

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



FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT PHYSIQUE

N° : Ph/ENR/13/2023

DOMAINE : Sciences de la matière

FILIERE : Physique

**OPTION : Physique Énergétique et
Energie renouvelable**

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Réalisé Par :

LATTOUI Kheir eddine

REFICE Abdelghafar

Intitulé

**Etude numérique de la convection naturelle
avec nano-fluides, entre un transformateur à
l'intérieur et un réservoir fermé à l'extérieur**

Soutenu le 20 / 06 /2023 devant le jury composé de:

SALMI Mohamed

Université de M'sila

Président

BOURAS Abd elkarim

Université de M'sila

Rapporteur

AMROUNE Amina

Université de M'sila

Co-rapporteur

BENDERRADJI Razik

Université de M'sila

Examinateur

TAA LOUB Djedid

Université de M'sila

CATI

Année universitaire : 2022/2023

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 **Dr. SALMI Mohamed** pour avoir accepté de présider le jury, nous tenons à exprimer nos remerciements **au Dr. TAALOUB Djedid, Dr. BENDERRADJI Razik, 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 des transferts de chaleur laminaire à l'état stationnaire dans un réservoir fermé entre un transformateur interne chauffé et un réservoir extérieur froid. Cette espace est parcourue par un nanofluide BaTiO₃ – Ester. Pour différents nombre de Rayleigh et différents fraction volumique des nanoparticules. Le système d'équations gouvernant le problème a été résolu numériquement par le code de calcul Fluent basé sur la méthode des volumes finis. En se basant sur l'approximation de Boussinesq. Les surfaces intérieure et extérieure sont maintenues à la température constante. L'étude est réalisée pour les nombres de Rayleigh allant de 10³ à 10⁶. Nous avons étudié les effets des différents nombres de Rayleigh et fraction volumique des nanoparticules sur la convection naturelle. Les résultats sont présentés sous forme des isothermes, des isocourants, et des nombres locaux et moyens de Nusselt. Le but de cette étude est de voir l'influence du nombre de Rayleigh thermique, et 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 the natural convection of stationary laminar heat transfers in a closed tank between a heated internal transformer and a cold external tank. This space is traversed by a BaTiO₃ – Ester nanofluid. For different Rayleigh number and different volume fraction of nanoparticles. The system of equations governing the problem was solved numerically by the Fluent computer code based on the finite volume method. Based on the Boussinesq approximation. The interior and exterior surfaces are kept at a constant temperature. The study is carried out for Rayleigh numbers ranging from 10³ to 10⁶. We have studied the effects of different Rayleigh numbers and volume fraction of nanoparticles on natural convection. The results are presented in the form of isotherms, isocurrents, and local and mean Nusselt numbers. The purpose of this study is to see the influence of the thermal Rayleigh number, and volume fraction of the nanoparticles on the rate of heat transfer.

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

ملخص:

قمنا بدراسة عددية لظاهرة الحمل الحراري الطبيعي عن طريق إنتقال الحرارة داخل خزان مغلق بين محول داخلي ساخن وخزان خارجي بارد (الجدار الخارجي للخزان) يتم عبور هذا الفضاء بواسطة سائل نانوي من الاستر وتيتانات الباريوم لعدد رايلي مختلف محصور بين 10³ و 10⁶ وتركيز مختلف للجسيمات النانوية ويعتمد حل معادلات الحركة والحرارة عدديا على البرنامج العددي فلوانت باستعمال تقريبات بوسيناسك . قمنا بدراسة تأثير عدد رايلي وتركيز الجسيمات النانوية على الحمل الحراري وكانت النتائج على شكل خطوط حرارية خطوط دالة التيار وأعداد نيسلت المحلية والمتوسطة. وكان الهدف هو دراسة تأثير رايلي وتركيز الجسيمات النانوية على معامل إنتقال الحرارة.

الكلمات المفتاحية:

الحمل الحراري الطبيعي، أعداد رايلي ، الموائع النانوية ، التركيز الحجمي .

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
Introduction général	
Chapitre I : I.1. Synthèse bibliographique.....	1
I.1 Introduction.....	1
I.2. Synthèse bibliographique.....	2
Références.....	5
Chapitre II : Généralités sur le transfert de chaleur et les Nano fluides.....	7
II.1. Généralité sur le transfert de chaleur.....	7
II.1.1 Introduction.....	7
II.1.2 Transfert de chaleur par rayonnement.....	8
II.1.3 Transfert de chaleur par conduction.....	8
II.1.4 Transfert de chaleur par convection.....	9
II.1.4.1. convection naturelle.....	10
II.1.4.2. convection forcée.....	11
II.1.4.3. convection mixte.....	11

II.2. Généralité sur les Nano-fluides.....	11
II.2.1. Introduction.....	11
II.2.2. Définition nano-fluides.....	12
II.2.3. Préparation des nano fluide.....	13
II.2.4. Applications des nano fluides.....	13
II.2.5. Avantage des nano fluides.....	14
II.2.6. Inconvénients des nano fluides.....	14
II.2.7. Nanoparticules et les fluides porteurs.....	14
II.2.8. Propriétés thermo physiques.....	15
Références.....	20
Chapitre III : Formulation Mathématique et Numérique.....	22
III.1. Mise en équation du problème.....	22
III.1.1. Modèles physique.....	22
III.1.2. Modèle mathématique.....	23
III.1.2.1. Equations générales.....	24
III.1.2.1.1. Equation de continuité.....	24
III.1.2.1.2. Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes).....	24
III.1.2.1.3. Equation de l'énergie.....	25
III.1.3. Formulation indicielle.....	26
III.1.4. Equations de bilan.....	26
III.1.5. Modèle mathématique et équations adimensionnelles.....	26
III.1.6. Condition aux limites.....	28
III.1.7. Calcul du nombre de Nusselt.....	29
III.2. Approche numérique.....	29
III.2.1. Introduction.....	29

III.2.2. Etude de maillage.....	32
III.2.3. Conditions initiales et conditions aux limites : CL (CFD FLUENT).....	32
III.2.4. Discrétisation et Résolution	33
III.2.5. Calcul de la vitesse sur les faces	33
III.2.6. Calcul de la pression sur les faces	34
III.2.7. Couplage pression-vitesse.....	34
III.2.8. Sous-relaxation	35
III.2.9. Résolution	35
III.2.10. Conclusion	36
Références.....	37
Chapitre IV : Résultats et Discussion.....	39
IV.1. Introduction	39
IV.2. Influence du nombre de Rayleigh thermique.....	40
IV.3. Nombre de Nusselt	45
IV.3.1. Variation du nombre de Nusselt local sur la paroi de la cavité carrée extérieur	45
IV.3.2. Variation du nombre de Nusselt local sur la paroi du transformateur intérieur	48
IV.3.3. Nombre du Nusselt moyen.....	50
Conclusion générale.....	52
Résumé	

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	Emittance [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 _c	La température de paroi chaude
T _f	La température de paroi froide
$\frac{dT}{dx}$	Gradient de température.
$\frac{dE}{dt}$	La variation de l'énergie interne.
V_p	Volume des particules solides [m^3]
V_T	Volume totale [m^3]
\vec{F}	les forces volumiques.

Symbole grecs

α	La diffusivité thermique ($m^2 s^{-1}$).
β	Coefficient d'expansion thermique (k^{-1}).
β_p	Coefficient d'expansion thermique de nanoparticule (k^{-1}).
β_f	Coefficient d'expansion thermique de fluide (k^{-1}).
β_{nf}	Coefficient d'expansion thermique de nano fluide (k^{-1}).
β_{nfh}	Coefficient d'expansion thermique de nano fluide hybride (k^{-1}).
φ	La fraction volumique
μ	La viscosité dynamique ($N.s. m^{-2}$).
μ_f	La viscosité dynamique du fluide de base
μ_{nf}	La viscosité dynamique du nano fluide.
μ_{nfh}	La viscosité dynamique du nano fluide.
ρ_f	Masse volumique du fluide
ρ_p	Masse volumique de la nanoparticule.
ρ_{nf}	Masse volumique du nano fluide.
ρ_{nfh}	Masse volumique du fluide
λ	Conductivité thermique du milieu ($W. m^{-1} K^{-1}$).
Φ	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 présentatif de transfert convectif.....	10
Fig II .2: Principe physique de la convection naturelle	10
Fig II .3: Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre à 0,5 % ; eau + alumine ; eau + or à 2 nm.....	12
Fig II .4: Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape.....	13
Fig III.1. Modèle physique... ..	23
Fig III.2. Représentation schématique des générations a) modèle physique, b) grille	30
Fig III.3. Etapes de résolution suivies par GAMBIT et FLUENT.....	31
Fig III.4. Convergence avec raffinement du maillage à $Ra_t = 10^4$ le long du cylindre thermique interne à partir du nombre de Nusselt moyen	32
Fig III.6. Evolution des résidus pour un canal vertical remplie de nanofluide (MO-BaTiO ₃) ($\varphi = 0.01, Ra_t = 10^5$)... ..	34
Fig III.7. Système d'itération	36
Fig IV.1. Ligne de courant (moitié gauche) et isothermes (moitié droite) à $Ra_t=10^3$	41
Fig IV.2. Ligne de courant (moitié gauche) et isothermes (moitié droite) à $Ra_t=10^4$	42
Fig IV.3. Ligne de courant (moitié gauche) et isothermes (moitié droite) à $Ra_t=10^5$	43
Fig IV.4. Ligne de courant (moitié gauche) et isothermes (moitié droite) à $Ra_t=10^6$	45
Fig.IV.5. Evolution du nombre de Nusselt local le long de la paroi externe.....	47
Fig. IV.6. Evolution du nombre de Nusselt local le long de la paroi interne.....	50
Fig. IV.7. Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh thermique.....	51

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Propriétés thermophysiques du fluide de base et des nanoparticules de BaTiO ₃	27
Tableau III.2 : Critères de résolution et coefficients de sous-relaxation utilisés.....	35



Introduction générale

Introduction générale

Le transformateur est l'âme des systèmes de transmission et de distribution. Il effectue une conversion basse tension en haute tension dans les lignes de transmission et une conversion similaire haute tension en basse tension dans les lignes de distribution.

Refroidissement du transformateur est le processus par lequel la chaleur générée dans le transformateur est dissipé ou traité à la valeur de sécurité. Ceci est réalisé par diverses méthodes de refroidissement du transformateur disponibles. Le facteur principal pour la génération de chaleur dans le transformateur est constitué par les pertes diverses telles que l'hystérésis, les courants de Foucault, le fer et le cuivre. Parmi toutes les pertes, le principal contributeur à la production de chaleur est la perte de cuivre.

Si la température du transformateur sera continuée à augmenter rapidement, il en résultera une dégradation de l'isolation utilisée dans le transformateur, endommageant les différentes pièces et, partant, une défaillance du transformateur.

Ainsi, une élimination ou un traitement approprié de la chaleur est nécessaire pour un fonctionnement efficace, une durée de vie prolongée et une efficacité supérieure du transformateur.

Les divers liquides de refroidissement utilisés pour le refroidissement du transformateur sont l'air, les huiles synthétiques, les huiles minérales, le gaz et l'eau.

Fondamentalement, il y a deux types de transformateur l'un est le type sec et un autre est type immergé dans l'huile. Pour le refroidissement des transformateurs, les méthodes de refroidissement énumérées ci-dessous sont utilisées :

- ✓ Air Naturel (AN).
- ✓ Air forcé (AF) ou souffle d'air.
- ✓ Huile Naturelle Air Naturel (ONAN).
- ✓ Huile naturelle à air forcé (ONAF).
- ✓ Huile forcée à air forcé (OFAF).
- ✓ Huile Naturelle Eau Forcée (ONWF).
- ✓ Huile forcée (OFWF).

Les huiles utilisées à des fins de réfrigérants sont les hydrocarbures de produits pétroliers à base de paraffine (ou) de naphta. L'huile utilisée comme liquide de refroidissement est fabriquée à partir d'huile minérale hautement raffinée et possède une rigidité diélectrique élevée. Pendant le fonctionnement du transformateur, il se produit une variation de température dans l'huile qui entraîne une réduction de la rigidité diélectrique avec des émissions de gaz dissous comme le soufre, l'humidité, etc. L'huile minérale utilisée dans le système existant est le matériau dominant utilisé, mais la conductivité thermique est moindre. La propriété isolante du transformateur fournit de mauvais résultats en utilisant un milieu de refroidissement à l'huile. Ainsi, pour obtenir le meilleur refroidissement, les chercheurs ont introduit de l'huile à base de nano, appelée "Nanofluides". Un nanofluide a beaucoup séduit dans le domaine de la recherche et ses larges applications dans le domaine de l'ingénierie. C'est un mélange de particules solides de taille nanométrique et de fluide de base. Le rôle majeur des nanofluides est d'améliorer les paramètres électriques, physiques et chimiques du transformateur. Il existe différentes variétés de nanoparticules qui améliorent les propriétés électriques et physiques de l'huile de transformateur ; parmi les différentes nanoparticules disponibles figurent les particules d'alumine (Al_2O_3), l'oxyde de cuivre (CuO), l'oxyde de titane (TiO_2) etc. Ensuite, ses performances sont vérifiées par des simulations et des données expérimentales.

Dans ce travail, les effets de fraction volumique des nanoparticules, du nombre de Rayleigh Ra sur les nombres de Nusselt locaux et moyens, les lignes de courant et les isothermes sont étudiés numériquement pour un écoulement convectif naturel dans un système fermée remplies d'un nanofluide à base d'ester et de Titanate de barum , ce système comportant un transformateur chauffée immergé dans un nanofluide, ce dernier étant constitué d'un ester comme un fluide de base et de titanate de baryum sous forme de nanoparticules.

Notre étude est structurée en quatre chapitres, répartis comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à des généralités et une synthèse bibliographique des principaux travaux théoriques, expérimentaux et numériques ayant trait le refroidissement des transformateurs par des différents nanofluides.
- Le deuxième chapitre généralités sur le transfert de chaleur et les nano fluides.
- Le troisième chapitre formulation numérique ou nous avons étudié choix du maillage.

- Le quatrième chapitre, nous avons présenté les principaux résultats numériques de cette simulation, validé nos résultats ainsi que leurs interprétations et analyses.

Enfin, une conclusion générale clarifier les points essentiels et les résultats finales de notre étude.

Chapitre

I

Synthèse bibliographiques

I.1. Introduction

Parmi les nouvelles techniques face à l'amélioration de l'efficacité de refroidissement et d'isolation et à la conception de transformateurs électriques, contraintes par les technologies actuelles, l'une des plus prometteuses est la substitution des huiles diélectriques traditionnelles aux nanofluides.

Le but de ce chapitre est de présenter les dernières connaissances sur la refroidissement du transformateurs par les nanofluides et ses applications possibles, d'un point de vue théorique et expérimental.

I.2. Synthèse bibliographique

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, il est courant que les transformateurs de puissance électrique soient refroidis par de l'huile minérale. Cependant, ce type d'huile commence à être remplacé par des huiles d'origine naturelle (esters), pour des raisons environnementales et de sécurité incendie. Ces dernières sont biodégradables et ont un point d'inflammation bien supérieur à celui des huiles minérales. D'autre part, différents auteurs ont constaté que les propriétés diélectriques et réfrigérantes des huiles utilisées dans les transformateurs peuvent être améliorées lorsque certains types de nanoparticules sont ajoutés.

Par exemple, Suhaib Ahmad Khan et al [1] Ils ont étudié l'effet des nanoparticules sur les propriétés thermophysiques des huiles d'esters naturels purs (NE) et d'esters synthétiques (SE) avec une température variant une gamme de concentrations d'oxyde de graphène (GO) et de nanoparticules de TiO_2 a été utilisée dans l'étude pour améliorer les propriétés thermophysiques des huiles à base d'ester. Les résultats expérimentaux montrent que les nanoparticules ont un effet positif sur la conductivité thermique et la viscosité des huiles qui diminue avec une augmentation de la température, C. Méndez et al [2] Ils ont analysé 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 de puissance. Les résultats de l'étude thermique ont montré que seuls les nanofluides à base de maghémite présentaient des caractéristiques de transfert de chaleur améliorées par rapport à l'huile d'ester naturel, A.Santisteban et al [3] Leur travail présente les résultats obtenus par une recherche dans laquelle différents nanofluides, 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 les débits massiques dans les canaux internes des enroulements d'un transformateur de puissance réel, Muzafar Hussain et al [4]. Ont mené une série d'études de recherche qui implique la préparation de divers types de nanomatériaux et leur synthèse. Les performances des nanofluides comme la tension de claquage électrique, le test d'impulsion et le comportement diélectrique et thermique ont également été discutées en détail, Harsh Vaishnav et al [5] Ils ont utilisé des nanoparticules de zircon (ZrO₂) pour préparer des nanofluides .

