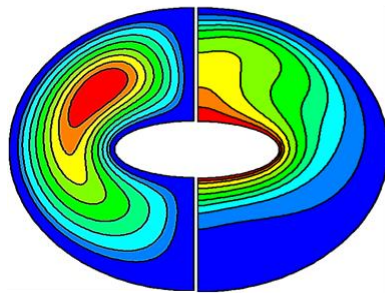
taille du maillage	$62 \times 108$	$72 \times 128$	$82 \times 148$	$92 \times 168$	$102 \times 188$	$112 \times 208$	$122 \times 288$	$132 \times 248$
<b>Nu</b>	<b>2.422</b>	<b>2.461</b>	<b>2.475</b>	<b>2.484</b>	<b>2.495</b>	<b>2.508</b>	<b>2.509</b>	<b>2.509</b>

## IV.3. Validation des résultats

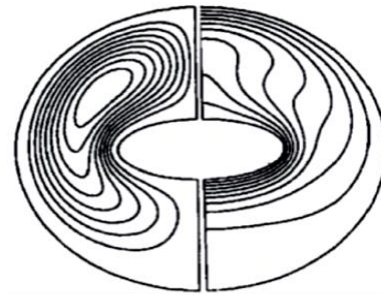
Afin de vérifier l'exactitude des résultats obtenus dans cette étude, une validation du code numérique a été réalisée en se référant à des travaux antérieurs disponibles dans la littérature. L'étude de référence retenue est celle d'Elshamy, qui traite de la convection naturelle de la chaleur dans une cavité formée par deux cylindres elliptiques horizontaux confocaux remplis d'air ( $Pr = 0,71$ ), pour différents nombres de Rayleigh.

La validation a été effectuée en comparant les isothermes et les lignes de courant obtenues dans la présente simulation à celles présentées dans l'étude de référence, pour un nombre de Rayleigh égal à  $10^4$ , avec une excentricité de 0,9 pour le cylindre intérieur et 0,4 pour le cylindre extérieur.

Les résultats montrent une bonne concordance avec ceux de la littérature, tant en termes de formes des isothermes et des lignes de courant qu'en termes de distribution des nombres de Nusselt locaux. On observe notamment la formation de deux cellules de recirculation symétriques de part et d'autre de l'axe vertical de la cavité, dues à la force de flottabilité engendrée par le gradient de température, ce qui confirme la validité du modèle numérique utilisé.



Présent travail



Elshamy

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle dans des cylindres hexagonaux concentriques remplis d'un nanofluide. La méthode des volumes finis a été appliquée pour effectuer une simulation numérique de la convection naturelle laminaire en deux dimensions. Le système d'équations régissant le problème a été résolu numériquement à l'aide du code de calcul **Fluent**, basé sur la méthode des volumes finis. Dans ces simulations, l'approximation de Boussinesq a été prise en compte.

Le fluide présent dans la cavité est un nanofluide à base de cuivre et d'eau (Cu-eau). Les surfaces intérieure et extérieure sont maintenues à une température constante.

L'étude a été réalisée pour des nombres de Rayleigh allant de  $10^3$  à  $3 \cdot 10^5$ , ainsi que pour des fractions volumiques de nanoparticules de 0, 0,03, 0,06 et 0,09.

Les résultats sont présentés sous forme de lignes de courant, d'isothermes et de nombres de Nusselt locaux et moyens.

#### IV.4. Influence du nombre de Rayleigh thermique:

Les figures IV.1 à IV.4 présentent les isothermes et les lignes de courant pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh thermique et de la fraction volumique de nanoparticules. On remarque que ces isothermes et lignes de courant sont symétriques par rapport au plan vertical médian fictif. Ces figures montrent que le régime de l'écoulement est monocellulaire : du côté gauche du plan de symétrie, l'écoulement tourne dans le sens trigonométrique, tandis que du côté droit, il tourne dans le sens inverse. Le fluide se déplace vers le haut le

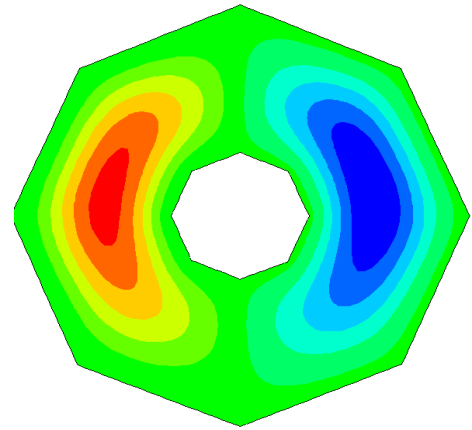
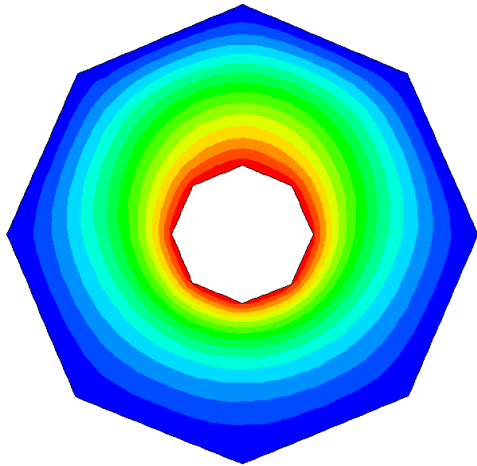
long de la paroi chaude interne sous l'effet de la poussée d'Archimède, puis redescend au voisinage de la paroi froide externe.

Pour  $Ra = 10^3$ , la convection laminaire est faible. La figure IV.1 montre que l'écoulement s'organise en deux cellules principales tournant lentement dans des sens opposés. Les isothermes sont des courbes fermées et concentriques, épousant les contours des parois. La distribution de température y est simplement décroissante de la paroi chaude vers la paroi froide. Le transfert thermique s'effectue principalement par conduction, malgré des vitesses d'écoulement non nulles. Les valeurs de la fonction de courant sont très faibles

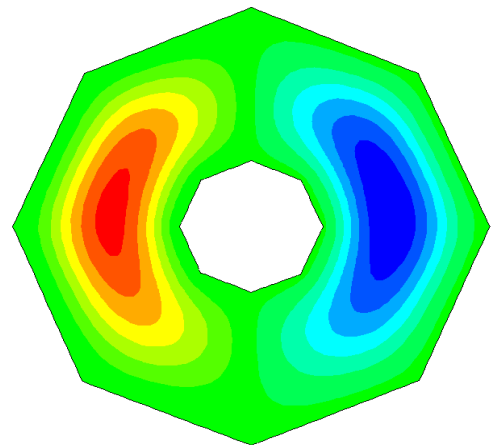
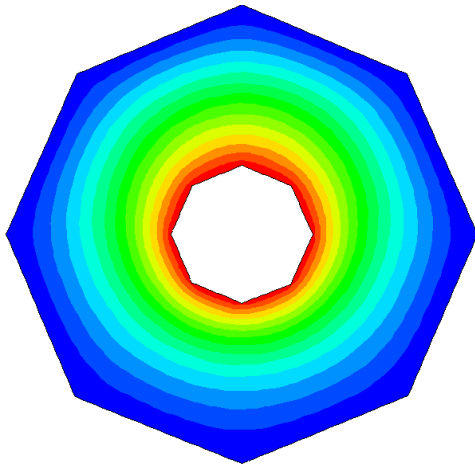
Lorsque  $Ra = 10^4$  (figure IV.2), les isothermes se déforment de façon symétrique par rapport à l'axe vertical, et leur forme change sensiblement. Les valeurs de la fonction de courant augmentent également, indiquant une intensification de la convection, bien que celle-ci reste modérée, comme le confirme l'allure encore régulière des isothermes.

