

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

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT PHYSIQUE  
Ph/ENR/10/2023



DOMAINE : Sciences de la matière  
FILIERE : Physique  
OPTION : Physique Énergétique et  
Energie renouvelable

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par : DOUIBI Hamoud

Intitulé

**Etude numérique de l'influence de différents  
nanoliquides sur les performances de  
refroidissement d'un transformateur à haute  
tension**

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

Salmi Mohammed	Université M <sup>ed</sup> Boudiaf M'sila	Président
Taloub Djedid	Université M <sup>ed</sup> Boudiaf M'sila	Rapporteur
Bouras Abdelkrim	Université Med Boudiaf M'sila	Examineur

Année universitaire : 2022/2023



## **Remerciement**

Remercions tout d'abord Dieu de nous avoir donné la force, le courage et la patience de faire cet humble travail.

Merci beaucoup au **Dr. TALOUB Djedid** pour avoir suivi et guidé nous pendant toute la durée de réalisation de ce travail. Nous le remercions également pour sa présence constante, ses conseils efficaces et ses idées originales qui ont contribué à enrichir cette note. Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à nos recherches en acceptant d'examiner nos travaux et de les enrichir de leurs suggestions, et je veux remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou loin de l'achèvement de ce travail.

---



## Dédécace

*Je dédie ce travail :*

*A ma chère mère, que Dieu me la protège.*

*A ma chère femme mes chers filles et fils.*

*A mes chers frères et sœurs.*

*Pour toute ma famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous mes professeurs depuis mes premières études, à  
tous ceux qui m'ont appris les lettres.*

*A tous ceux que je connais de près ou de loin.*

## Table des Matières

Remerciements	
Dédicace	
Table des Matières	.....i
Résumé	.....iii
Liste des figures	.....iv
Liste du tableau	.....vi
Nomenclature	
<b>Introduction générale</b>	.....1
Références	.....3
<b>Chapitre 1 : Recherche bibliographique</b>	.....5
Références	.....12
<b>Chapitre 2 : Généralité sur les nanoliquides et les modes de transfert de chaleur</b>	.....1
	.....7
2.1. Définition nano fluide	.....17
2.2. Préparation des nano fluides	.....17
2.2.1 Procédé en une étape (one-step method)	.....17
2.2.2 Procédé en deux étapes (two-step method)	.....17
2.3. Applications des nano fluides	.....17
2.4. Propriétés thermo-physiques	.....18
2.4.1. Masse volumique $\rho$	.....18
2.4.2. fraction volumique $\phi$	.....18
2.4.3. conductivité thermique $K$	.....19
A) Modèle de Maxwell	.....19
B) Modèle de Hamilton et Crosser (1962)	.....19
C) Modèle de Yu et Choi	.....19
2.4.4. Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ )	.....20
2.4.5. Chaleur massique ( $C_p$ )	.....20
2.4.6. Viscosité dynamique ( $\mu$ )	.....20
2.4.6.1. Modèle d'Einstein	.....20
2.4.6.2. Modèle de Brinkman	.....21
2.4.6.3. Modèle de Batcherole	.....21
2.4.6.4. Modèle de maiga et al	.....21
2.4.6.5. Modèle de Pak et Cho	.....21
2.5. Propriétés thermo-physiques de na no fluide	.....21
2.6. Avantage des nano-fluides	.....22
2.7. Inconvénients des nano-fluides	.....22
2.8. Modes de transfert de chaleur	.....22
2.8.1. Transfert de chaleur par conduction	.....23
2.8.2. Transfert de chaleur par rayonnement	.....23
2.8.3. Transfert de chaleur par convection	.....24
2.8. Différents types de Convection	.....25
2.9. Convection naturelle (libre)	.....25
Référence	.....27
<b>Chapitre 3 : Modèle mathématique et approche numériques</b>	.....28