Les résultats montrent une amélioration du refroidissement, de l'isolation et de la BDV due au ZrO_2 . Les performances optimales du nanofluide ont été obtenues pour une concentration de 0,2 g/L de nanoparticules de ZrO_2 dans l'huile du transformateur, Cristian Olmo et al [6]. Ils ont effectué une évaluation d'un nanomatériau diélectrique à base de TiO_2 végétal, et ses caractéristiques et son comportement ont été testés et comparés à un nanofluide de maghémite précédemment testé. Les résultats obtenus reflètent une affectation similaire des propriétés principales, avec une amélioration maximale de la tension de claquage de 33% à 0,5 kg/m³, en gardant la conductivité thermique et la viscosité presque constante, Dayal Ch Shill et al [7]. Les nanofluides ont été préparés à l'aide des nanoparticules de SiO_2 . Les résultats ont été comparés avec l'huile de base et ils ont constaté qu'avec l'augmentation de la concentration en nanoparticules dans l'huile de base, la conductivité thermique du nanofluide augmente. La résistance diélectrique de l'échantillon de nanofluide augmente également, Mushtaq I. Hasan [8]. Ils ont utilisé des nanofluides à base d'huile de transformateur comme fluide de refroidissement au lieu de l'huile de transformateur pure. Quatre types de particules solides (Cu , Al_2O_3 , TiO_2 et SiC) ont été utilisés pour composer des nanofluides. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de nanofluides à base d'huile de transformateur comme moyen de refroidissement au lieu d'huile de transformateur pure permet d'améliorer les performances de refroidissement du transformateur en réduisant la température du transformateur. Ali Khairallah Ali et al [9]. Ils ont ajouté d'un type de ces nanomatériaux à l'huile de transformateur et la production d'un nanofluide (Fe_3O_4 +Huile) avec différentes concentrations (0,2 %, 0,4 %, 0,6 %, p/v) et le second lors de l'ajout de plusieurs nanomatériaux et produisant un nanofluide hybride ($CuO+Al_2O_3+TiO_2$ +Huile) avec les mêmes concentrations.

Les tests ont montré que l'utilisation de nanoparticules (Fe_3O_4) conduit à une augmentation de l'efficacité de la conductivité thermique et diélectrique, et donc au refroidissement et à l'augmentation de l'efficacité du transformateur. Les meilleurs résultats étaient à une concentration de 0,6 % p/v, Vinit V et al [10]. Ils ont étudié comment améliorer la conductivité thermique de l'huile de transformateur en utilisant des particules de nanodiamant fonctionnalisé (fND) dans l'huile de transformateur.

L'amélioration observée du coefficient de transfert de chaleur pour l'échantillon à 0,2 % en poids était de 41,7 % et pour l'échantillon à 0,4 % en poids était de 82,5.

M. Rafati et al [11] ils ont utilisé des nanofluides pour le refroidissement des puces informatiques. Le fluide de base utilisé était diverses compositions d'un mélange d'eau d'ionisé et d'éthylène glycol. Trois nanoparticules de silice, d'alumine et de titane ont été utilisées, chacune avec trois concentrations volumétriques différentes dans le fluide de base. Les résultats montrent un transfert de chaleur amélioré lors du refroidissement de la micropuce, comme l'indique la réduction considérable de la température de fonctionnement du processeur lors de l'utilisation du nanofluide par rapport à l'application d'un fluide pur. La plus forte diminution observée concernait le nanofluide d'alumine, qui diminuait la température du processeur de 49,4 à 43,9 °C pour 1,0 % de concentration volumétrique et un débit de 1,0 L par minute par rapport au fluide de base pur avec le même débit. Zbigniew Nadolny et al [12]. Les auteurs ont analysé l'impact des nanoparticules C60 et TiO₂ sur les propriétés thermiques de l'ester synthétique. Ils ont prouvé que le fullerène C60 n'avait en principe aucune influence sur le facteur de transfert de chaleur α de l'ester, tandis que l'oxyde de titane TiO₂ avait une certaine influence positive sur le facteur, dont la valeur augmentait d'environ 1 à 3 %, Georgios D. Peppas et al [13] ils ont développé un nanofluide (d'huile d'ester naturel colloïdalement ultrastable + des nanocristaux d'oxyde de fer) et l'ont comparé à un système similaire contenant des nanoparticules d'oxyde de fer commerciales, ces dernières démontrant une sédimentation importante. Les techniques de caractérisation démontrent sans équivoque la haute fiabilité des performances du nanofluide rapporté.

Référence :

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Vaishnav, Harsh, Kumar Navin, Rajnish Kurchania, and Richard J. Ball. "Synthesis of ZrO₂ based nanofluids for cooling and insulation of transformers." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 29, no. 1 (2022): 199-205.
- [6] Olmo, Cristian, Cristina Méndez, Félix Ortiz, Fernando Delgado, and Alfredo Ortiz. "Titania nanofluids based on natural ester: Cooling and insulation properties assessment." *Nanomaterials* 10, no. 4 (2020): 603.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Ali, Ali Khairallah, Mohammed Khudhair Abbas, and Lutfi Y. Zedan. "Enhancement the thermal Properties of the Transformer by using Hybrid Nanofluids." *Journal of Optoelectronics Laser* 41, no. 3 (2022): 339-348.
- [10] Prabhu, Vinit V., Ethan Languri, Jim L. Davidson, David Kerns, Lino Costa, and Glenn Wilson. "Natural Convection Heat Transfer Enhancement using Functionalized Nanodiamonds in Transformer Oil." In *2022 21st IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm)*, pp. 1-4. IEEE, 2022.
- [11] 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.
- [12] Nadolny, Zbigniew, and Grzegorz Dombek. "Electro-insulating nanofluids based on synthetic ester and TiO₂ or C₆₀ nanoparticles in power transformer." *Energies* 11, no. 8 (2018): 1953.

- [13] Peppas, Georgios D., Aristides Bakandritsos, Vasilis P. Charalampakos, Eleftheria C. Pyrgioti, Jiri Tucek, Radek Zboril, and Ioannis F. Gonos. "Ultrastable natural ester-based nanofluids for high voltage insulation applications." *ACS applied materials & interfaces* 8, no. 38 (2016): 25202-25209.

Chapitre

II

Généralités sur le transfert de chaleur et les Nanofluides

II.1. Généralité 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]. Alors, on peut définir le transfert thermique entre deux corps comme étant le transfert de l'énergie qui résulte d'une différence de température entre deux corps. On distingue habituellement trois modes de transfert : par conduction, par convection et par rayonnement. Ces trois modes sont régis par des lois bien spécifiques et feront l'objet des paragraphes suivants. Bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est généralement prépondérant. Par exemple, la chaleur est principalement transmise par conduction à travers les murs en brique d'une maison ; l'eau dans une casserole placée sur une cuisinière est surtout chauffée par convection ; la terre reçoit sa chaleur du soleil en grande partie par rayonnement. Le fait donc de comprendre chaque mode de transmission permet à l'ingénieur d'écrire correctement les équations nécessaires ou éventuellement de bien poser son modèle mathématique afin de résoudre le problème auquel il est confronté.

II.1.2 Transfert de chaleur par rayonnement

Tous les corps quel que soit leur état : solide, liquide ou gazeux, de température absolue $T > 0 \text{ K}$, émettent des ondes électromagnétiques ; on dit qu'ils émettent "un rayonnement thermique". En plus, au processus d'émission de rayonnement thermique s'ajoute un processus d'absorption des radiations électromagnétiques provenant de l'environnement de ces corps. Leur état thermique est alors régi par le bilan des processus d'émission et d'absorption.

Le rayonnement thermique correspond à un transfert de chaleur ne nécessitant aucun support matériel, c'est ainsi que la terre est "chauffée" par le rayonnement thermique du soleil qui s'est propagé dans le vide, de la surface solaire, qui l'a émis, jusqu'à la terre qui l'absorbe. L'équation de Stefan-Boltzmann peut calculer le flux de vide La chaleur transmise par rayonnement est [2] :

$$\Phi(w) = M.S = \sigma.T^4.S \quad \text{II.1}$$

Sachant que :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

$$\sigma = 5,67.10^{-8}$$

Est la constante de STEFAN-BOLTZMANN [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{k}^4)$].

M : Emittance [W/m^2].

T : température absolue [k].

S : surface [m^2].

II.1.3 Transfert de chaleur par conduction

Ce transfert de chaleur est le seul que l'on puisse rencontrer dans les solides. La propagation de la chaleur s'effectue d'atome en atome, de proche en proche, par transmission d'énergie d'agitation thermique. En milieu solide les atomes, dont les positions d'équilibre sont fixes dans l'espace, transfèrent de la chaleur sans déplacement de matière. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température [2] :

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

Φ : Le flux de chaleur en watt (W).

λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température en (K.m^{-1}).

dQ : La quantité de chaleur élémentaire(J).

dt : est le temps caractéristique élémentaire (s).

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^{ère} 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^{ème} 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.

Quelque soit le type de convection (libre ou forcée ou mixte) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur transmis est donné par la relation dite loi de Newton [2] :

$$\Phi = h \cdot S \cdot \Delta T$$

II.3

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 [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$].

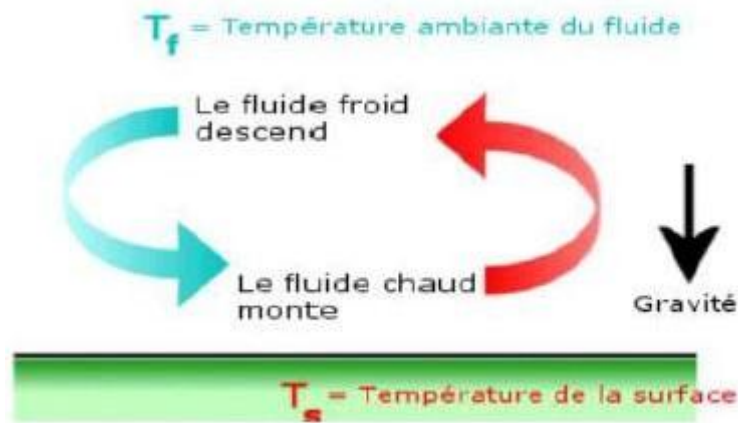


Figure II.1 : schéma présentatif de transfert convectif [3].

II.1.4.1. 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].

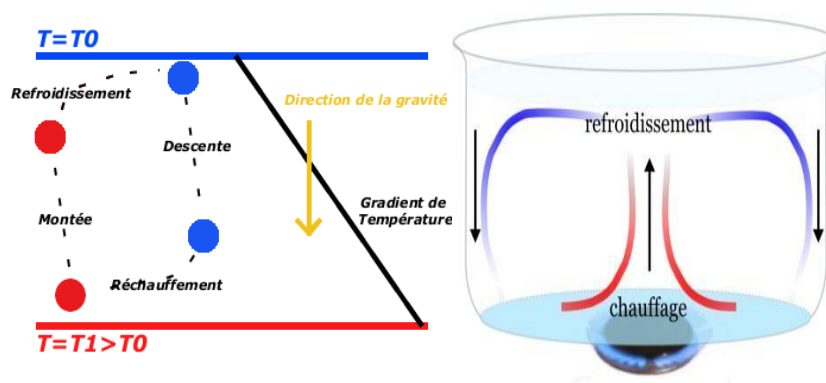


Figure II.2 : Principe physique de la convection naturelle [5].

II.1.4.2.La convection forcée

Ce 2^{ème} type de convection se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure indépendante de la différence de température. Par exemple : une pompe ou un ventilateur ou un agitateur ou même le vent.

En convection forcée, la poussée d'Archimède est négligeable devant les forces servant à mettre le fluide en mouvement. C'est le cas par exemple du refroidissement des moteurs à combustion interne : la pompe à eau pousse le liquide de refroidissement à travers le moteur puis dans l'échangeur [4].

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]. Et, Le problème de la convection mixte est caractérisé par trois paramètres de non-surveillance Dimension, à savoir nombre de Reynolds Re , nombre de Grashof, grand nombre Usine [5].

II.2. Généralité 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 [7] 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 nano-fluides

Durant ces dernières années, plusieurs systèmes énergétiques ont été développés dans le domaine industriel produisant un flux de chaleur très élevé, là où les fluides de refroidissement conventionnels (eau, éthylène glycol et l'huile) ne sont pas efficaces. L'idée d'améliorer les propriétés thermophysiques des fluides, est d'introduire des particules solides de très bonnes caractéristiques thermiques et de taille nanométrique au sein du fluide de base. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom « Nanofluides ». Ce terme a été introduit par Choi au niveau du laboratoire d'Argonne en U.S. American. 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspensions colloïdales [8].

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique (1 à 100 nm) (nanoparticules) en suspension, dans un liquide qui s'appelle un liquide de base. 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 silicium, Si.

✓ **Les nanoparticules non métalliques :**

- Les nanotubes de carbone, CNT, Le diamant, C.

Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide, Il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégation, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de la nanoparticule, (figure II.3) (Lebbihi, 2014). [10].

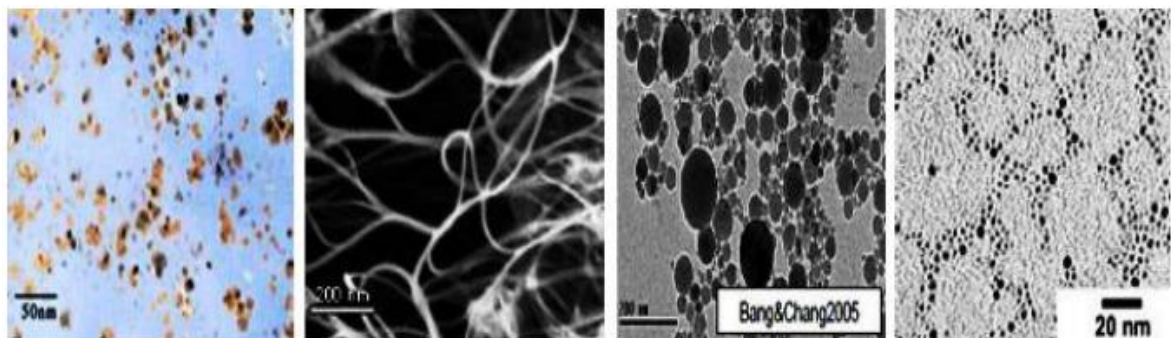


Figure II.3 : Nanofluides vus au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre à 0,5 % ; eau + Alumine ; eau + or à 2 nm, **Bang et Chang** [11].

II.2.3 Préparation des nano fluides

Les procédés de fabrication des nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories [12] :

- 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 en deux étapes consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrasons est souvent nécessaire afin de briser les agglomérats.
- ✓ La méthode en une seule étape consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base, elle n'est utilisable que pour certains nanofluides.

Un exemple de procédé consiste à condenser sous forme de nanoparticules une vapeur métallique dans un réacteur sur un film de liquide à basse tension de vapeur (figure II.4).

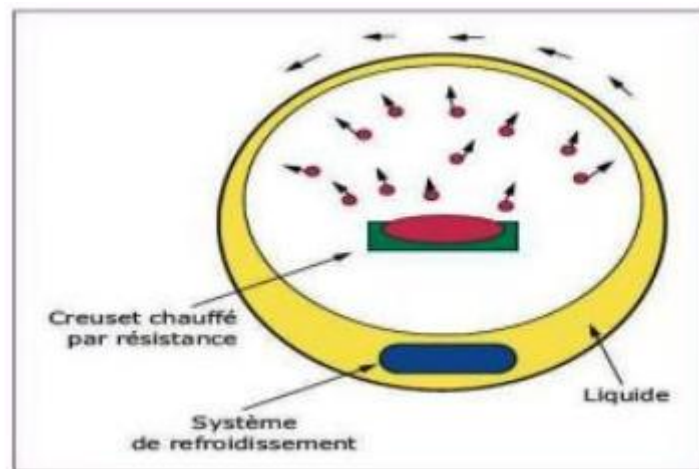


Figure II.4 : Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape, **Ribeiro et Grüss [12]**.