Pour  $Ra = 10^5$  (figure IV.3), les isothermes se modifient davantage et adoptent une forme caractéristique en « champignon ». La température décroît toujours de la paroi chaude vers la paroi froide. La déformation des isothermes suit le sens de rotation des lignes de courant. En régime laminaire, sous l'effet du mouvement des particules qui s'élèvent depuis la paroi chaude au niveau de l'axe de symétrie, les isothermes se bombent et s'éloignent localement de la paroi. Les valeurs accrues de la fonction de courant traduisent une convection plus intense. Par ailleurs, la présence de nanoparticules entraîne une accumulation d'isothermes près de la paroi chaude, traduisant une amélioration du transfert de chaleur.

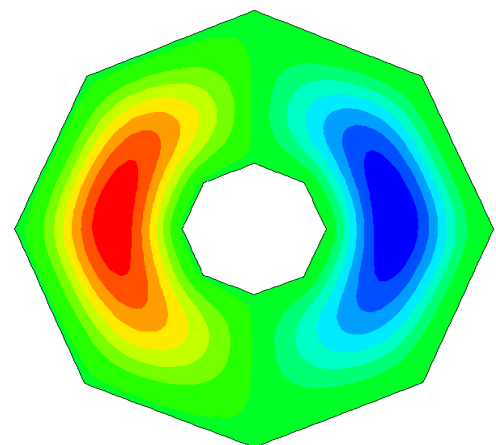
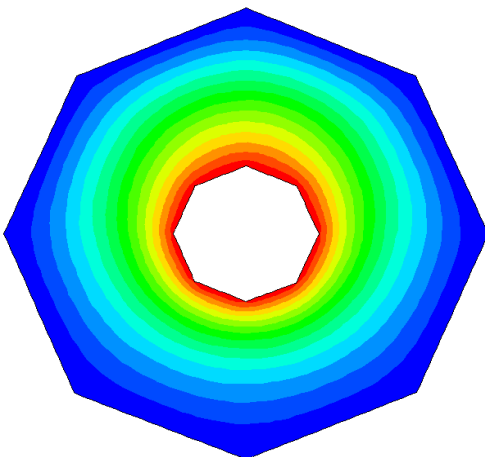
Enfin, pour  $Ra = 3 \times 10^5$ , les isothermes conservent leur forme de champignon, mais à une échelle plus grande, et deviennent nettement stratifiées. Les couches limites thermiques s'amincissent. En comparant les isothermes pour différentes valeurs de Ra, on observe qu'une augmentation du nombre de Rayleigh entraîne un resserrement des isothermes près de la paroi inférieure chauffée. Cela signifie que les gradients de température augmentent à proximité de cette paroi, ce qui implique une intensification du transfert thermique à travers l'enceinte pour des valeurs plus élevées de Ra.