3.1. Mise en équation du problème	28
3.1.1. Modèles physique	29
3.1.2. Modèle mathématique	29
3.1.2.1. Equations générales	29
3.1.2.1.1 Equation de continuité	30
3.1.2.1.2 Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes)	30
3.1.2.1.3. Equation de l'énergie	31
3.1.3. Formulation indicielle	31
3.1.4. Equations de bilan	32
3.1.5. Modèle mathématique et équations adimensionnelles	32
3.1.6. Condition aux limites	33
3.1.7. Calcul du nombre de Nusselt	33
3.2. Approche numériques	35
3.2.1. Introduction	35
3.2.2. Etude de maillage	37
3.2.3. Conditions initiales et conditions aux limites : (CFD FLUENT)	38
3.2.4 Discrétisation et Résolution	39
3.2.4.1 Calcul de la vitesse sur les faces	39
3.2.4.2 Calcul de la pression sur les faces	39
3.2.4.3 Couplage pression-vitesse	40
3.2.4.4 Sous-relaxation	40
3.2.4.5 Résolution	41
3.3. Conclusion	42
Références	42
<b>Chapitre 4 : Résultats et discussion</b>	45
4.1 Effet du nombre de Rayleigh thermique	45
4.2 Corrélation entre le nombre de Nusselt moyen et le nombre de Rayleigh thermique	48
4.3 Effet du fluide de base	49
4.4 Conclusion	53
<b>Conclusion général</b>	54
<b>Résumé</b>	

## Résumé

Dans cette mémoire, les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques des nanofluides de Titanate de baryum remplissant dans un transformateur (noyau d'enroulement), situé à l'intérieur d'un réservoir fermé sont étudiées numériquement. Ester synthétique (SE), de l'huile minérale (MO) et gaz-liquide (GTL) sont utilisés comme fluides de base. Le modèle mathématique pour le transfert de chaleur par convection dans les nanofluides est suivi pour tenir compte des effets de la distribution de la fraction volumique des nanoparticules sur les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie, dans lesquelles le code fluent est utilisé. Cette dernière est basée sur la méthode des volumes finis couplée à l'algorithme SIMPLER. Les résultats numériques pour le transfert de chaleur sont présentés sous la forme des lignes de courant et des profils isothermes pour une valeur différente du nombre de Rayleigh, du fluide de base et de 10% fraction volumique des nanoparticules. Les effets de ces paramètres sur le nombre de Nusselt local et moyen sont analysés. Au cours de cette étude, les nanoparticules dispersées dans le fluide de base l'Ester synthétique (SE) ont confirmé le comportement amélioré des propriétés des nanofluides par rapport à l'huile minérale (MO) de base et le gaz-liquide (GTL) de base.

**Mots clés:** Fraction volumique, Enceinte de réservoir, Convection naturelle, Nanofluide, nombres de Rayleigh thermiques.

## Abstract

In this memory, the hydrodynamic and thermal characteristics of barium titanate nanofluids filling in a transformer (winding core), located inside a closed tank are studied numerically. Synthetic ester (SE), mineral oil (MO) and gas-liquid (GTL) are used as base fluids. The mathematical model for convective heat transfer in nanofluids is followed to account for the effects of nanoparticle volume fraction distribution on the continuity, momentum and energy equations, in which the fluent code is used. The latter is based on the finite volume method coupled with the SIMPLER algorithm. Numerical results for heat transfer are presented in the form of streamlines and isothermal profiles for a different value of Rayleigh number, base fluid and 10% volume fraction of nanoparticles. The effects of these parameters on the local and average Nusselt number are analyzed. In this study, the nanoparticles dispersed in the base fluid synthetic Ester (SE) confirmed the improved behavior of the nanofluid properties compared to the base mineral oil (MO) and base gas-liquid (GTL).