II.2.4. Applications des nano fluides [9]

- ✓ L'échangeur de chaleur.
- ✓ Le refroidissement d'éléments électroniques (produire un nanofluide stable qui est compatible avec des circuits et des composants électroniques).
- ✓ Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs (formulation de lubrifiants et liquides de refroidissement mélangés avec des nanoparticules pourraient entraîner une augmentation de l'efficacité énergétique des réfrigérateurs).

- ✓ Aéronautique et spatial.
- ✓ Refroidissement des systèmes nucléaire.
- ✓ Transport (gestion de refroidissement / Véhicule moteur thermique).
- ✓ Autres applications (piles à combustible, le chauffage solaire d'eau, forage, stockage thermique).

II.2.5. Les avantages des nano fluides [13]

Cependant, les nano fluides présentent des avantages Suivant :

- ✓ Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- ✓ Haute dispersion et stabilité avec prédominance du mouvement Brownien des particules.
- ✓ Particules réduites de colmatage par rapport aux boues conventionnelles, favorisant ainsi la minimisation du système.

II.2.6. Les inconvénients des nano fluides [13]

- ✓ Stabilité des nanoparticules dispersion.
- ✓ Chute de pression accrue et la puissance de pompage.
- ✓ Viscosité supérieure, chaleur spécifique basse.
- ✓ Le coût élevé des nanofluides.
- ✓ Difficultés dans le processus de production.

II.2.7. Nanoparticules et les fluides porteurs

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1 à 100 nm). Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental et appliqué et sont très étudiées de nos jours. De nombreux physiciens et chimistes les synthétisent, d'autres physiciens les étudient afin de comprendre la physique de ces objets nanométriques et des biologistes les utilisent comme marqueurs cellulaires [14].

Les liquides de base généralement utilisés dans la préparation des nanofluides sont ceux d'usage commun dans les applications de transfert de chaleur tels que l'eau, l'éthylène glycol, l'huile de moteur etc... ; Les nanoparticules peuvent être à base de métaux, d'oxydes, de carbures, de nitrures ou de carbone.[14].

II.2.8. Les propriétés thermo physiques

L'incorporation de nanoparticules dans le fluide de base entraîne une modification des propriétés thermophysiques telles que la conductivité thermique, la viscosité et la chaleur spécifique qui affectent le transfert de chaleur par convection. La concentration des nanoparticules, le niveau de pureté, la forme et la taille des nanomatériaux sont quelques-uns des principaux facteurs qui modifient de manière significative les propriétés thermophysiques.

II.2.8.1. Nano fluides

Tout fluide conventionnel a des propriétés thermo physiques. En plus de Des particules solides de taille nanométrique dans le fluide de base peuvent provoquer Changer ses propriétés thermo physiques. Efficacité du transfert de chaleur L'aide des nano fluides est décrite par le coefficient de transfert de chaleur de convection, est fonction de nombreuses propriétés thermo physiques, à savoir la conductivité électrique Chaleur K_{nf} , chaleur spécifique $C_{p_{nf}}$, coefficient de dilatation thermique β_{nf} , Viscosité μ_{nf} et densité ρ_{nf} .

La fraction volumique

La fraction volumique est la caractéristique la plus importante des nanofluides car Toutes les autres propriétés sont calculées en fonction de la fraction volumique du nanofluide. Nous pouvons définir la fraction volumique comme le volume de solides ou de particules Le rapport de (nanoparticules) au volume total (nanoparticules + fluide de base).

L'augmentation de La fraction volumique provoque une déviation significative de l'isotherme entre les nano fluides Et fluide pur. La valeur de la fraction volumique varie entre 0 (fluide de base pur) et 1. La fraction volumique est donnée par [5] :

$$\Phi = \frac{V_p}{V_T} \quad \text{II.4}$$

V_p : volume des particules solides [m^3].

V_T : volume totale [m^3].

La Conductivité thermique (K)

Conductivité thermique, exprimée en K ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$), est la capacité d'un matériau Conduire ou transférer la chaleur [3] à travers Par rapport à des dizaines de pour cent du fluide de base [15] :

A) 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 [16]. Le modèle de Maxwell (1873) est donné par la formule suivante ase :

$$K_{nf} = \frac{Kp+2Kf+2\varphi(Kp-Kf)}{Kp+2Kf-\varphi(Kp-Kf)} Kf \quad \text{II.5}$$

Où K_{nf} : la conductivité thermique du nano fluide.

K_f : La conductivité thermique du fluide de base.

K_p : 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 [15].

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. Ce La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante [17] :

$$Kn_f = \frac{Ks+(n-1)Kf-(n-1)(Kf-Kp)\varphi}{Ks+(n-1)Kf+\varphi(Kf-Kp)} Kf \quad \text{II.6}$$

Ou (n) est un facteur de forme empirique donne par : $n=\frac{3}{\varphi}$

$N=3$ 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 Yu et Choi

Yu et Choi (2003) ont proposé un modèle modifié plus complexe que le modèle Hamilton-Crosser. Ce modèle considère l'effet d'interface entre les particules et le fluide de base, mais n'est efficace que pour les particules sphériques [3].

$$\frac{Kn_f}{K_f} = \frac{K_p + 2K_f - 2(1+\beta)^3(K_f - K_p)\varphi}{K_p + 2K_f + (1+\beta)^3(K_f - K_p)\varphi} \quad \text{II.7}$$

β : Rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

Viscosité dynamique (μ)

La viscosité peut être définie comme une caractéristique du fluide, de sorte qu'il peut résister Déformé pendant l'exercice.

Par conséquent, nous pouvons dire que la viscosité en tant que mesure du frottement interne du fluide. Un liquide très visqueux est liquide à friction interne élevée. Au fur et à mesure que la viscosité augmente, la viscosité diminue fortement. Température, en particulier pour les concentrations élevées de nanoparticules [16].

Les différents modèles de viscosités :

❖ Modèle d'Einstein

Einstein a déterminé la quantité de dissipation d'énergie autour d'une seule particule dans un fluide. Corréler son énergie avec le travail effectué pour le faire avancer par rapport au fluide. À partir de ce résultat, il a déterminé l'expression décrivant la dépendance linéaire. Viscosité de la suspension à la concentration [17]

$$\mu_{nf} = \mu_f (2.5\varphi + 1) \quad \text{II.8}$$

Où μ_{nf} : La viscosité dynamique du nano fluide.

μ_f : La viscosité dynamique du fluide de base.

Φ : la fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation est valable pour le cas de particules sphériques et pour de très faible fraction Volumique $\varphi \leq 0.03$

❖ **Modèle de Brinkman**

La formule de Brinkmann (1952) a complété le modèle d'Einstein jusqu'à La concentration volumique est inférieure à 4% [17] La viscosité du nano fluide est donnée par Brinkman :

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

❖ **Modèle de Batchelor**

Batchelor montre que la viscosité est une fonction non linéaire de ϕ en présence de 69

En un semestre.

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

❖ **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 [17]:

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

❖ **Modèle de Pak et Cho**

$$\mu_{nf} = \mu_f (533.9 \phi^2 + 39.11\phi + 1) \quad \text{II.12}$$

La masse volumique (ρ)

La densité du nano fluide est proportionnelle à la fraction volumique. L'ajout de nanoparticules augmentera le nombre de particules et augmentera. En littérature, en l'absence de Les résultats expérimentaux montrent que la densité des nano fluides est généralement la loi du mélange, dans laquelle la chaleur spécifique est supposée être un nano fluide Ensemble (1998) [3] :

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1-\phi) \rho_f \quad \text{II.13}$$

Où :

ρ_{nf} : Masse volumique du nano fluide.

ρ_s : Masse volumique de la nanoparticule.

ρ_f : Masse volumique du fluide.

La chaleur massique (Cp) :

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 :

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

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

$$(\rho CP)_{nf} = (1 - \varphi) (\rho Cp)_f + \varphi (\rho Cp)_p \quad \text{II.15}$$

$(CP)_{nf}$, $(Cp)_f$, $(CP)_p$ désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nano fluide, du fluide de base et des nanoparticules [17].

Coefficient d'expansion volumique (β) :

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 [3] :

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad \text{II.16}$$

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 :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi) \beta_f + \varphi \beta_p \quad \text{II.17}$$

Référence :

- [1] Philippe Marty, " Cours De Transferts Thermiques" Génie Des Procédé, Joseph Fourier Université, PP 03, (2012-2013).
- [2] Khaldi Souheyla, 'Généralités Sur Les Transferts De Chaleur ' PP 10-12, (2019).
- [3] Ghadbane Abdelouahab , "Etude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nano fluide dans un échangeur de chaleur", Université de M'sila, 2019.
- [4] Mohamed El Hattab, Rachid Mir, Younes El Hammami, OuriaMediouni, " Simulation numerique 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 différentiellement chauffée", Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, (2016).
- [7] Abdelraheem M. Aly , Choi S.U.S , "enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles " Developments and application of Non –Newtonians Flow ,FFD-Vol231/MD-vol66(1995),pp:99 -105, (1995).
- [8] Mouassi, A, " Intensification des échanges de chaleur par l'utilisation des nanofluides" , Thèse de Magister en Génie Mécanique, Mécanique des Fluides et Transfert de Chaleur, Université M'Hamed Bougara Boumerdes .
- [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] Lebihi, S, " Refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur localisée au fond d'une enceinte remplie de nanofluide" Thèse de Master en Génie Mécanique, Systèmes Energétiques et Développement Durable, Université Mohamed Khider-Biskra .
- [11] Bang, I., C., Chang, S., H: " Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃ - water nanofluids from a plan surface in a pool ", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 2407-2419, (2005).
- [12] Ribeiro, J., P. Gruss J., A, " Nanofluides pour les applications thermiques, Technique de l'Ingénieur" 42514/2ème édition.

-
- [13] F. MEBAREK-LOUDINA, S.BENISSAAD, M. AKSAS, " Etude de la Convection Mixte dans des Cavités" UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI - CONSTANTINE", pp 10-11, (2017).
- [14] C. BOUGRIOU, S. BOUGOUL, K. TALBI," Étude Numérique de la Convection Mixte dans un Canal Horizontal Contenant des Ailettes ", Thèse De Doctorat 3ème cycle (LMD) en Génie Mécanique, Université Des Frères Mentouri - Constantine (2016).
- [15] Billel BOUDJENIBA, "Etude Numérique De La Convection Naturelle Dans Une Cavité Rectangulaire Contenant Un Nanofluide",Université 20 Août (1955) De Skikda, (2015).
- [16] 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).
- [17] Bouchoucha Abd El Malik,"Generation D'entropie Due Au Refroidissement Par Convection Naturelle D'un Nano fluide", Université Des Frères Mentouri – Constantine, (2017).

Chapitre

III

Modèle mathématique

Et

Approche Numériques

Ce chapitre présente le modèle physique, les hypothèses simplificatrices, les équations mathématiques de ce problème, équation de conservation de masse, de quantité de mouvement (Navier-Stokes), et d'énergie qui régissent les écoulements sous les formes dimensionnelles et adimensionnelles. Ensuite nous présentons la description de la méthodologie numérique à la base de la résolution des équations du mouvement et de l'énergie.

III.1. Mise en équation du problème

III.1.1. Modèles physique

La section supposée consiste en un transformateur (noyau d'enroulement), situé à l'intérieur d'un réservoir fermé chargé de fluide de base Synthetic ester(SE) avec nanoparticules de titanate de baryum (BaTiO_3) (figure 3. 1). Les couvercles du réservoir externe sont maintenus à une température faible fixe T_c , et les surfaces internes du transformateur sont maintenues à une température élevée fixe T_h . Dans le cadre de ce mémoire, le nombre de Rayleigh thermique, Ra_t , varie de 10^3 à 10^6 . Le nanofluide ester(SE) - titanate de baryum est considéré comme la source de l'écoulement bidimensionnel, qui se produit par convection laminaire naturelle. Le nanofluide est considéré comme incompressible et newtonien en raison de sa faible viscosité et de ses performances en matière de pression. Les caractéristiques thermophysiques du nanofluide sont supposées stables, à l'exception de la densité, qui est supposée évoluer en fonction de l'accord conformément à l'approche de Boussinesq. L'influence de la flottabilité est modélisée à l'aide de l'estimateur de Boussinesq.

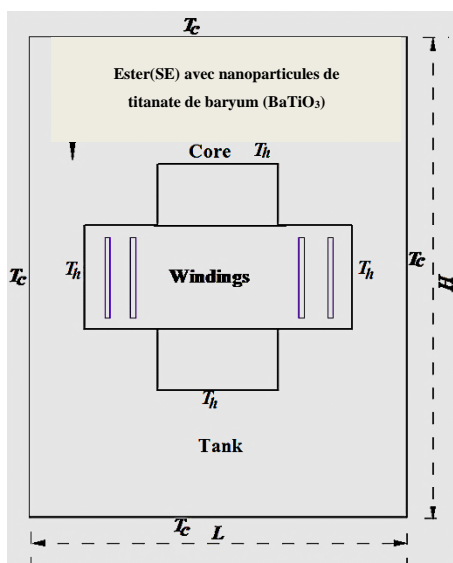


Fig. III.1. Modèle physique

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 ρ_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 β est le coefficient d'expansion thermique et ρ_0 la masse volumique à la température de référence

$$T_0 \text{ définie par : } T_0 = \frac{T_C + T_F}{2}$$

III.1.2.1. Equations générales

Le traitement du problème physique envisagé nécessite l'utilisation d'équations gouvernantes qui sont des équations aux dérivées partielles déduites des principes classiques de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

III.1.2.1.1. Equation de continuité

Elle est déduite du principe de conservation de la masse et s'exprime sous la forme :

$$\text{div } \vec{V} = \vec{0} \quad (3.1)$$

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 :

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \overrightarrow{\text{grad}p} + \mu \cdot \Delta \vec{v} \quad (3.2)$$

\vec{F} : représente les forces volumiques.

Où p est la pression et μ la viscosité du fluide

L'équation (3.2) se simplifie dans le cadre des hypothèses (d'Overbeck- Boussinesq) suivantes :

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

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 - \beta(T - T_0)) \quad (3.3)$$

T_0 : La température de référence.

ρ : La masse volumique

ρ_0 : La masse volumique à T_0

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

β : Le coefficient de dilatation à pression constante.

L'équation (3.2) s'écrit alors :

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{g} - \overrightarrow{\text{grad}p} + \mu \cdot \Delta \vec{v} \quad (3.4)$$

$$\rho_0 \cdot (1 - \beta(T - T_0)) \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho_0 \cdot (1 - \beta(T - T_0)) \vec{g} - \overrightarrow{\text{grad}p^*} + \mu \cdot \Delta \vec{v} \quad (3.5)$$

Dans la composition $\rho = \rho_0 - \rho_0 \cdot \beta \cdot (T - T_0)$; le premier terme ρ_0 ne contribue pas au mouvement il est simplement pris en compte dans le terme de pression motrice par :

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

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

Par contre, la décomposition ρ 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 $\beta \cdot (T - T_0) \ll 1 \Rightarrow \rho \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \cong \rho_0 \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$, le terme $\beta \cdot (T - T_0) \cdot \rho_0 \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$ étant d'un ordre de grandeur inférieur.

Et finalement :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho_0} \overrightarrow{\text{grad}} p^* - \beta \cdot (T - T_0) \cdot \vec{g} + \mu \cdot \Delta \vec{v} \quad (3.6)$$

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 :

$$\rho \frac{dE}{dt} = \text{div}(k \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T) + T \cdot \beta \cdot \frac{dp}{dt} + \phi + q_s \quad (3.7)$$

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.

β : Le coefficient de dilatation à pression constante.