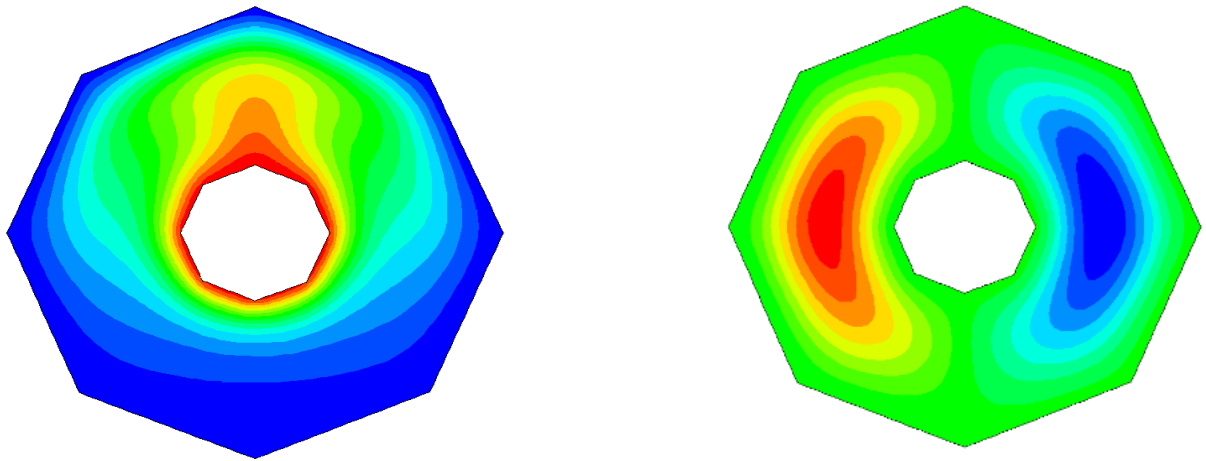
$\Phi=0.03$



$\Phi=0.06$

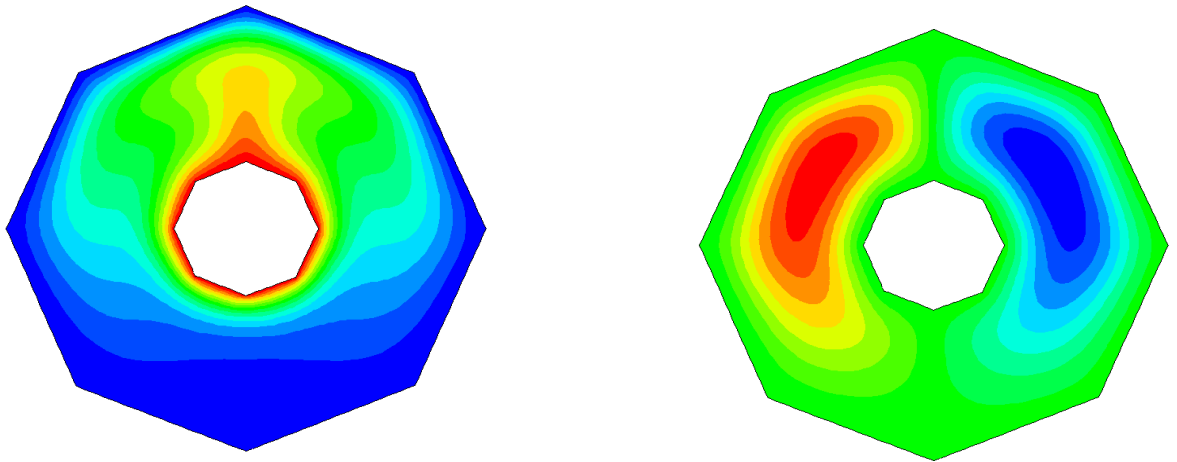


$\Phi=0.09$

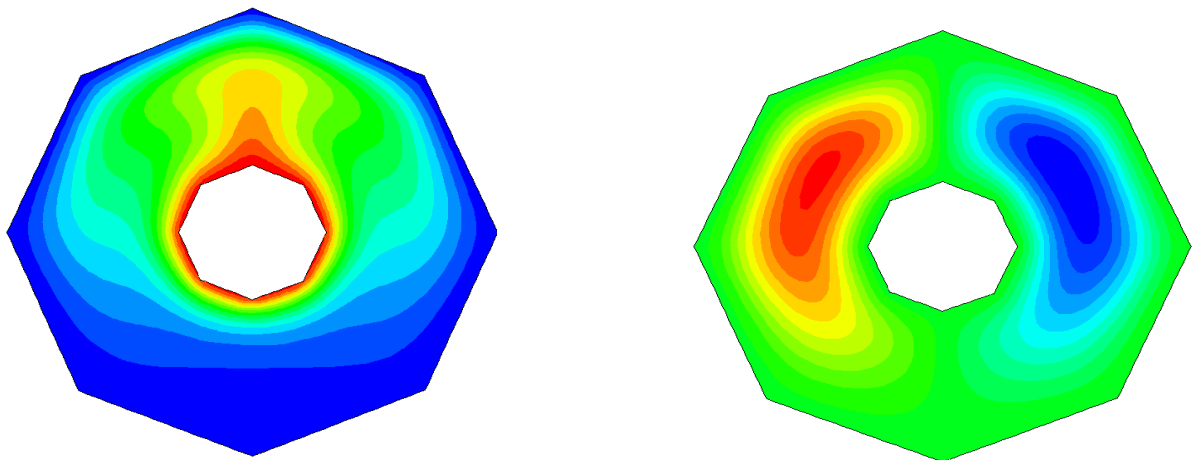


**Fig. IV.1.** Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque  $Rat=10^3$

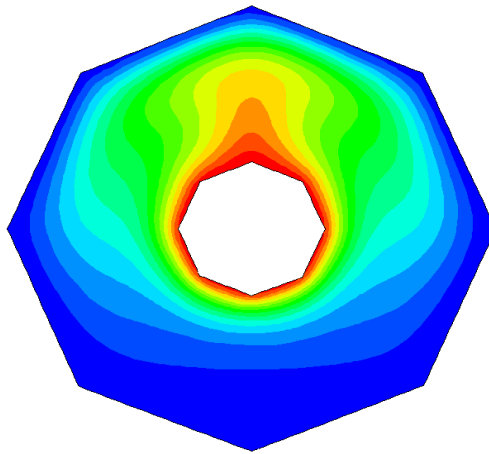
**Phi=0**



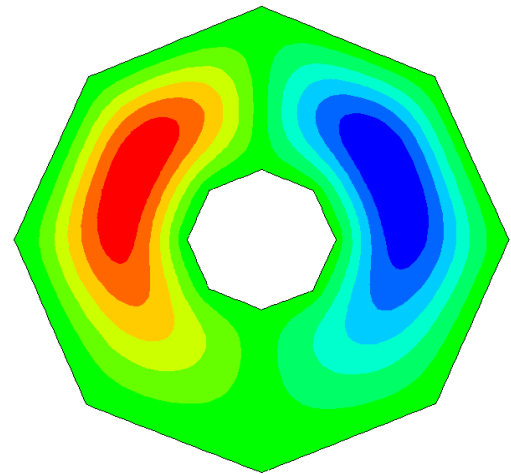
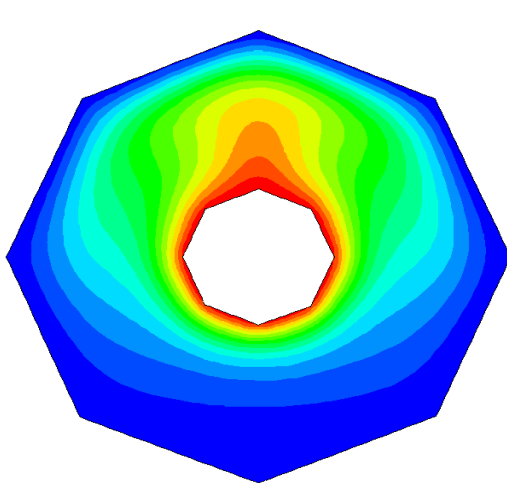
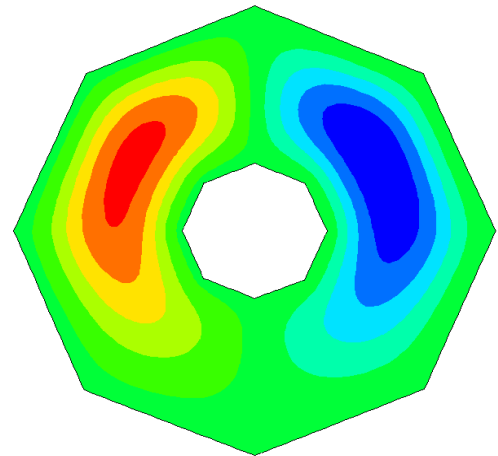
**Phi=0.03**



**Phi=0.06**

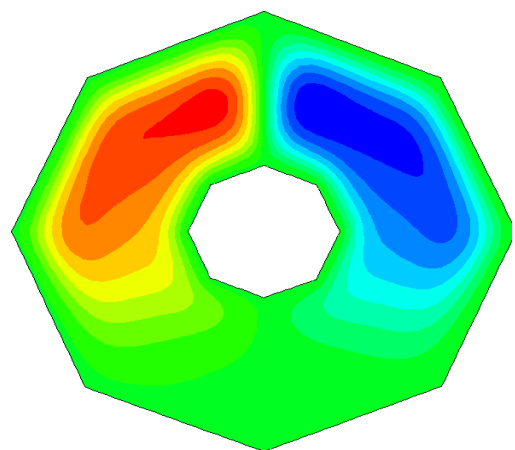
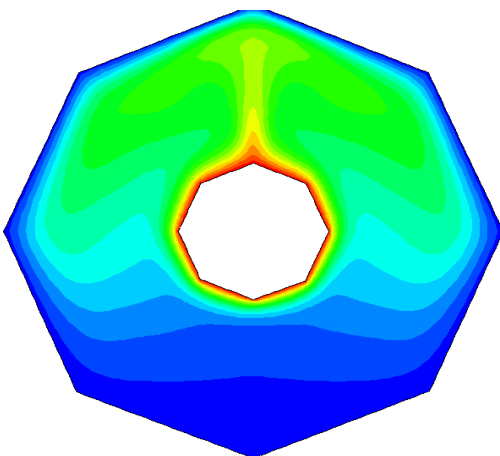