**Key words:** Volume fraction, Tank enclosure, Natural convection, Nanofluid, thermal Rayleigh numbers.

## ملخص

في هذه المذكرة، تمت دراسة الخصائص الهيدروديناميكية والحرارية لسوائل تيتانات الباريوم النانوية التي تملأ في محول (قلب متعرج)، الموجود داخل خزان مغلق، عددياً. يتم استخدام الإستر الصناعي (SE) والزيوت المعدنية (MO) والغاز السائل (GTL) كسوائل أساسية. يتم اتباع النموذج الرياضي لنقل الحرارة بالحمل الحراري في السوائل النانوية لتفسير تأثيرات توزيع الكسور الحجمية للجسيمات النانوية على معادلات الاستمرارية والزخم والطاقة، حيث يتم استخدام الكود بطلاقة. يعتمد الأخير على طريقة الحجم المحدود المقترنة بخوارزمية SIMPLER. يتم تقديم النتائج العددية لنقل الحرارة في شكل خطوط انسيابية وملامح متساوية الحرارة لقيمة مختلفة من عدد رايلي والسائل الأساسي وكسر حجم 10% من الجسيمات النانوية. تم تحليل تأثير هذه المتغيرات على متوسط عدد نسلت المحلي والمتوسط. في هذه الدراسة، أكدت الجسيمات النانوية المشتتة في السائل الأساسي الصناعي إستر (SE) تحسن سلوك خصائص المواع النانوية مقارنة بالزيت المعدني الأساسي (MO) والغازات السائلة السائلة (GTL).

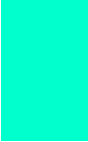
**الكلمات المفتاحية:** الكسر الحجمي، حاوية الخزان، الحمل الحراري الطبيعي، المائع النانوي، أرقام رايلي الحرارية.

## Liste des figures

<b>Fig.2.1.</b>	Présentation des nano-fluides, vue au microscope électronique [2].	.....22
<b>Fig.2.2.</b>	Schéma du phénomène de transfert de chaleur par conduction.	.....23
<b>Fig.2.3.</b>	Schéma du phénomène de transfert de chaleur par rayonnement.	.....24
<b>Fig.2.4.</b>	Schéma du phénomène de transfert de chaleur par convection.	.....24
<b>Fig.2.5.</b>	Four à convection forcée [4].	.....25
<b>Fig.2.6.</b>	Schéma de la convection naturelle.	.....26
<b>Fig.2.7.</b>	Schéma travail de la convection.	.....26
<b>Fig.3.1.</b>	Modèle physique	.....29
<b>Fig.3.2.</b>	Représentation schématique des générations a) modèle physique, b) grille	.....35
<b>Fig.3.3.</b>	Etapas de résolution suivies par GAMBIT et FLUENT.	.....37
<b>Fig.3.4.</b>	Convergence avec raffinement du maillage à $Ra_t = 10^4$ le long du cylindre thermique interne à partir du nombre de Nusselt moyen	.....38
<b>Fig.3.5.</b>	Evolution des résidus pour un canal vertical remplie de nanofluide (MO- BaTiO <sub>3</sub> )	.....40
<b>Fig.3.6.</b>	Système d'itération	.....42
<b>Fig.4.1</b>	Isothermes (à gauche) et Isocourants (à droite) du nanofluides BaTiO <sub>3</sub> -SE (.....), BaTiO <sub>3</sub> -MO ( ) et BaTiO <sub>3</sub> -GTL (—), a) $Ra_t = 10^3$ , b) $Ra_t = 10^4$ , c) $Ra_t = 10^5$ , d) $Ra_t = 10^6$ avec $\phi = 10\%$	.....48