ϕ : 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 (3.7) se simplifie en :

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \cdot \Delta T \quad (3.8)$$

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

3.1.3. Formulation indicielle

Equation de continuité :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (V_j) = 0 \quad (3.9)$$

Equation du mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 V_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_0 V_i V_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]g \quad (3.10)$$

Equation de la température :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (T V_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha \frac{\partial T}{\partial x_j}) \quad (3.11)$$

τ_{ij} : Tenseur des contraintes visqueuses dont les éléments dépendent du taux de déformation du fluide soumis au champ de vitesse.

$$\tau_{ij} = -\mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (3.12)$$

Où :

μ : Viscosité dynamique du fluide.

δ_{ij} : Fonction delta de Kronecker.

III.1.4. Equations de bilan

D'une façon générale, les équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement, et de l'énergie dans le cas an isotherme, moyennant les hypothèses énoncées ci-dessus s'écrivent :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3.13)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial U}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (3.14)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - g \cdot \cos(\alpha) [\beta_T \Delta T] + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (3.15)$$

III.I.V Modèle mathématique et équations adimensionnelles

Après la considération des hypothèses de simplification susmentionnées, les équations dimensionnelles régissant l'écoulement d'un nanofluide dans le canal représenté par la figure 3. 1.

La conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie est utilisée pour décrire l'intérieur du réservoir d'un transformateur chauffé dans les équations gouvernementales.

Les variables non dimensionnelles suivantes [1-5] transforment les équations gouvernementales en états sans dimension :

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{uH}{\alpha_f}, V = \frac{vH}{\alpha_f}, \theta = \frac{T-T_c}{T_h-T_c}, P = \frac{\bar{p}H^2}{\rho_{nf}\alpha_f^2}, Pr = \frac{\vartheta_f}{\alpha_f}, Ra_t = \frac{g\beta_f(T_h-T_c)H^3}{\alpha_f\vartheta_f}$$

Les formes sans dimensions des équations de gouvernement dans la condition équilibrée sont exprimées sous les formes suivantes :

Équation de continuité,

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (3.16)$$

Équations de momentum,

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (3.17)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} Ra_t Pr \theta \quad (3.18)$$

Équations d'énergie,

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (3.19)$$

Alternativement : Dans les directions X et Y, respectivement, U et V sont les vitesses sans dimension.

Les caractéristiques thermophysiques des liquides (huile minérale, Synthetic ester) et des nanoparticules (titanate de baryum) sont indiquées dans le tableau 1.

	$\rho(Kg/m^3)$	$C_p \left(\frac{J}{KgK}\right)$	$K \left(\frac{W}{mK}\right)$	$\beta \left(\frac{1}{K}\right)$	$\mu (Ps.s)$
SE	941	1994	0,141	0,00078	1,32E-02
BaTiO ₃	5750	299,054	3,6747	5.30x10 ⁻⁶	-

Tableau III.1. Propriétés thermophysiques du fluide de base et des nanoparticules de BaTiO₃

Selon Brink-Man [6], les valeurs effectives de la densité, de la capacité thermique, du facteur d'expansion thermique et de la viscosité dynamique effective du nanofluide sont les suivantes :

$$(\rho)_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (3.20)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (3.21)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \quad (3.22)$$

$$(\mu)_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (3.23)$$

La conductivité thermique effective du nanofluide SE-BaTiO₃ pour les nanoparticules sphéroïdales est de [7] :

$$K_{nf} = K_f \frac{(K_p + 2K_f) - 2\phi(K_f - K_p)}{(K_p + 2K_f) + \phi(K_f - K_p)} \quad (3.24)$$

III.I.VI. Condition aux limites

Pour obtenir une solution, le système d'équations doit d'abord définir les conditions aux limites. L'enceinte externe est maintenue à une température constante, T_f , égale à la température ambiante, tandis que les surfaces internes du transformateur (le chauffage localisé) sont maintenues à une température élevée fixe, T_c .

Ces nombreuses exigences limites sous forme de dimensions peuvent être résumées comme suit.

Les conditions initiales sont :

$$\theta(X, Y) = 0 \quad (3.25)$$

$$U = V = 0 \quad (3.26)$$

En outre, les conditions limites du système sont les suivantes :

Cube interne (transformateur)

$$\theta(X, Y) = 1 \quad (3.27)$$

$$U = V = 0 \quad (3.28)$$

Cavité extérieur (cuve)

$$U = V = 0 \quad (3.29)$$

$$\theta(X, Y) = 0 \quad (3.30)$$

III.1.7. Calcul du nombre de Nusselt

Une autre quantité utile comme le nombre de Nusselt pour chaque cube est peut-être choisie après avoir résolu les équations dominantes. Depuis [8, 9], le nombre de Nusselt local le long des parois extérieures et intérieures, ainsi que le nombre de Nusselt moyen, peuvent être estimés.

$$Nu_h = -\frac{K_{nf}}{K_f} \left(\frac{\partial T}{\partial Y} \right)_{Y=0} \quad (3.31)$$

$$Nu_c = -\frac{K_{nf}}{K_f} \left(\frac{\partial T}{\partial Y} \right)_{Y=1} \quad (3.32)$$

$$\overline{Nu}_{avg} = \frac{Nu_h + Nu_c}{2} \quad (3.33)$$

III.2. Approche numérique

III.2.1. Introduction

Le but de cette partie, est d'évaluer le comportement d'un écoulement laminaire, en régime stationnaire. Cette partie est consacrée principalement aux différentes étapes numériques pour la résolution de l'écoulement dans le transformateur. Le maillage, la méthode de résolution, le choix des conditions aux limites, et le post-traitement des résultats.

Le développement des techniques numériques a servi à mettre au point des codes traitant tous les problèmes de mécanique des fluides, notamment : le transfert de chaleur.

L'approche isolée est utilisée pour traiter les équations une à une. L'utilisation du logiciel fluent nous permet de créer un modèle numérique capable de traiter le problème de l'écoulement et du transfert de chaleur par convection avec l'utilisation de nanoparticules pour le cas bidimensionnel. Dans un premier temps, il est nécessaire de générer le maillage à l'aide du logiciel Gambit (voir figure III.2). Cette méthode a l'avantage de satisfaire la masse, la conservation de la quantité de mouvement et l'énergie dans tous les volumes considérés ainsi que dans tous les domaines de calcul avec les conditions aux limites évaluées basées sur l'approche des volumes finis. Pour confirmer une solution satisfaisante dans les régions présentant un gradient de température élevé, on a supposé un maillage structuré très serré.

Le schéma du second ordre a été retenu car il permet une certaine stabilité et minimise la diffusion numérique bien qu'il puisse faire diverger le calcul. L'algorithme simple de Patankar et Spalding [10] a été utilisé pour le couplage vitesse-pression. En outre, le résidu de calcul a été utilisé pour confirmer la convergence et la stabilité de la résolution.

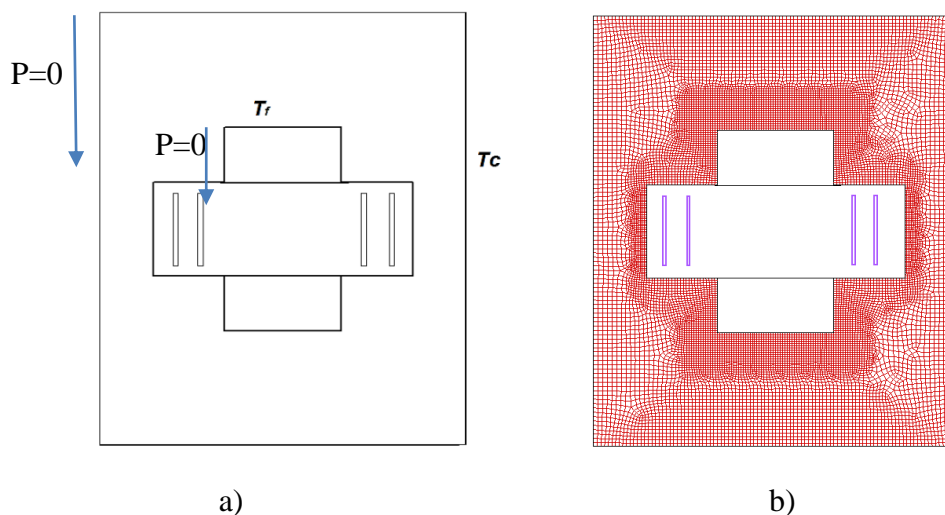


Fig. III.2. Représentation schématique des générations a) modèle physique, b) grille

Dans la présente étude, le logiciel de CFD utilisé, pour la réalisation de la simulation numérique en mécanique des fluides (**C**omputational**F**luid**D**ynamics CFD) se nomme FLUENT 6.2 peut simuler le transfert de chaleur. Il utilise la méthode des volumes finis, nécessitant un maillage conçu par le logiciel « GAMBIT 2.1 ».

GAMBIT est le modèleur associé à FLUENT où l'on décrit la géométrie et le maillage du problème à traiter ainsi que le type des conditions aux limites. Il permet aussi de définir le type des différentes frontières du système ainsi que la nature du (des) domaine(s) décrit(s) globalement (solide ou fluide). Dans notre étude les deux frontières sont considérées comme des parois indépendantes, donc on les nomme et on leur donne un type (ici Wall «paroi »).

FLUENT est écrit en langage C et globalement la démarche numérique utilisée s'initie par la lecture de la géométrie et le maillage, on passe après au type de solveur, pour notre cas c'est un solveur « segregate » avec une formulation implicite pour un cas bidimensionnel en régime stationnaire, puis la discrétisation des équations modélisantes dans le menu « Solve », la résolution des systèmes d'équations discrétisées et enfin le post-traitement.

On initialise l'ensemble des quatre variables à calculer sur tous les points du maillage, c'est à dire la pression, les deux composantes de la vitesse et la température. Ensuite on gère la progression du calcul itératif par le biais du suivi des résidus des équations se rapportant à chacune des variables.

Donc sous FLUENT, le travail va consister à assurer successivement

- Le choix des équations traitées
- La description des conditions aux limites
- La gestion de la résolution
- L'analyse des résultats

Les étapes pour le déroulement des simulations sur les deux logiciels Gambit (2.1) et FLUENT (6.2) sont résumées sur la Figure 3. 3.

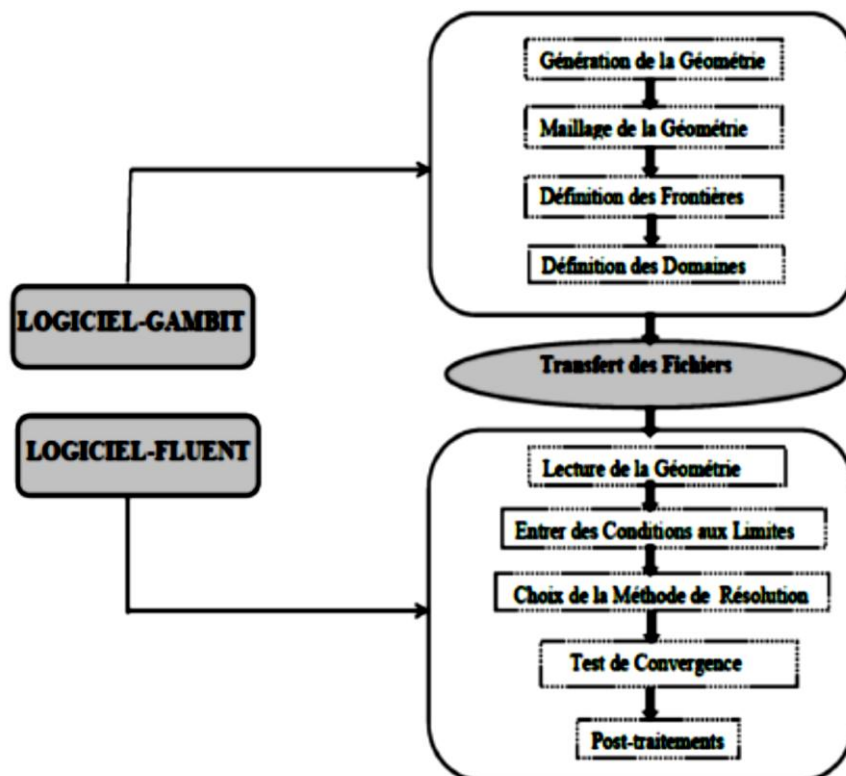


Fig. III.3. Etapes de résolution suivies par GAMBIT et FLUENT.

III.2.2. Etude de maillage

Pour vérifier une solution indépendante du maillage, un maillage extensif procédure de test a été effectué. La taille du maillage est augmentée de 40*40 à 140*140. Les variations des nombres moyens de Nusselt de surface intérieure avec la taille du maillage sont données dans la fig. (3.4) à $Ra=10^4$. Et nous a permis de choisir le maillage 100* 100.

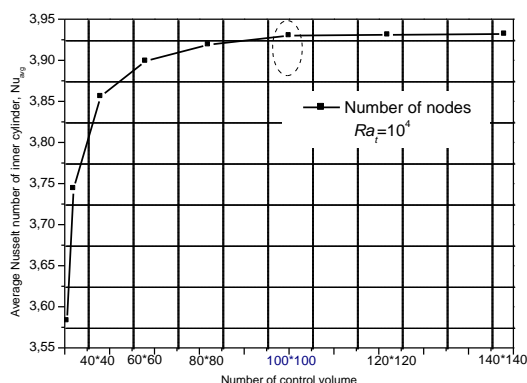


Fig. III.4 convergence avec raffinement du maillage à $Ra_t = 10^4$ le long interne

III.2.3. Conditions initiales et conditions aux limites : CL (CFD FLUENT)

Pour résoudre les équations, on a besoin de définir les conditions aux limites aux parois. Cinq types de conditions aux limites thermiques sont disponibles sur FLUENT :

- 1- Un flux de chaleur imposé
- 2- Une température imposée
- 3- Transfert thermique convectif
- 4- Transfert thermique radiatif externe
- 5- Combinaison du transfert thermique radiatif et convectif (condition mixte)

FLUENT prend par défaut la valeur de la pression atmosphérique. Pour le domaine fluide on utilise l'air, les propriétés du fluide sont tabulées dans le tableau suivant, ils ont été pris à la température initiale $T= 283K$.

Dans notre étude les conditions aux limites qui peuvent être rencontrées :

Les deux forme (cube et cavité) interne et externe sont maintenus chaque fois à un gradient de température différente, et on impose une condition dynamique d'adhérence aux parois ($U = V = 0$).

III.2.4. Discrétisation et Résolution

Les équations sont traitées séquentiellement (méthode segregated), la procédure numérique retenue par FLUENT pour la résolution des équations gouvernant la convection naturelle avec les conditions aux limites imposées, est basée sur la méthode des volumes finis. Cette méthode a l'avantage de satisfaire la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie dans tous les volumes finis ainsi dans tout le domaine de calcul. Elle consiste en :

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets.
- Intégration des équations qui régissent sur les volumes de contrôle élémentaires pour construire des équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes telles que vitesses, pression, température, et les scalaires conservées.
- Linéarisation des équations discrétisées et la solution du système d'équations linéaires résultant pour obtenir des valeurs actualisées des variables dépendantes.

Par défaut FLUENT stocke les valeurs discrètes de la pression, de la vitesse et de la température au centre des cellules, schéma collocatif décrite par Rhie et Chow [11]. Comme le calcul de la pression, de la vitesse et de la température sur les faces est nécessaire pour exprimer le terme de convection et de pression. Ces valeurs vont être interpolées à partir des valeurs au centre des cellules. Ceci est accompli en utilisant un schéma décentré. FLUENT dispose de plusieurs schémas décentrés : 1^{er} ordre, second ordre, loi de puissance, schéma type Quick. Nous développerons dans cette partie les schémas utilisés lors de notre étude.

III.2.5. Calcul de la vitesse sur les faces

Le schéma utilisé est le schéma « upwind », ce schéma prend en considération la direction de l'écoulement pour déterminer les grandeurs convective sur les faces des volumes de contrôles. Le schéma amont d'ordre un permet une certaine stabilité mais il est responsable de diffusion numérique, donc on a choisi le schéma du 2nd ordre (schéma décentré amont), ce dernier minimise la diffusion numérique mais peut faire diverger le calcul. Pour ce type de schéma, la grandeur sur la face est calculée en interpolant par rapport aux valeurs des cellules les plus proches par un schéma décentré amont du second ordre.