$\Phi=0.09$

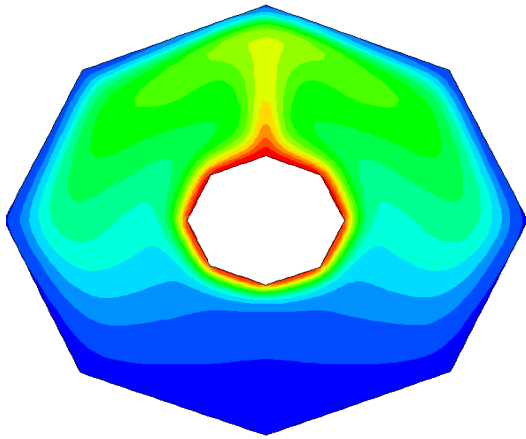


**Fig. IV.2.** Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque  $Rat=10^4$

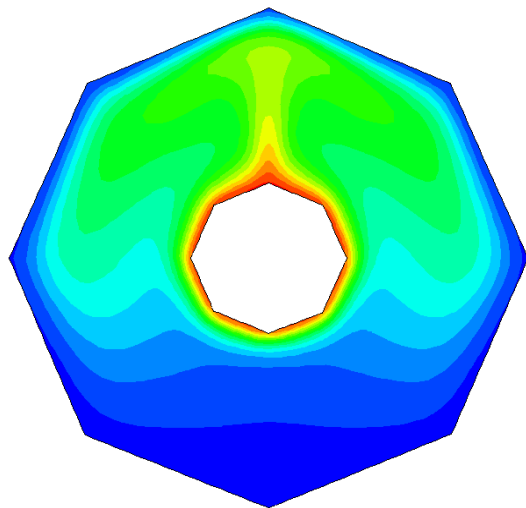
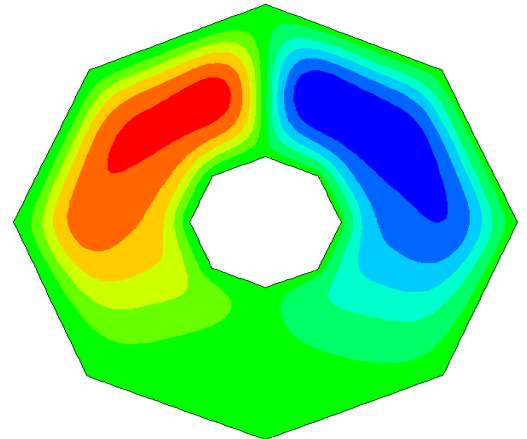
$\Phi=0$



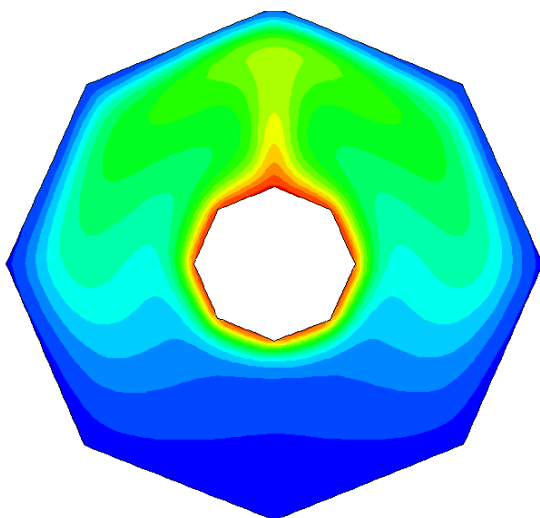
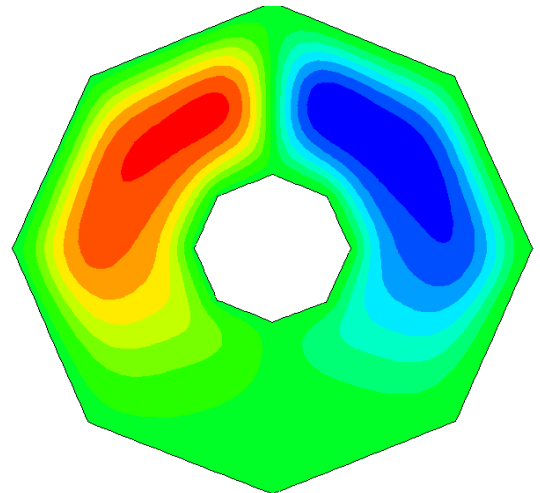
$\Phi=0.03$



$\Phi=0.06$



$\Phi=0.09$

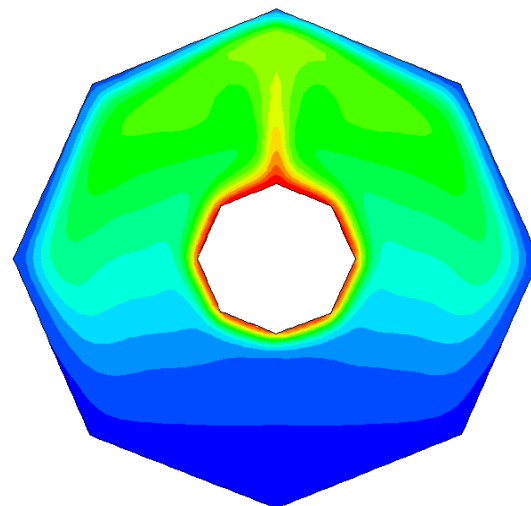
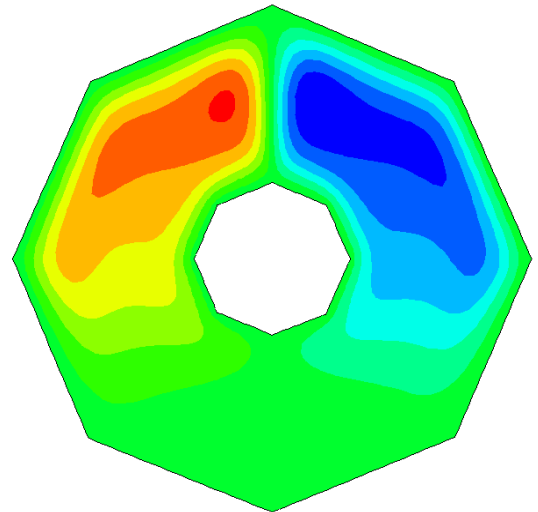