III.2.6. Calcul de la pression sur les faces

En utilisant le schéma force de volume pondéré « Body Force Weighted » ce type de schéma est recommandé pour les écoulements impliquant d'importantes forces de volume.

III.2.7. Couplage pression-vitesse

L'algorithme le plus universel et le plus utilisé est l'algorithme SIMPLE de Patankar et Spalding [10]. Il est employé pour le couplage vitesse-pression dans le cas instationnaire l'algorithme le plus recommandé est l'algorithme PISO, il fait partie de la famille des algorithmes de SIMPLE. Le principe de cet algorithme est d'effectuer deux corrections sur la procédure requises par SIMPLE à l'intérieur et au niveau de l'équation de correction de pression [12]. La discrétisation des termes convectifs et l'interpolation de la pression respectivement. En plus des résidus de calcul, l'évolution de la pression statique a été suivie dans des endroits donnés pour assurer la convergence et la stabilité de la solution. Les résidus étaient dans la gamme de 10^{-4} à 10^{-8} . Une moyenne de 312 itérations était nécessaire pour obtenir la convergence (figure 3. 6).

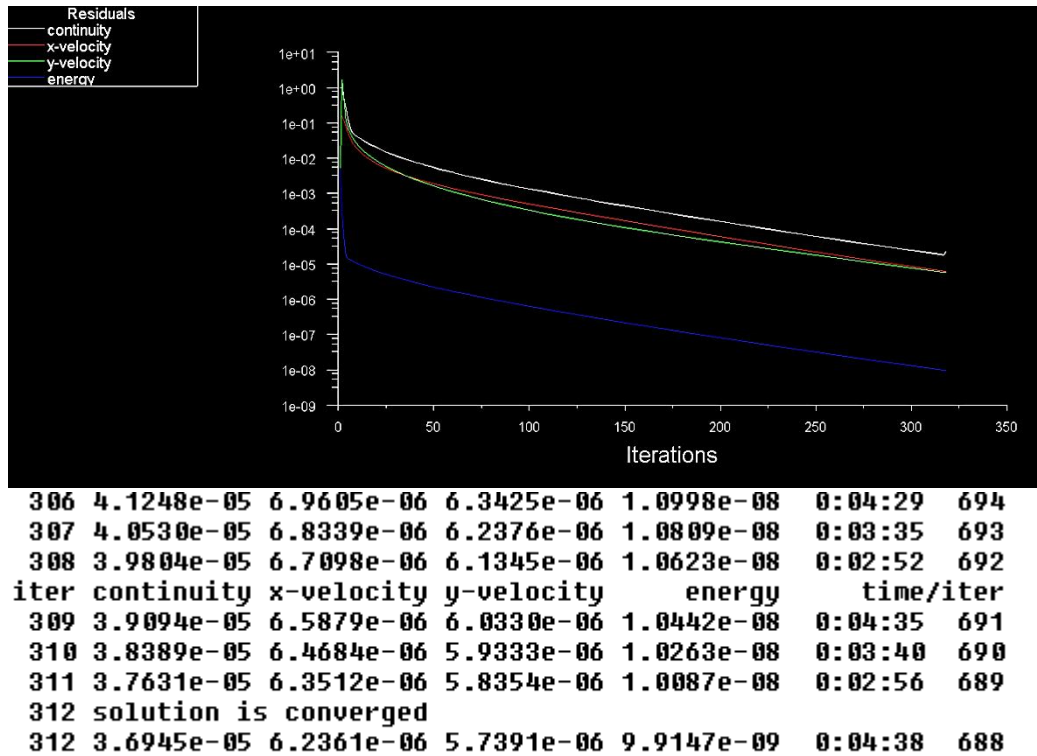


Fig. III. 6. Evolution des résidus pour un canal vertical remplie de nanofluide (Es-BaTiO₃)

$$\varphi = 0.01, Ra_t = 10^5$$

III.2.8. Sous-relaxation

La non-linéarité des équations impose la sous-relaxation des valeurs obtenues à chaque itération. Pour les différents cas simulés, les critères de résolution (préconisés par FLUENT dans le cas de la convection naturelle) et les coefficients de sous-relaxation utilisés sont présentés dans le tableau III.2.

	Facteur de Relaxation	Type de Discrétisation
Pression	0.3	Body force weighted
Masse volumique	1	-
Force de gravité	1	-
Quantité de mouvement	0.7	2 nd orderupwind
Energie	1	2 nd orderupwind
Couplage Pression-Vitesse	-	SIMPLE

Tableau III.2. Critères de résolution et coefficients de sous-relaxation utilisés

III.2.9. Résolution

La discrétisation des équations différentielles régissant les phénomènes d'écoulement permet de transformer les équations différentielles en un système d'équations linéaires avec une équation par cellule. Le système d'équations linéaires s'écrit sous forme matricielle $AX = B$ où les inconnues qui constituent la matrice colonne X sont les variables au centre des cellules. Ces équations algébriques peuvent être résolues par n'importe quelle méthode de résolution. Pratiquement les méthodes les plus utilisées pour la résolution des problèmes tridimensionnels sont [13-23] :

- La méthode de Gauss-Seidel (résolution point par point).
- La méthode de résolution ligne par ligne d'élimination de Gauss (la méthode TDMA).

Pour résoudre ce système d'équation, FLUENT utilise un solveur d'équations linéaires implicites (Gauss-Seidel) en conjonction avec une méthode multi grille algébrique (AMG) pour accélérer la convergence. Cette méthode permet de réduire le nombre d'itérations, et le temps nécessaire à la convergence de CPU.

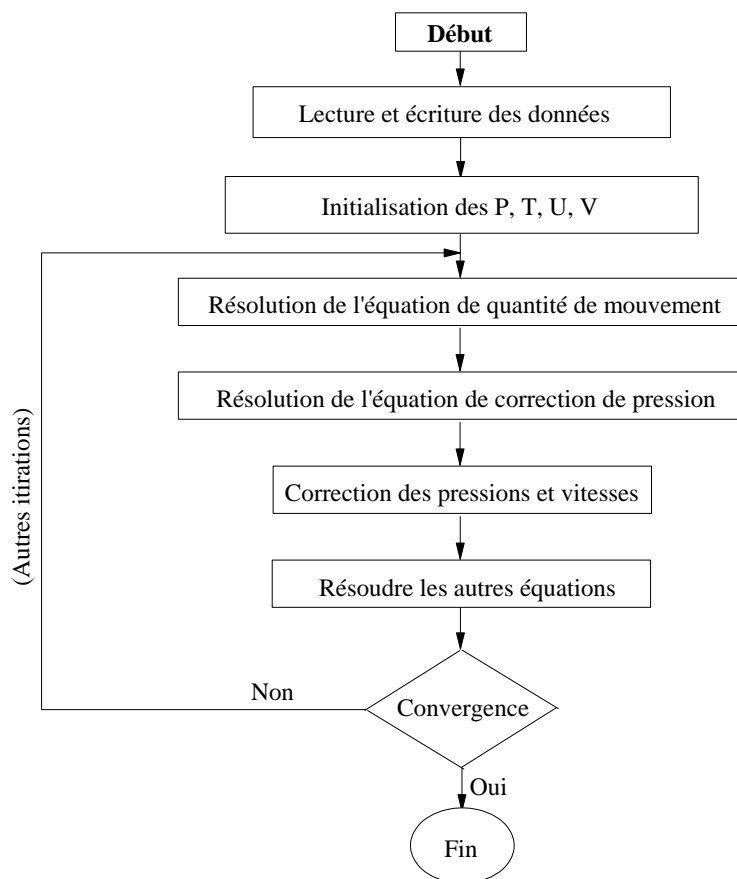


Fig. III.7. Système d'itération

III.2.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à décrire l'approche numérique que nous avons utilisée. Nous avons décrit la résolution numérique adoptée qui permettra d'aboutir aux résultats qui seront présentés par la suite.

Références

- [1] M. Shariat, A. Akbarinia, A. HosseinNezhad, A. Behzadmehr, R. Laur, Numerical study of two phase laminar mixed convection nanofluid in elliptic ducts, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, pp. 2348-2359, 2011.
- [2] M. Izadi, A. Behzadmehr, D. Jalali-Vahida, Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus, *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 48, pp. 2119-2129. 2009.
- [3] R. Lotfi, Y. Saboohi, A. M. Rashidi, Numerical study of forced convective heat transfer of nanofluids: comparison of different approaches, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, pp. 74-78.2010.
- [4] R. Mokhtari, Moghari, A. Akbarinia, M. Shariat, F. Talebi, R. Laur, Two phase mixed convection Al_2O_3 water nanofluid flow in an annulus, *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 37, pp. 585-595. 2011.
- [5] M. NuimLabib, Md. J. Nine, H. Afrianto, H. Chung, H. Jeong, Numerical investigation on effect of basefluids and hybrid nanofluid in forced convective heat transfer, *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 71, pp. 163-171, 2013.
- [6] M. Khentoul and R. Bessaïh., Numerical Simulation of Nanofluid Cooling Enhancement of Three Fins Mounted in a Horizontal Channel, *Journal of Heat Transfer*, vol. 138, pp- 091002. 2016.
- [7] J.C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, vol. II, Oxford University Press, Cambridge, UK, 1873, p. 54.
- [8] M.A.R. Sharif, Laminar mixed convection in shallow inclined driven cavities with hot moving lid on top and cooled from bottom, *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 1036-1042.
- [9] A. Karimipour, M. Afrand, M.M. Bazofti, Periodic mixed convection of a nanofluid in a cavity with top lid sinusoidal motion, *Int. J. Mech. Mater. Eng.* 1 (1) (2010) 34-39.
- [10] S. Patankar., D. Spalding. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *Int. J. heat and Mass transfer*, vol. 15, pp. 1787-1806, 1972.
- [11] W.L. Chow, C.M. Rhie. Numerical study of the turbulent past an airfoil with trailing edge separation. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA journal)*. Vol. 21, pp. 1525-1532, (1983).
- [12] S. Patankar. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences. McGraw-Hill, New York, (1980).

- [13] D. Taloub, A. BourasAbdelkrim, D Zied, Numerical Investigation of Heat Transfer with Natural Convection in a Regularly Heated Elliptical Cylinder Submerged in a Square Fence Loaded With a Nanofluid, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. 15(1) (2021) 223-232.
- [14] A. Mezreg, D. Taloub, Etude numérique de la convection naturelle dans une ellipse uniformément chauffé immergé dans une clôture elliptique à différents positions, *Mémoire Master énergie et énergie renouvelable, Université M. Boudiaf M'sila*, 2021.
- [15] I. Seghiour, K. Saadi, D. Taloub, Etude de la convection naturelle laminaire dans une carte ellipse utilisant un chauffage sur des murs adjacents, *Mémoire Master énergie et énergie renouvelable, Université M. Boudiaf M'sila*, 2020.
- [16] D.Taloub, A.Bouras, M.Djezzar, Z. Driss, Numerical research of double-diffusive natural convection in elliptical cylinders: Effect of thermal Rayleigh number, *Heat Transfer*, 49 (2020) 2194-2205.
- [17] A. Aaid, Z. Fathi, D. Taloub, Analyse numérique de la convection naturelle laminaire dans une quarte ellipse avec une ailette adiabatique fixée au mur vertical chaud, *Mémoire Master énergie et énergie renouvelable, Université M. Boudiaf M'sila*, 2020.
- [18] D. Taloub, A. BourasAbdelkrim, D Zied, Effect of the soil inclination on natural convection in half-elliptical greenhouses, *International Journal of Engineering Research in Africa*, 50 (2020) 70-78.
- [19] D. Taloub, A. BourasAbdelkrim, D Zied, Effect of Rayleigh number on internal eccentricity in a heated horizontal elliptical cylinder to its coaxial square enclosure, *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 25 (3) (2020) 17-29.
- [20] A. Bouras, D. Taloub, Numerical investigation of natural convection phenomena in uniformly heated trapezoidal Cylinder inside an elliptical Enclosure, *Journal of Computational Applied Mechanics*. 50 (2) (2019) 315-323.
- [21] H.Zaabar, S Bekri, Etude numérique sur la convection naturelle dans une ellipse uniformément chauffé immergé dans une clôture carré à différents positions, *Mémoire Master énergie et énergie renouvelable, Université M. Boudiaf M'sila*, 2019.
- [22] A. Gherbi, D. Taloub, EFFET DE L'INCLINAISON SUR LA CONVECTION NATURELLE DANS UNE CAVITE DEMI-ELLIPTIQUE, *Mémoire Master génie mécanique énergétique, Université M. Boudiaf M'sila*, 2019.
- [23] A. Bouras, D. Taloub, M.Djezzar, Z.Driss, Numerical Research of Double-Diffusive Natural Convection in Elliptical Cylinders: Influence of Internal Eccentricity, *International Journal of Engineering Research in Africa*, 63 (2023) 33-44.

Chapitre

IV

Résultats et discussion

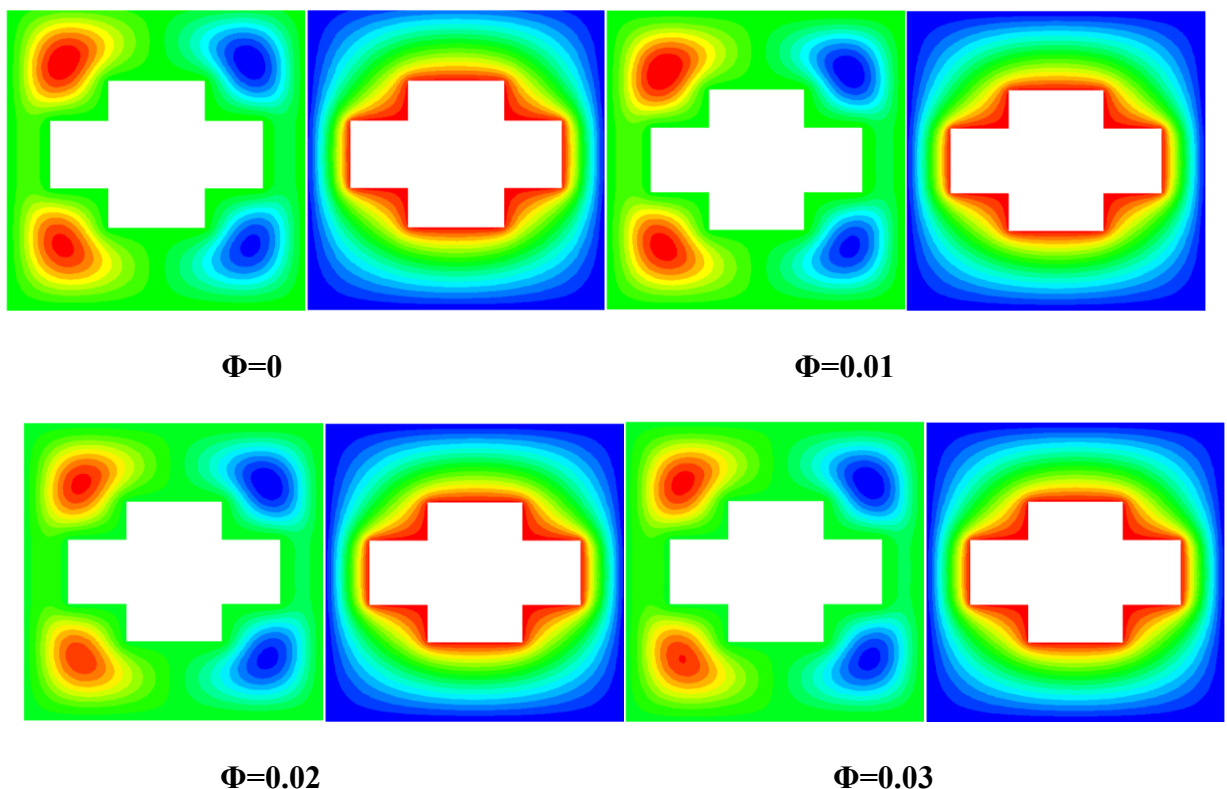
IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons effectué des simulations numériques de convection naturelle dans un réservoir fermée est présenté comme un cavité, ce réservoir comportant un modèle de transformateur à deux enroulements. 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 BaTiO₃ – Ester. Les propriétés thermo physiques des nanoparticules de titanate de baryum et du fluide de base sont données dans le tableau précédent. Les surfaces intérieure et extérieure sont maintenues à une température constante. L'étude est réalisée pour des nombres de Rayleigh allant de 10³ à 10⁶, fraction volumique des nanoparticules. 0 à 0,05 et 0.1. Les résultats sont présentés sous forme des lignes de courant, des graphiques isothermes et des nombres locaux et moyens de Nusselt. L'objectif de cette étude est d'examiner l'impact de différents paramètres sur le flux de transfert de chaleur.