$\Phi=0$

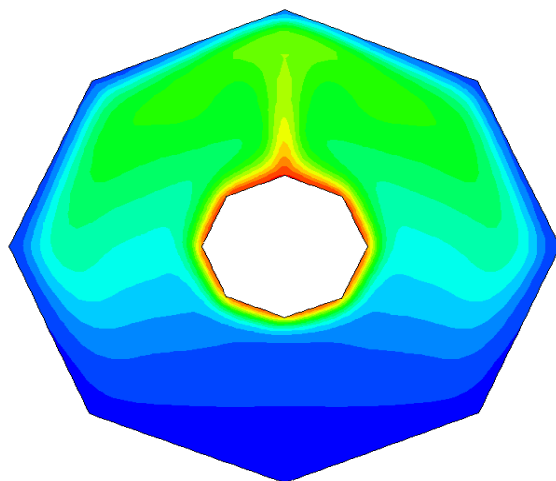
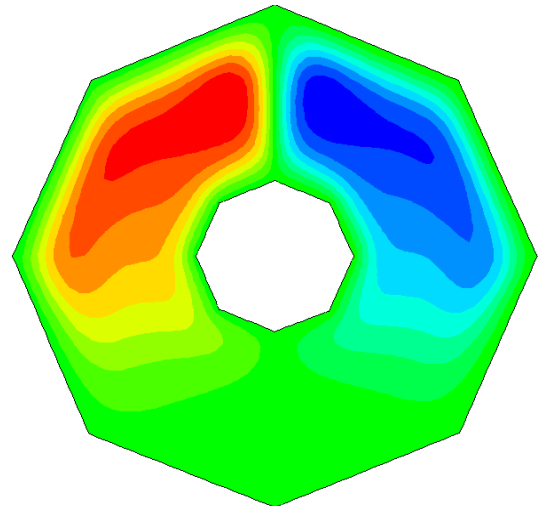
**Fig. IV.3.** Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque  $Rat=10^5$



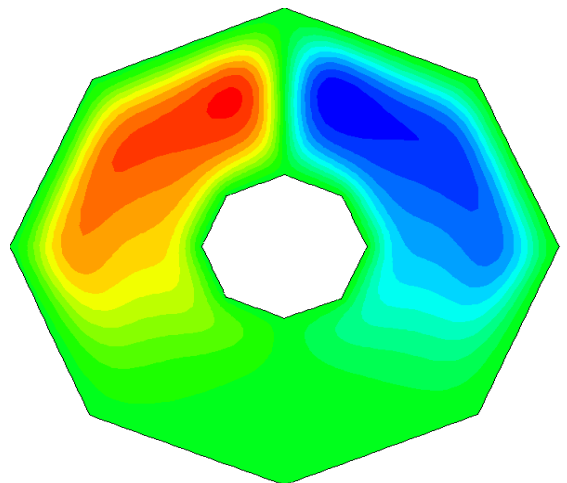
$\Phi=0.03$

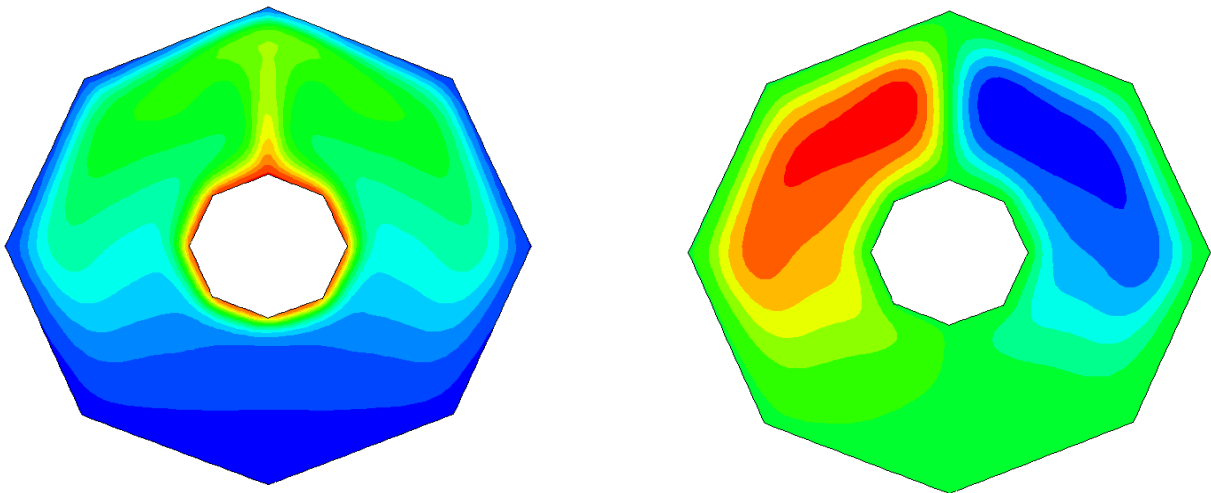


$\Phi=0.06$



$\Phi=0.09$





**Fig.IV.4.** Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque  $Rat=3.10^5$

#### IV.5. Nombre de Nusselt :

Les courbes représentant la variation des nombres de Nusselt locaux en fonction de la distance le long des parois des cylindres polygonaux externes et internes (respectivement  $A_o, B_o, C_o, D_o$  et  $E_o$ , ainsi que  $A_i, B_i, C_i, D_i$  et  $E_i$ ) pour différentes fractions volumiques de nanoparticules, et pour des nombres de Rayleigh thermiques de  $10^4$  et  $10^5$ , sont présentées dans les figures IV.5 et IV.6. Une source de température uniforme est appliquée aux parois intérieures du polygone, lesquelles sont confinées dans une enceinte polygonale.

On observe que les profils des nombres de Nusselt locaux présentent une superposition générale pour les différentes configurations. Cependant, les valeurs du nombre de Nusselt local pour le nanofluide sont systématiquement supérieures à celles obtenues avec de l'eau pure. Cette amélioration est attribuée à la conductivité thermique accrue du nanofluide, qui intensifie le transfert de chaleur par diffusion à travers la paroi interne.