IV. 2. Influence du nombre de Rayleigh thermique:

Dans les figures IV (1, 2, 3 et 4), les isothermes et les lignes de courant sont tracées pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh thermique et différentes fraction volumique des nanoparticules. Nous remarquons que ces isothermes et ces lignes de courant sont symétriques par rapport au plan vertical fictif médian. Les figures IV (1, 2, 3 et 4) montrent que le régime de l'écoulement est monocellulaire, du côté gauche du plan de symétrie, l'écoulement tourne dans le sens trigonométrique et du côté droit, il est de sens contraire (les particules du fluide se déplacent vers le haut sous l'action des forces de pesanteur le long de la paroi chaude interne puis descendent au voisinage de la paroi froide de la cavité extérieure).

Pour $Ra=10^3$, la convection laminaire est faible, la figure IV.1 représente les lignes de courant du fluide dont l'écoulement s'organise en quatre cellules principales qui tournent très lentement dans des sens opposés. Les isothermes sont des courbes fermées et concentriques qui épousent assez bien les profils des parois. Dans ce cas la distribution des températures est simplement décroissante de la paroi chaude vers la paroi froide. On peut dire que l'essentiel des transferts thermiques se fait par conduction au niveau de la paroi chauffée, bien que les champs des vitesses soient différents de zéro. La convection est donc relativement faible, les valeurs de la fonction de courant qui sont données sur les figures sont très petites.



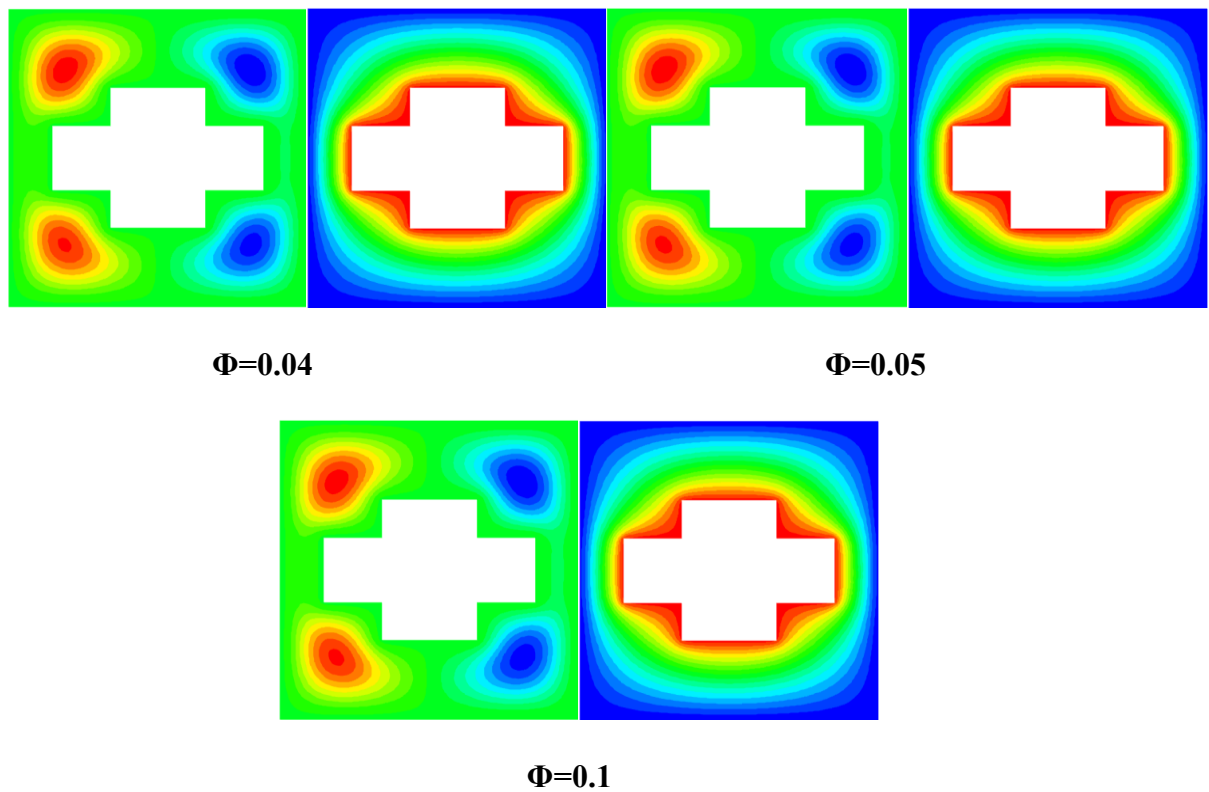
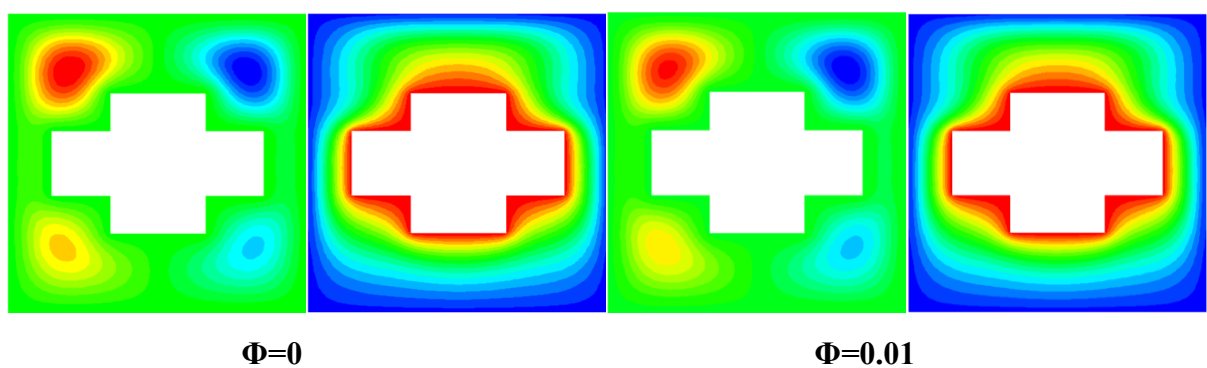


Fig. IV. 1. Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque $Ra=10^3$

Cependant pour $Ra=10^4$, les lignes isothermes de la figure (IV.2) se transforment de manière symétrique par rapport à l'axe vertical et se modifient sensiblement, et les valeurs de la fonction de courant mentionnées sur la même figure augmentent aussi sensiblement, ce qui traduit une augmentation de la convection, mais qui reste relativement faible comme le montre l'allure des lignes isothermes.



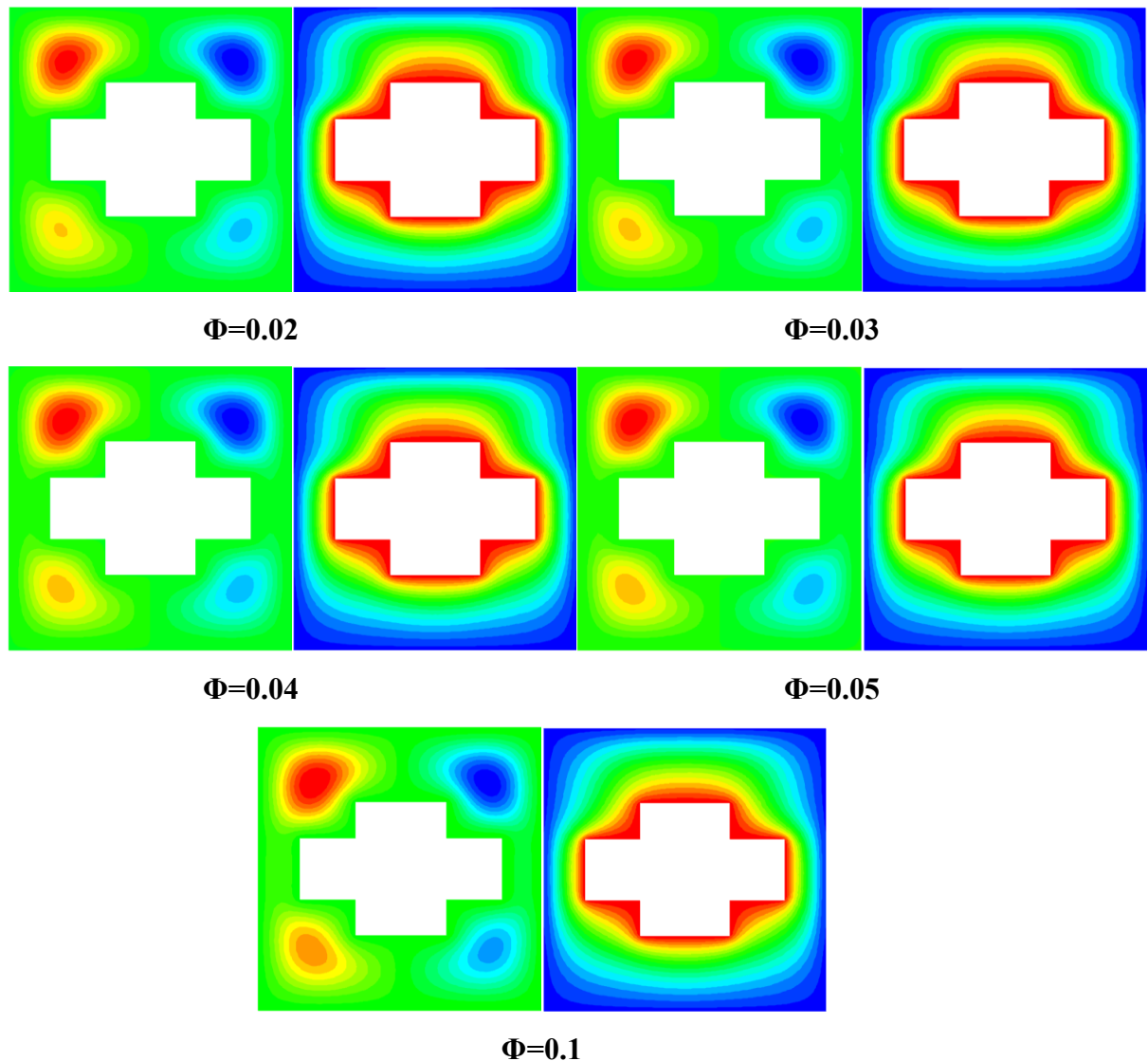


Fig. IV. 2. Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque $Ra_t=10^4$

Les figures (IV.3) pour $Ra=10^5$ montrent que les lignes isothermes se modifient et finissent par adopter la forme d'un champignon. La distribution de la température est décroissante de la paroi chaude vers la paroi froide. Le sens de la déformation des isothermes est conforme au sens de rotation des lignes de courant. En régime laminaire, on peut dire que, sous l'action du mouvement des particules qui décollent de la paroi chaude au niveau de l'axe de symétrie, les lignes isothermes se « voûtent » et s'éloignent de la paroi à cet endroit. Les valeurs des fonctions de courant augmentent ce qui signifie que la convection s'intensifie.

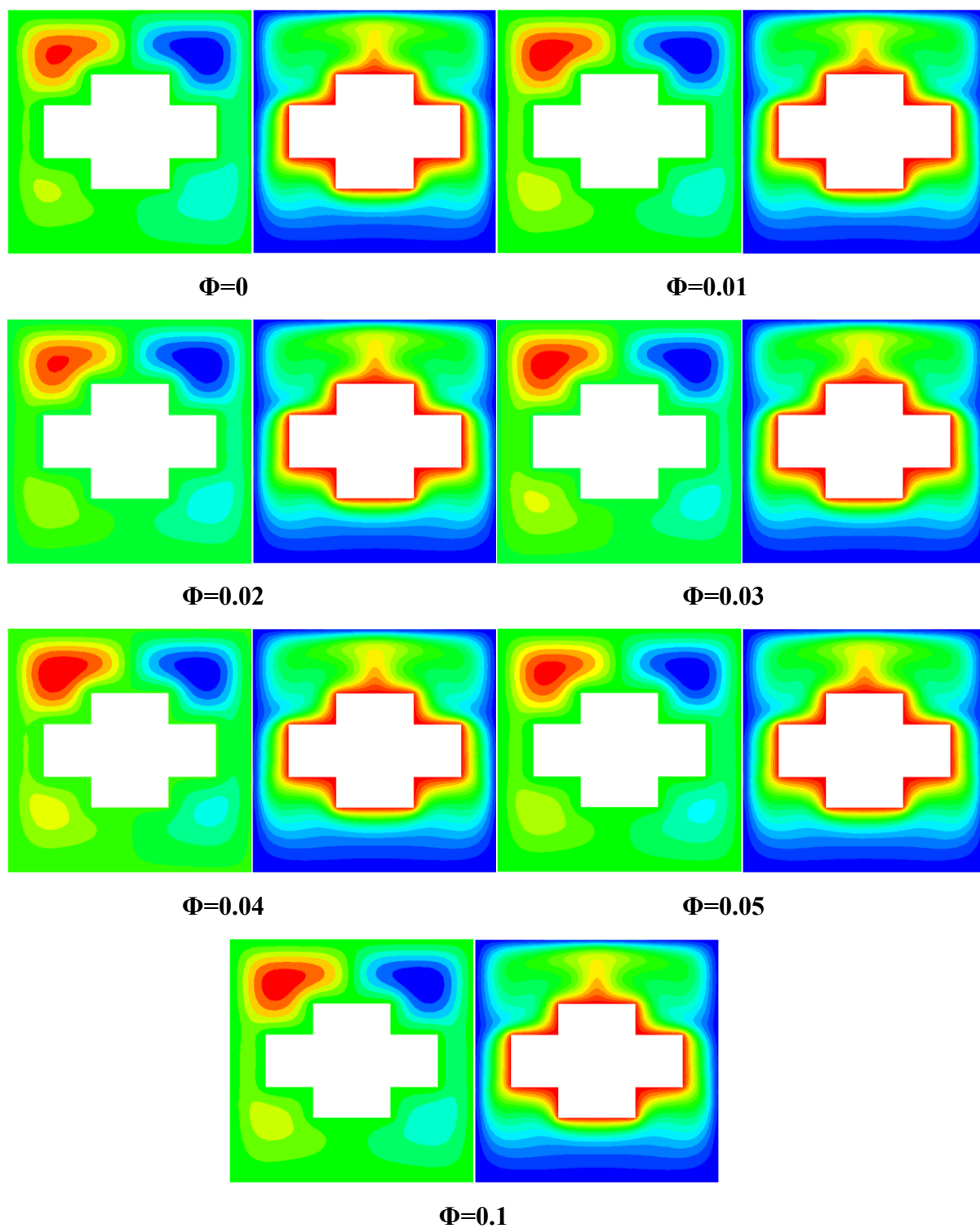
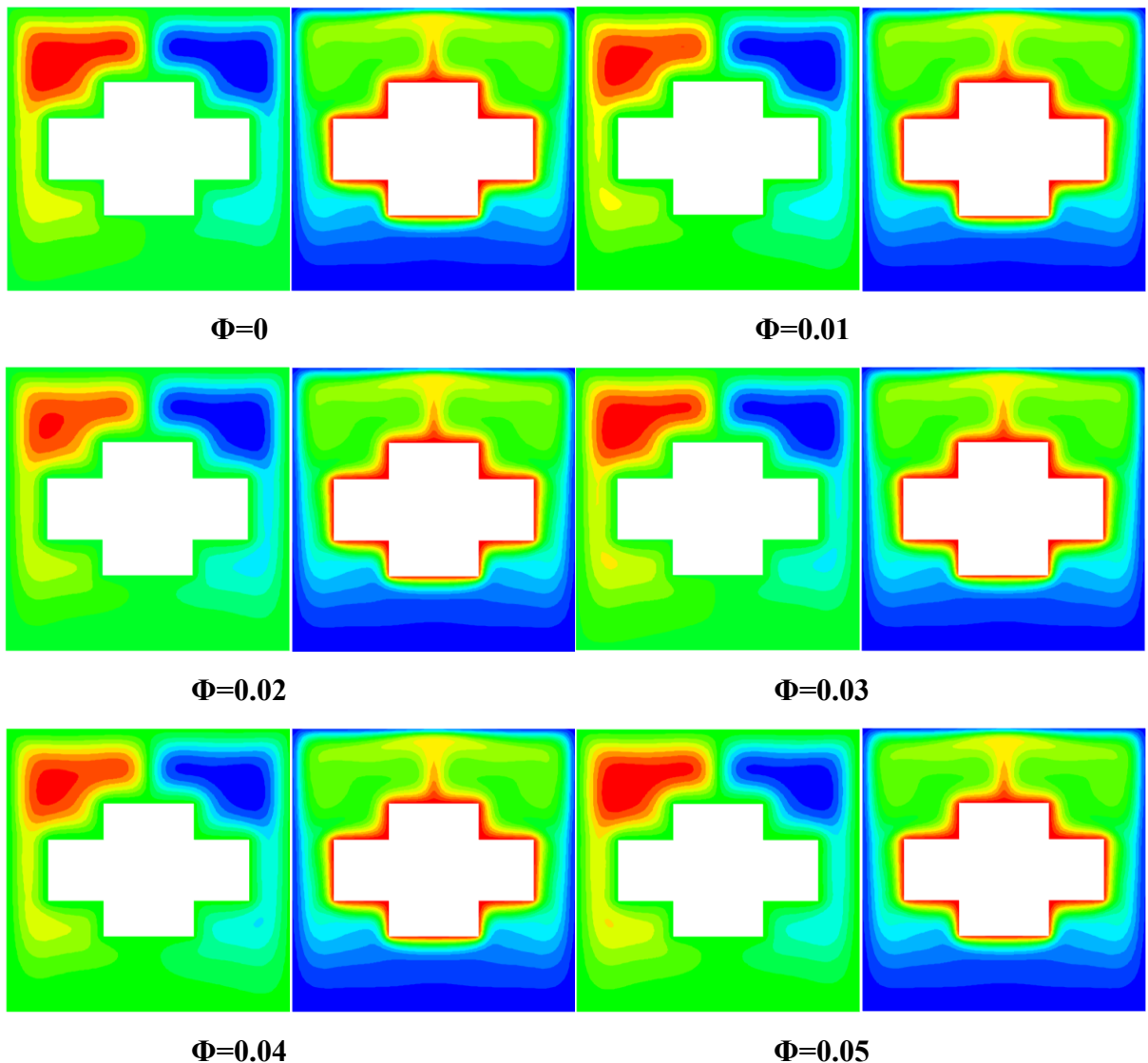
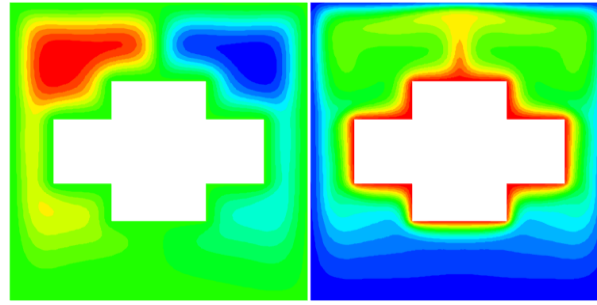


Fig. IV. 3. Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque $Ra=10^5$

Lorsque $Ra_t=10^6$, les lignes isothermes adopter la forme d'un champignon Mais dans une taille plus grande qu'avant et deviennent stratifiées. Les couches limites thermiques deviennent plus minces. Si on compare les isothermes dans les figures pour différentes valeurs de Ra, on peut noter que lorsque le Ra augmente, les isothermes se rapprochent les unes des autres dans la zone située près du mur inférieur chauffé c.-à-d. que les gradients de la température deviennent plus élevés à proximité de la paroi inférieure chauffée. Ceci implique une augmentation du transfert thermique à travers la paroi inférieure de l'enceinte pour un plus haut nombre de Ra.





$$\Phi=0.1$$

Fig. IV. 4. Isothermes et lignes de courant pour différentes valeurs de fraction volumique lorsque $Ra_t=10^6$

IV.3. Nombre de Nusselt :

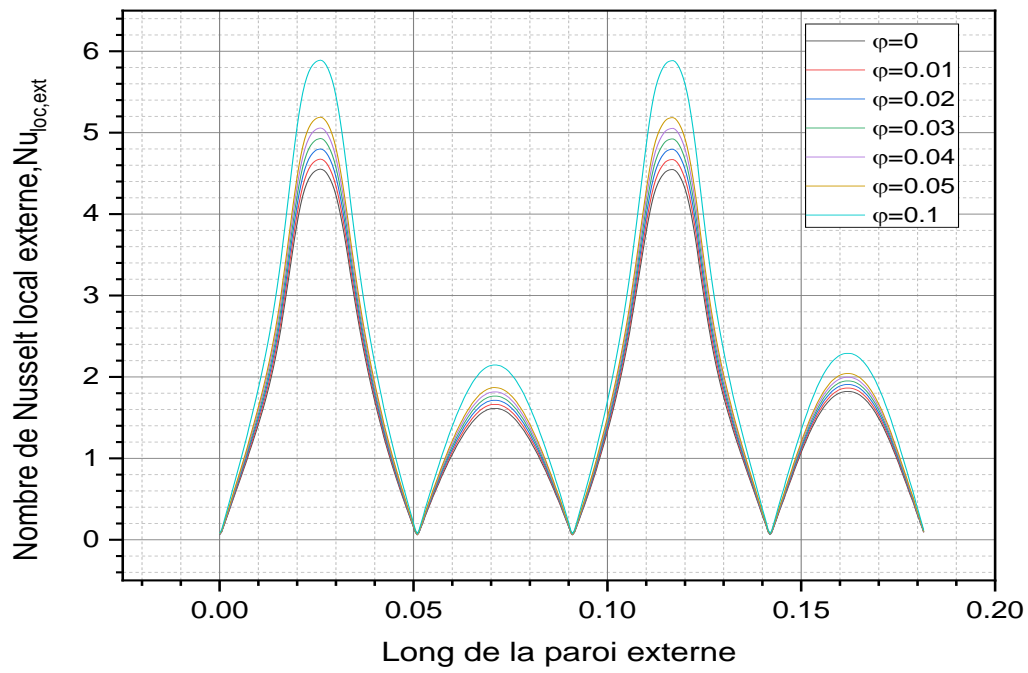
IV.3.1. Variation du nombre de Nusselt local sur la paroi de la cavité extérieur :

La distribution du nombre de Nusselt local sur les surfaces externe de cavité est illustrée sur la figure (IV.5) pour différentes valeurs de la fraction volumique des nanoparticules.

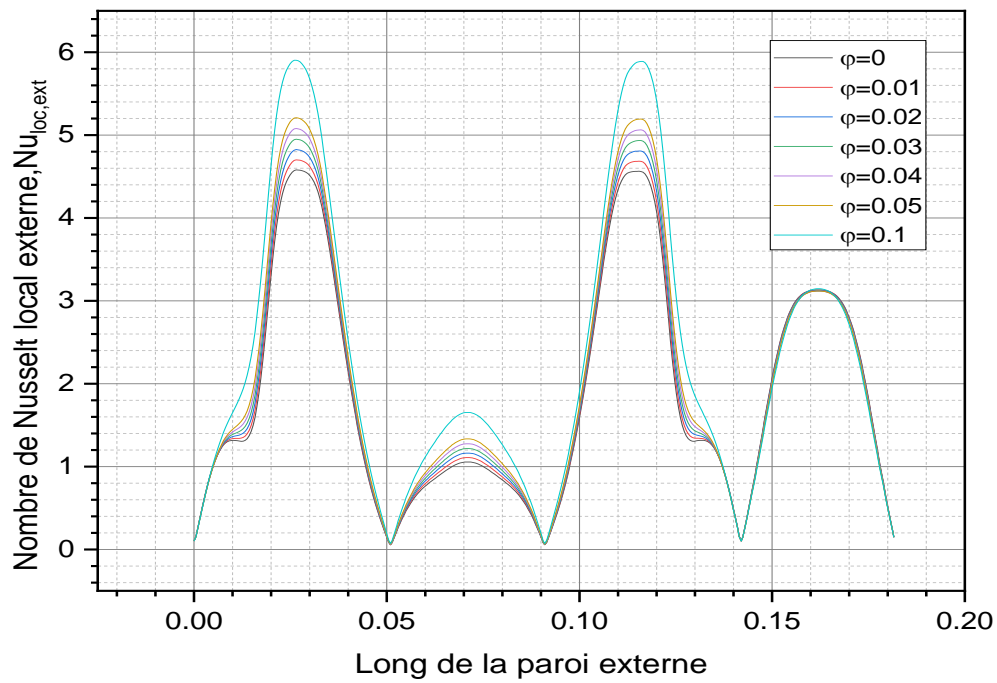
On remarque que la valeur du nombre de Nusselt local est plus grande dans les parois droite et gauche de cavité et faible dans les restes parties. Cela confirme que le transfert de chaleur est essentiellement conduction. On observe qu'avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, la valeur du nombre de Nusselt local augmente. Cela correspond à la figure 6, tel que Nu_e est maximum dans la paroi supérieure et minimum dans la paroi basse de cavité où le fluide est pratiquement immobile. Tandis que, il est moins dans les autres parties. (Ici le transfert thermique se fait par convection).

Il est clair aussi qu'avec l'augmentation des fractions volumiques, le nombre de Nusselt augmente également ce qui se traduit également par une augmentation du taux de transfert thermique du nanofluide. On peut également noter que les valeurs maximales sont affectées par la présence de nanoparticules.

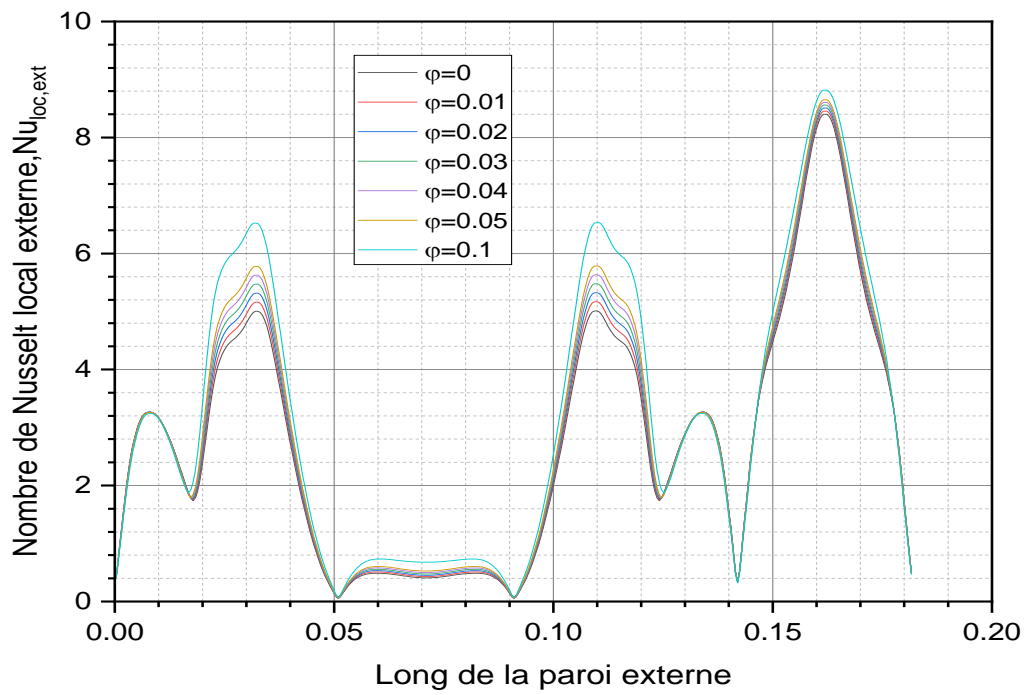
A) $Ra=10^3$



B) $Ra=10^4$



C) $Ra=10^5$



D) $Ra=10^6$

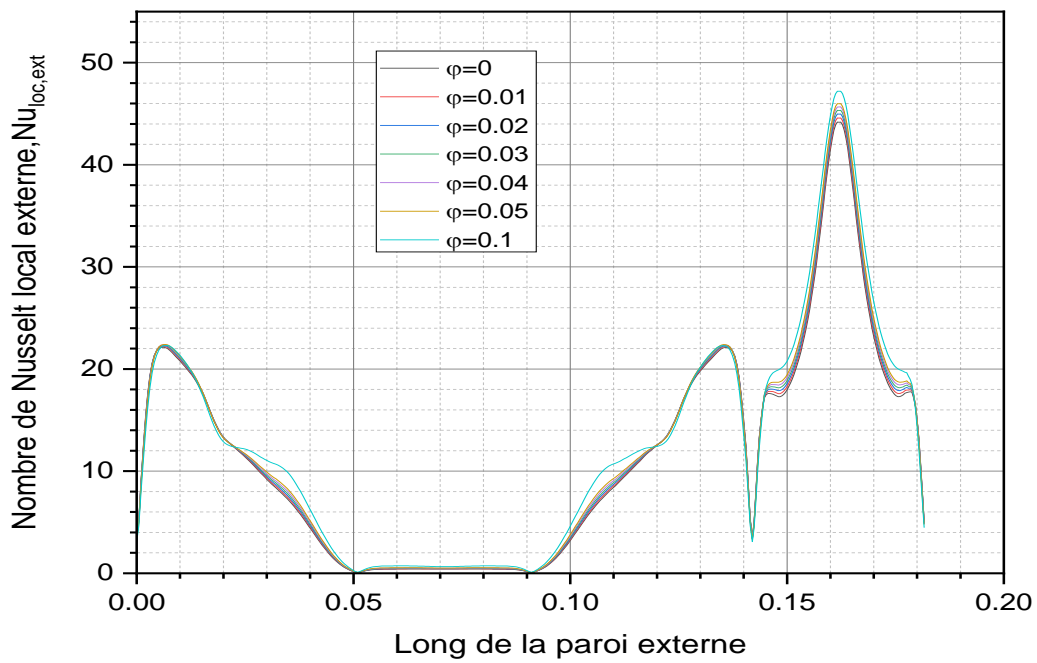


Fig. IV. 5. Evolution du nombre de Nusselt local le long de la paroi du cavité externe.

IV. 3. 2. Variation du nombre de Nusselt local sur la paroi du transformateur intérieur

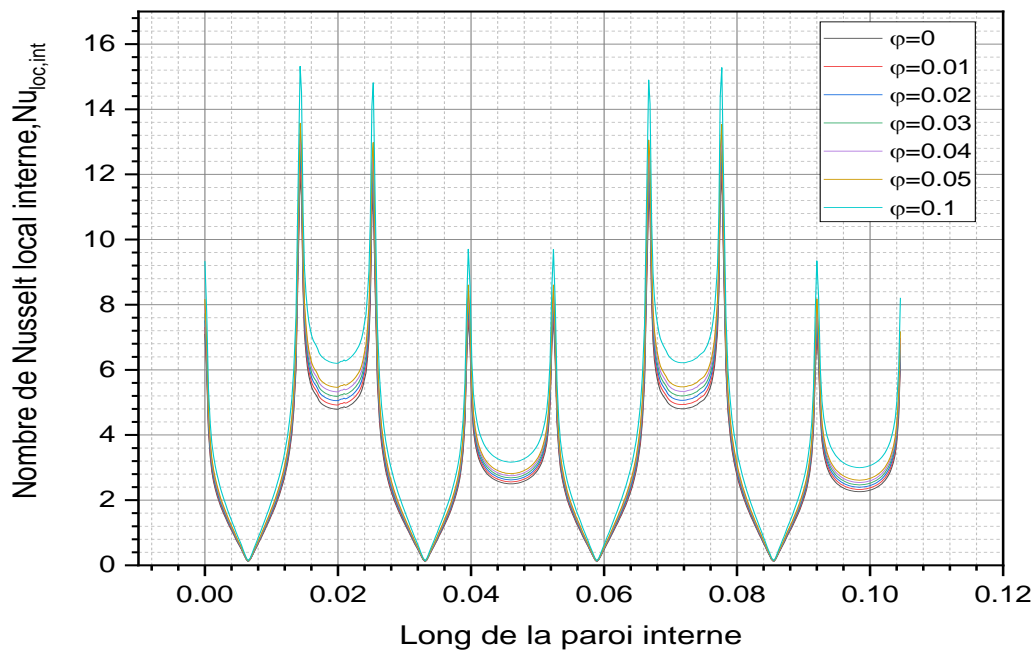
La figure IV.6. illustrent la variation du nombre de Nusselt local sur la paroi du transformateur intérieur, et nous permettent de remarquer qu'avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, la valeur du nombre de Nusselt local augmente, ce qui est évident.