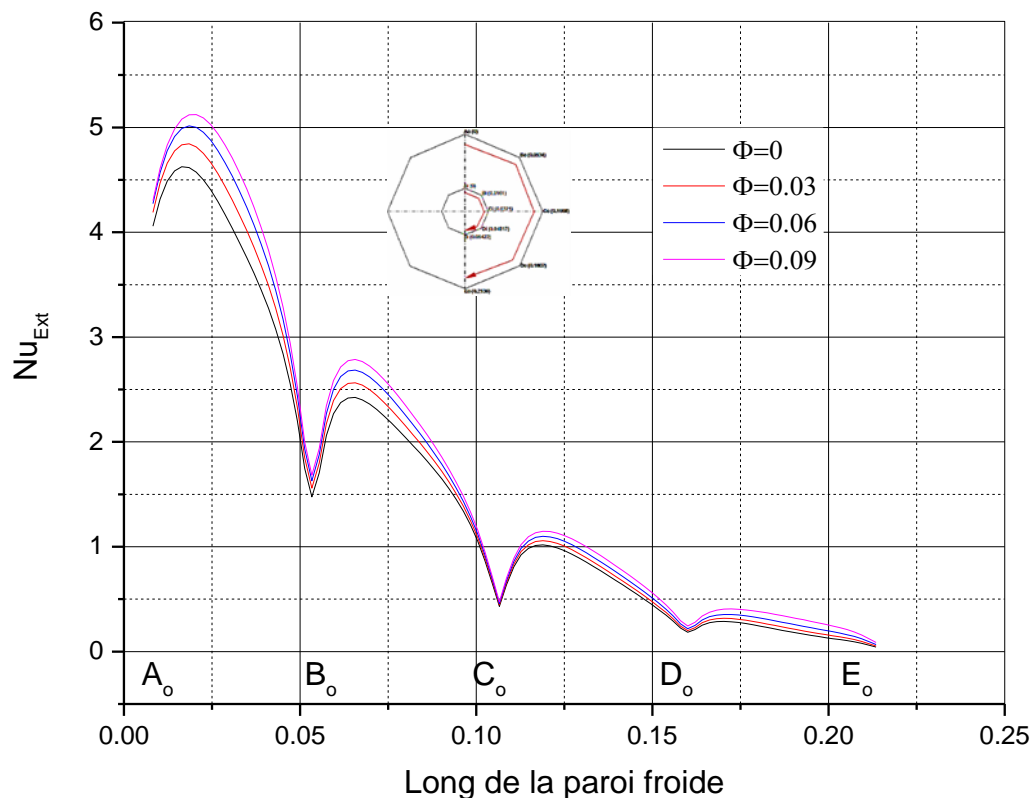
##### IV.5.1. Variation du nombre de Nusselt local sur la paroi de la cavité extérieure :

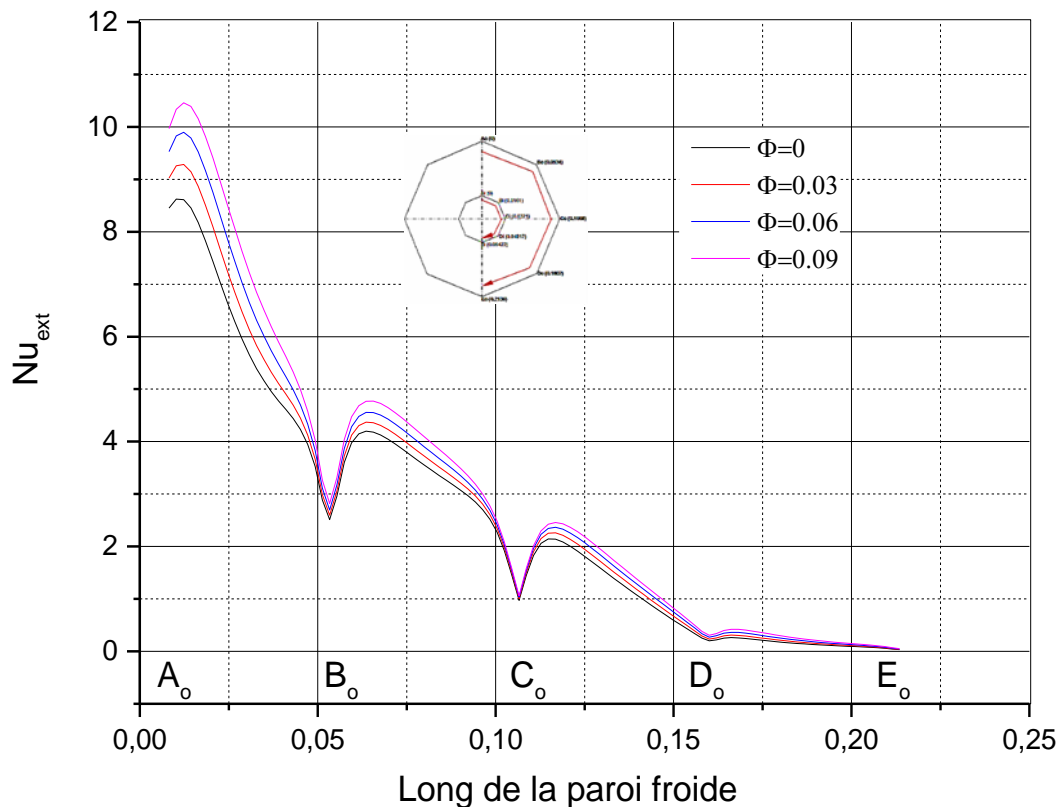
Pour les nombres de Rayleigh thermiques  $10^4$  et  $10^5$ , les valeurs du nombre de Nusselt local augmentent sous l'effet combiné de la convection thermique et de la fraction volumique des nanoparticules, comme l'illustre la figure IV.5. En examinant cette figure, on observe que  $Nue$  commence à une certaine valeur au niveau du sommet supérieur du polygone externe (point  $A_o$ ), puis croît pour atteindre un maximum le long du côté  $A_o-B_o$ , à proximité du point  $A_o$ . Cette augmentation s'explique par l'influence directe de la source de chaleur située sur la paroi interne, ainsi que par la formation de petits tourbillons près du cylindre interne.

Le nombre de Nusselt local diminue ensuite progressivement le long de la paroi, atteignant une valeur minimale à proximité du point  $E_o$ , dans la zone inférieure du polygone externe, où le fluide est pratiquement immobile. On remarque un comportement opposé sur la paroi interne : les variations du nombre de Nusselt  $y$  sont inversées. Ce phénomène est systématique, indépendamment de la géométrie, et peut être expliqué par la distribution des lignes isothermes et des lignes de courant.

En effet, lorsqu'un point de la paroi se situe entre deux tourbillons contrarotatifs, le nombre de Nusselt local est minimal si le fluide s'éloigne de la paroi, et maximal lorsqu'il s'en rapproche. Le même comportement est observé sur les côtés  $Bo-Co$  et  $Co-Do$ , où  $Nu_{Ext}$  croît puis décroît, jusqu'au point  $Do$ . Enfin, entre les points  $Do$  et  $Eo$ , les valeurs du nombre de Nusselt deviennent presque nulles, correspondant à la région inférieure du polygone externe, où le fluide reste quasiment stationnaire.

#### A) $Ra=10^4$



B)  $Ra=10^4$ 

**Fig. IV. 5.** Evolution du nombre de Nusselt local le long de la paroi de la cavité externe

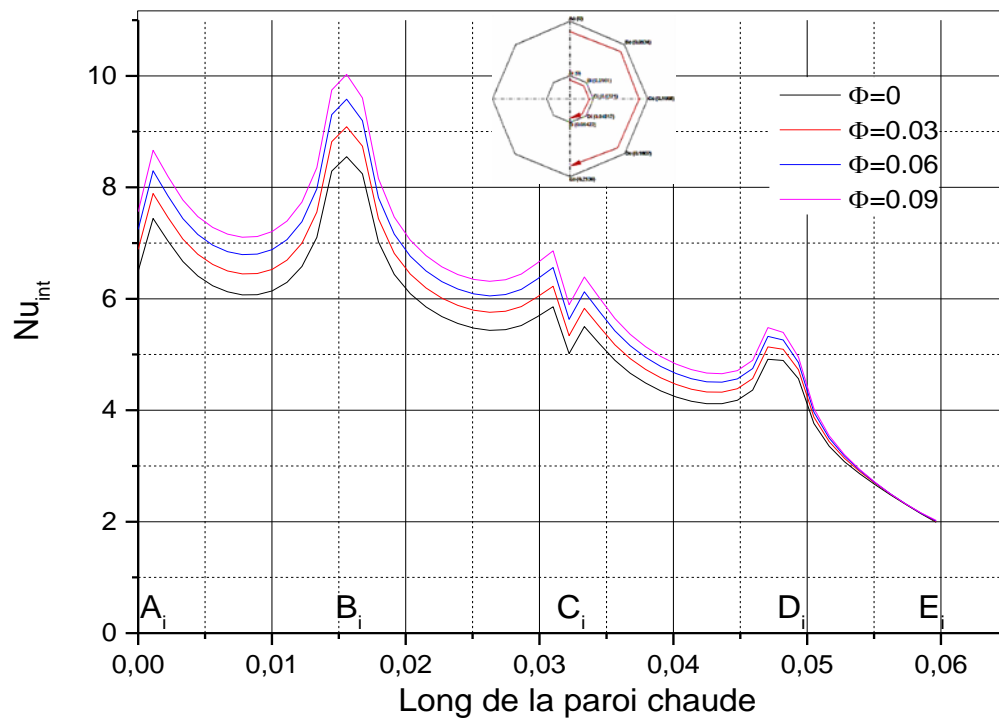
#### IV.5. 2. Variation du nombre de Nusselt local sur la paroi du transformateur

##### intérieur

La figure IV.6 illustre la distribution du nombre de Nusselt local le long des côtés du polygone interne ( $A_i-B_i$ ,  $B_i-C_i$ ,  $C_i-D_i$  et  $D_i-E_i$ ). Cette distribution met en évidence que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules intensifie la convection naturelle, entraînant une hausse des valeurs du nombre de Nusselt local.

On observe également que  $Nu_{i\_Nui}$  atteint sa valeur maximale au point  $B_i$ , avant de décroître progressivement jusqu'à atteindre un minimum dans la partie inférieure du polygone interne, où le fluide reste pratiquement immobile. Cette variation est directement liée à l'interaction entre le mouvement du fluide, les gradients de température et la configuration géométrique du système

A)  $Ra=10^4$



B)  $Ra=10^5$

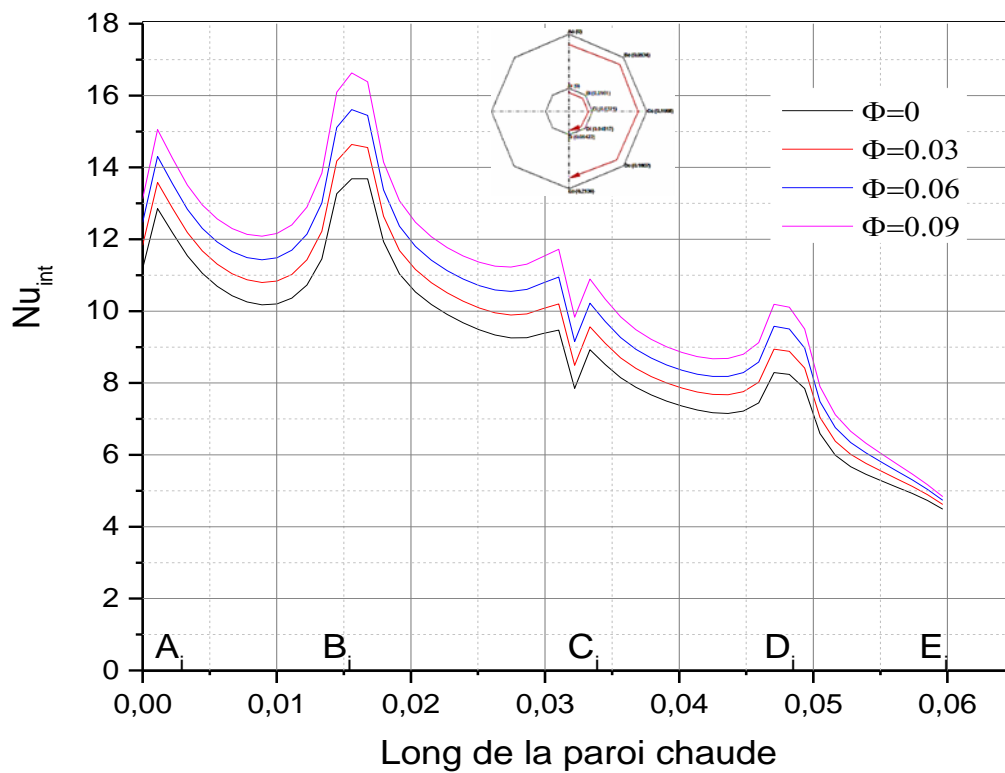
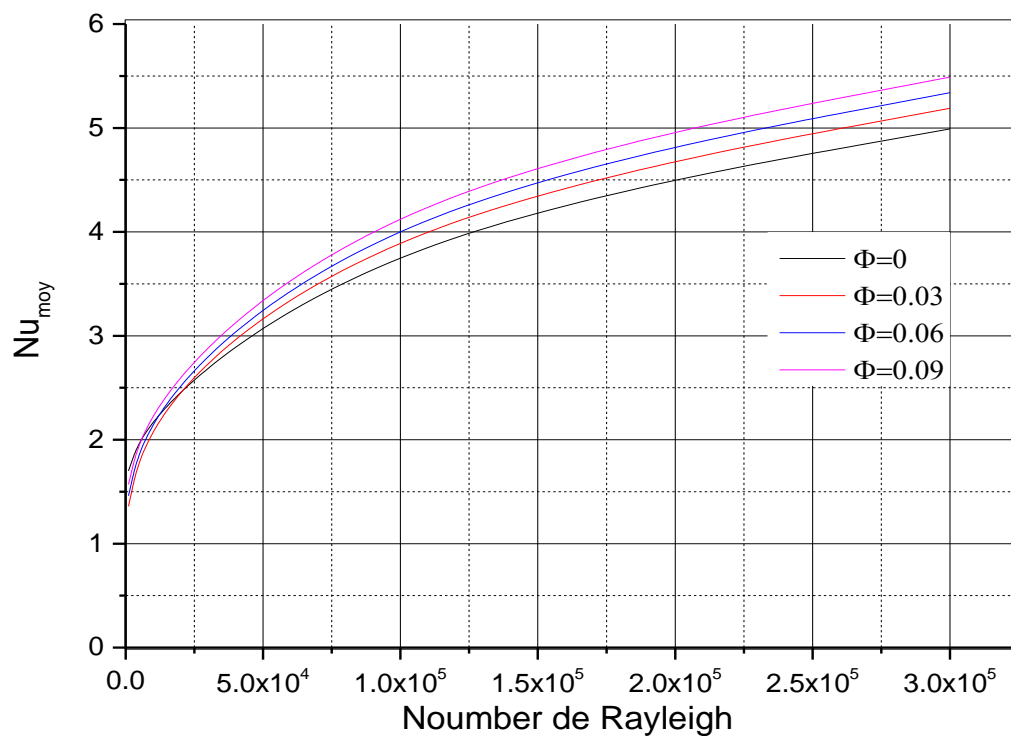