Ce résultat est compatible avec les contours thermiques montrés sur les figures IV (1, 2, 3 et 4).

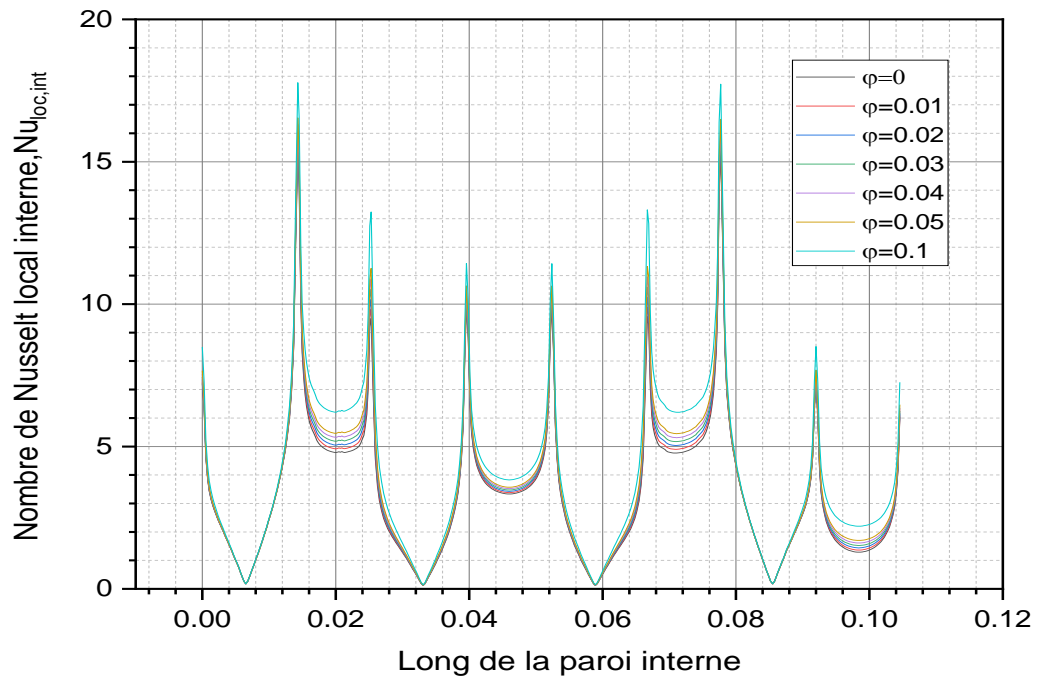
Dans ce cas, pour les petites valeurs de Rayleigh, où l'essentiel du transfert de chaleur se fait par conduction, le nombre de Nusselt est grand dans les deux côtés latéraux proches du couvercle du transformateur, et pour les grandes valeurs de Rayleigh, où le transfert de chaleur est par convection thermique, le nombre de Nusselt est important le long de la base inférieure du transformateur, en particulier sur ses bords, et il est faible dans les quatre coins intérieurs du transformateur.

On peut également noter que les valeurs maximales sont affectées par la présence de nanoparticules, tandis que les valeurs minimales ne sont pas affectées.

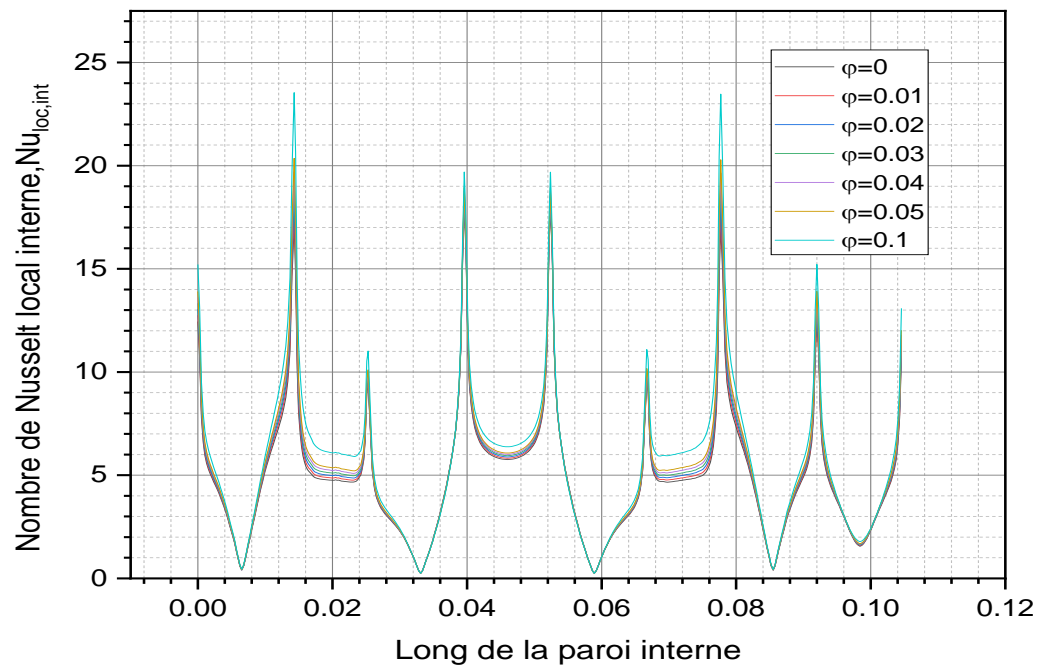
A) $Ra=10^3$



B) $Ra=10^4$



C) $Ra=10^5$



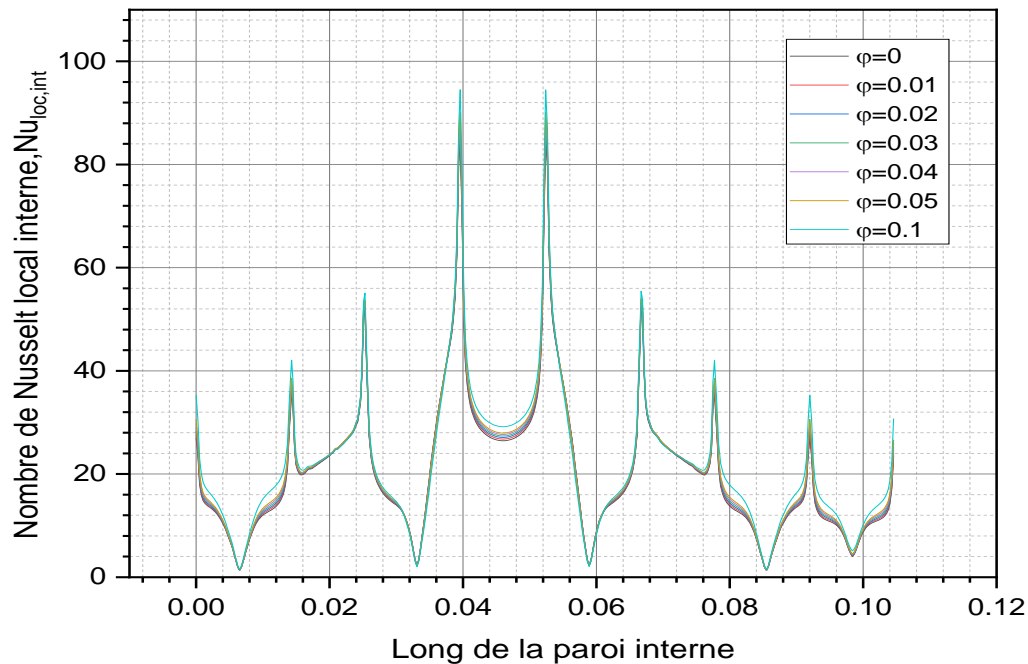
C) $Ra=10^6$ 

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

VI. 3. 3. Nombre du Nusselt moyen :

La figure IV.7. illustre l'évolution du nombre moyen de Nusselt en fonction de la fraction volumique de nanoparticules. On note que lorsque le nombre de Rayleigh est inférieur à 10^4 , on remarque aussi que le nombre de Nusselt moyen augmente lentement car le mode dominant de transfert de chaleur est la conduction, puis augmente de manière significative avec l'augmentation de Rayleigh car le mode de transfert de chaleur prédominant est la convection. On remarque aussi que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation de la fraction volumique de la nanoparticule, quel que soit le nombre de Rayleigh.

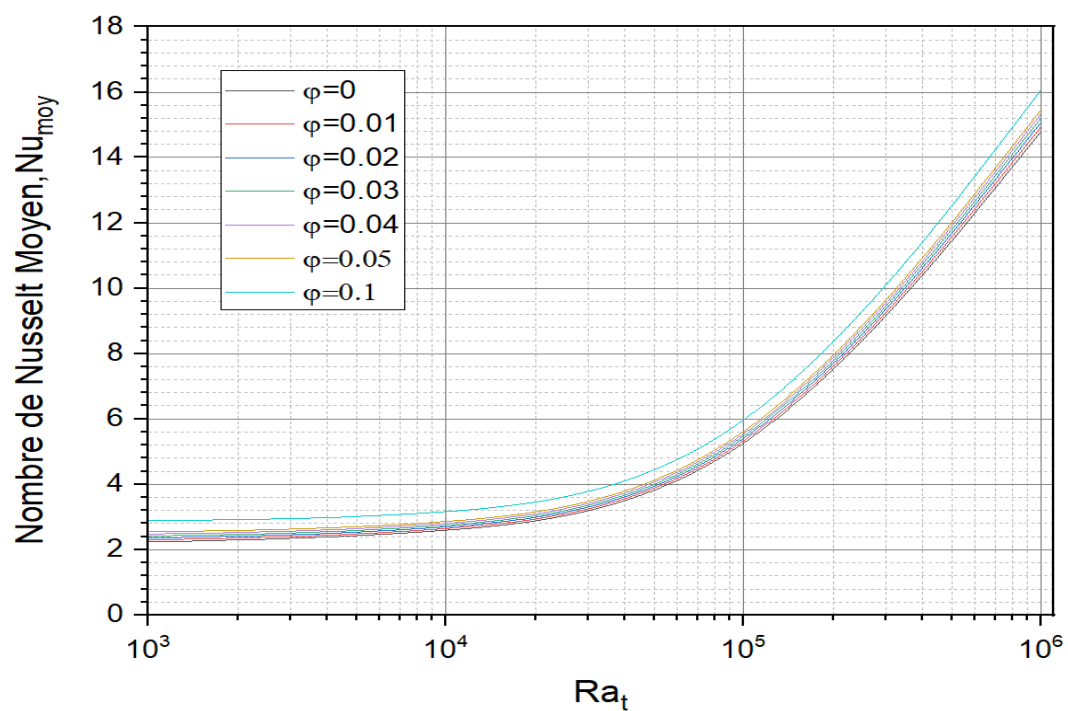


Fig. IV. 7. Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh thermique.

Conclusion générale

Dans cette mémoire, nous présentons une étude numérique du transfert de chaleur par convection naturelle dans un système fermée, ce système comportant un transformateur chaud immergé dans une cavité remplis d'un nanofluide à base d'ester et de Titanate de barum. Ce problème a été abordé avec une approche numérique basée sur la méthode des volumes finis pour la résolution des équations gouvernantes basées sur l'approximation de Boussinesq.

Les simulations numériques sont effectuées pour un nombre de Rayleigh variant entre 10^3 et 10^6 , et une fraction volumique des nanoparticules comprise entre (0, 0.05 et 0.1).

Pour examiner profondément les effets des paramètres pertinents sur le transfert de chaleur dans notre configuration, Cette étude nous a permis de dégager les conclusions suivantes :

-l'augmentation du nombre de Rayleigh entraîne une amélioration de l'écoulement convectif naturel.

-lorsque le nombre de Rayleigh est inférieur à 10^4 , on remarque que le nombre de Nusselt moyen augmente lentement car le mode dominant de transfert de chaleur est la conduction, puis augmente de manière significative avec l'augmentation de Rayleigh car le mode de transfert de chaleur prédominant est la convection.

-Finalement les résultats obtenus ont montré que l'addition des nanoparticules apporte une amélioration du transfert de chaleur.

Dans la continuité de ces travaux, il serait intéressant d'utiliser un autre type de nanofluide qui a pris de l'ampleur ces dernières années ; Nanofluides hybrides.

Résumé

Une étude numérique de la convection naturelle des transferts de chaleur laminaire à l'état stationnaire dans un réservoir fermé entre un transformateur interne chauffé et un réservoir extérieur froid. Cette espace est parcourue par un nanofluide BaTiO₃ – Ester. Pour différents nombre de Rayleigh et différents fraction volumique des nanoparticules. Le système d'équations gouvernant le problème a été résolu numériquement par le code de calcul Fluent basé sur la méthode des volumes finis. En se basant sur l'approximation de Boussinesq. Les surfaces intérieure et extérieure sont maintenues à la température constante. L'étude est réalisée pour les nombres de Rayleigh allant de 10³ à 10⁶. Nous avons étudié les effets des différents nombres de Rayleigh et fraction volumique des nanoparticules sur la convection naturelle. Les résultats sont présentés sous forme des isothermes, des isocourants, et des nombres locaux et moyens de Nusselt. Le but de cette étude est de voir l'influence du nombre de Rayleigh thermique, et 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 the natural convection of stationary laminar heat transfers in a closed tank between a heated internal transformer and a cold external tank. This space is traversed by a BaTiO₃ – Ester nanofluid. For different Rayleigh number and different volume fraction of nanoparticles. The system of equations governing the problem was solved numerically by the Fluent computer code based on the finite volume method. Based on the Boussinesq approximation. The interior and exterior surfaces are kept at a constant temperature. The study is carried out for Rayleigh numbers ranging from 10³ to 10⁶. We have studied the effects of different Rayleigh numbers and volume fraction of nanoparticles on natural convection. The results are presented in the form of isotherms, isocurrents, and local and mean Nusselt numbers. The purpose of this study is to see the influence of the thermal Rayleigh number, and volume fraction of the nanoparticles on the rate of heat transfer.

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

ملخص:

قمنا بدراسة عددية لظاهرة الحمل الحراري الطبيعي عن طريق إنتقال الحرارة داخل خزان مغلق بين محول داخلي ساخن وخزان خارجي بارد (الجدار الخارجي للخزان) يتم عبور هذا الفضاء بواسطة سائل نانوي من الاستر وتيتانات الباريوم لعدد رايلي مختلف محصور بين 10³ و 10⁶ وتركيز مختلف للجسيمات النانوية ويعتمد حل معادلات الحركة والحرارة عدديا على البرنامج العددي فلوانت باستعمال تقريبات بوسيناسك . قمنا بدراسة تأثير عدد رايلي وتركيز الجسيمات النانوية على الحمل الحراري وكانت النتائج على شكل خطوط حرارية خطوط دالة التيار وأعداد نيسلت المحلية والمتوسطة. وكان الهدف هو دراسة تأثير رايلي وتركيز الجسيمات النانوية على معامل إنتقال الحرارة.

الكلمات المفتاحية:

الحمل الحراري الطبيعي، أعداد رايلي ، الموائع النانوية ، التركيز الحجمي .