Fig. IV. 6. Evolution du nombre de Nusselt local le long de la paroi interne

### VI. 5. 3. Nombre du Nusselt moyen :

La figure IV.7 présente l'évolution du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh thermique, pour différentes fractions volumiques de nanoparticules. On observe que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules entraîne une hausse du nombre de Nusselt moyen. Cette amélioration est attribuée à l'augmentation de la conductivité thermique effective du nanofluide, ce qui favorise un meilleur transfert thermique à l'intérieur de la cavité par convection naturelle.



**Fig. IV. 7.** Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh thermique.

---

## *Conclusion générale*

---

Cette étude numérique a permis d'analyser l'effet de la convection naturelle dans une cavité formée de cylindres hexagonaux concentriques, remplie d'un nanofluide de type Cu-eau. Les simulations, réalisées à l'aide de la méthode des volumes finis sous l'approximation de Boussinesq, ont permis de mettre en évidence l'influence combinée du nombre de Rayleigh thermique et de la fraction volumique des nanoparticules sur le transfert de chaleur.

Il ressort que l'augmentation du nombre de Rayleigh intensifie significativement la convection naturelle, entraînant une déformation plus marquée des isothermes et un accroissement de la circulation du fluide. De plus, l'ajout de nanoparticules améliore la conductivité thermique du fluide, ce qui se traduit par une augmentation des nombres de Nusselt locaux et moyens. Cette amélioration est particulièrement notable dans les zones de forte activité convective, tandis que les zones de fluide quasi-stationnaire conservent des valeurs faibles.

Les résultats confirment que l'utilisation de nanofluides dans des configurations complexes permet d'optimiser le transfert thermique, en particulier dans les systèmes à géométries confinées. Ces observations sont utiles pour la conception de dispositifs thermiques plus performants, notamment dans les domaines du refroidissement passif et des échangeurs de chaleur compacts.

Cette étude apporte une contribution significative à la compréhension des

mécanismes de transfert thermique par convection naturelle dans des cavités remplies de nanofluides. Toutefois, elle souligne également la nécessité de poursuivre les investigations afin d'approfondir et d'optimiser ces phénomènes. Parmi les pistes de recherche prioritaires à explorer, on peut citer :

- Étudier l'effet des différentes formes, tailles et matériaux des nanoparticules, tels que le graphène, l'alumine ( $Al_2O_3$ ) ou le dioxyde de titane ( $TiO_2$ ), sur le transfert thermique dans des cavités aux géométries complexes. Cela permettra d'identifier les configurations optimales pour améliorer l'efficacité thermique des nanofluides.
- Intégrer l'impact des champs magnétiques ou électriques sur la convection naturelle dans les nanofluides, afin de mieux contrôler et moduler le transfert de chaleur. Ce contrôle externe pourrait ouvrir la voie à des applications innovantes dans le domaine du refroidissement et de la gestion thermique.

## Résumé

Une étude numérique de la convection naturelle laminaire à l'état stationnaire a été réalisée dans des cylindres hexagonaux concentriques, où le cylindre interne est chauffé et le cylindre extérieur maintenu froid. Cet espace est parcouru par un nanofluide Cu-eau, étudié pour différents nombres de Rayleigh et différentes fractions volumiques de nanoparticules. Le système d'équations gouvernant le problème a été résolu numériquement à l'aide du logiciel Fluent, basé sur la méthode des volumes finis, en s'appuyant sur l'approximation de Boussinesq. Les surfaces intérieure et extérieure sont maintenues à température constante. L'étude couvre des nombres de Rayleigh allant de  $10^3$  à  $3 \times 10^5$ . Nous avons analysé l'effet des nombres de Rayleigh et des fractions volumiques des nanoparticules sur la convection naturelle. Les résultats sont présentés sous forme d'isothermes, de lignes de courant et de nombres locaux et moyens de Nusselt. Le but de cette étude est de déterminer l'influence du nombre de Rayleigh thermique et de la fraction volumique des nanoparticules sur le taux de transfert de chaleur.

**Mots clés** : convection naturelle, nombres de Rayleigh, nano fluide, fraction volumique.

## Abstract

A numerical study of steady-state laminar natural convection was conducted in concentric hexagonal cylinders, where the inner cylinder is heated and the outer cylinder is maintained cold. The cavity is filled with a Cu-water nanofluid, analyzed for various Rayleigh numbers and different nanoparticle volume fractions. The governing equations were solved numerically using the Fluent software, based on the finite volume method, and employing the Boussinesq approximation. The inner and outer surfaces are maintained at constant temperatures. The study covers Rayleigh numbers ranging from  $10^3$  to  $3 \times 10^5$ . The effects of Rayleigh number and nanoparticle volume fraction on natural convection were investigated. Results are presented in terms of isotherms, streamlines, and local and average Nusselt numbers. The main objective of this study is to determine the influence of the thermal Rayleigh number and nanoparticle volume fraction on the heat transfer rate.

**Key words**: natural convection, Rayleigh numbers, Nano fluid, volume fraction.

## ملخص

تم اجراء دراسة عددية لعملية الحمل الحراري الطبيعي في حالة استقرار وانتظام في تجاويف اسطوانية سداسية متحدة المركز ، حيث يتم تسخين الأسطوانة الداخلية بينما تبقى الأسطوانة الخارجية باردة. تم ملء التجويف بسائل نانوي من نوع نحاس ماء، وتمت دراسة تأثير اعداد رايلي المختلفة وكذلك نسب حجمية مختلفة للجسيمات النانوية. تم حل نظام المعادلات الحاكمة للمشكلة عدديا باستخدام برنامج فلوانت المستند الى طريقة الحجوم المنتهية، مع اعتماد تقريب بوسيناسك. كما تم الحفاظ على درجات حرارة ثابتة للأسطح الداخلية والخارجية. شملت الدراسة اعداد رايلي تم تحليل عدد رايلي والنسبة الحجمية للجسيمات النانوية على عملية الحمل الحراري الطبيعي. تم عرض النتائج على شكل خطوط تساوي درجة الحرارة، وخطوط التيار، وكذلك اعداد نوسلت المحلية والمتوسطة. الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو تحديد تأثير رايلي الحراري والنسبة الحجمية للجسيمات النانوية على معدل انتقال الحرارة.

**الكلمات المفتاحية:** الحمل الحراري الطبيعي، أعداد رايلي، السوائل النانوية، التركيز