---

<b>Fig.4.2</b>	Distribution de nombre de Nusselt moyen en fonction de nombre de Rayleigh thermique autour d'un transformateur (paroi interne) pour différentes fluides de bases à $\varphi = 10\%$ .	.....49
<b>Fig.4.3</b>	Distribution du nombre de Nusselt local le long de la surface de la paroi externe pour différentes fluides de bases à $Ra_t = 10^6$ et $\varphi = 10\%$	.....50
<b>Fig.4.4</b>	Distribution du nombre de Nusselt local le long de la surface de la paroi interne pour différentes fluides de bases à $Ra_t = 10^6$ et $\varphi = 10\%$	.....51
<b>Fig.4.5</b>	Evolution de la température sans dimension en $Y = 0.01$ pour les trois fluides de bases à $Ra_t = 10^6$ et $\varphi = 10\%$	.....52
<b>Fig.4.6</b>	Vitesse perpendiculaire dans $Y = 0,01$ pour les trois fluides de bases à $Ra_t = 10^6$ et $\varphi = 10\%$	.....52



## Liste des tableaux

<b>Tableau 2.1.</b>	Propriétés thermo physiques des nanoparticules et les fluides caloporteurs.	.....21
<b>Tableau 3. 2.</b>	Critères de résolution et coefficients de sous-relaxation utilisés	.....33
<b>Tableau 3. 2.</b>	Critères de résolution et coefficients de sous-relaxation utilises	.....41

## Nomenclature

$T$	Température effective des cellules en Kelvin [K]
$I_{pv}$	Le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur [A]
$V_{pv}$	Est la tension aux bornes de cette même cellule [V]
$I_{ph}$	Photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de température [A]
$R_{shu}$	La résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction
$R_{ser}$	La résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions
$I_{cc}$	Courant de court-circuit [A]
$V_{co}$	Tension de circuit-ouvert [V]
$\eta$	Rendement énergétique
$P_{inc}$	La puissance solaire incidente [W]
$P_{max}$	La puissance électrique maximale fournie par la cellule [W]
$FF$	Facteur de forme
$\emptyset$	Flux de chaleur [W]
$S$	La surface [m <sup>2</sup> ]
$\varphi_{st}$	Flux de chaleur stocké [W]
$\varphi_g$	Flux de chaleur généré [W]
$\varphi_e$	Flux de chaleur entrant [W]
$\varphi_s$	Flux de chaleur sortant [W]
$\lambda$	Conductivité thermique du milieu [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$x$	Variable d'espace dans la direction du flux [m]
$h$	Coefficient de transfert de chaleur par convection [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\sigma$	Constante de Stefan [5,67.10 <sup>-8</sup> W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ]
$\varepsilon_p$	Facteur d'émission de la surface
$\dot{m}$	Débit massique [kg.s <sup>-1</sup> ]
$C$	Chaleur spécifique [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Masse volumique [kg m <sup>-3</sup> ]
$V$	Volume [m <sup>3</sup> ]
$\dot{q}$	Densité volumique d'énergie générée [W m <sup>-3</sup> ]

---

## *Introduction générale*

La croissance rapide du secteur de l'électricité dans le pays permet en effet de protéger les équipements de l'installation pour un fonctionnement fiable pendant leur durée de vie. Le transformateur électrique est l'un des équipements vitaux dans la transmission et la distribution d'énergie et le fonctionnement fiable du réseau du système électrique [1–3]. De plus, un tiers du transformateur est confronté à un grave problème de dégradation de l'isolation [4]. Dans les transformateurs haute tension, le mélange de papier (isolant en fibre de cellulose) et d'isolant liquide (huile minérale dérivée du pétrole) est utilisé comme système d'isolation [5] en raison de leurs propriétés diélectriques et thermiques supérieures [6]. La fiabilité et la durée de vie des transformateurs dépendent principalement de l'état du système d'isolation [7]. Le système d'isolation est une structure complexe constructive qui combine à la fois des canaux d'huile et des couches de carton comprimé [8]. Les liquides diélectriques comme l'huile minérale et l'Ester ont été largement utilisés dans l'industrie de l'énergie depuis plusieurs décennies en raison de ses propriétés d'isolation et de refroidissement [9,10]. Ils protègent également le noyau et l'enroulement qui est immergé dans l'huile en empêchant le contact atmosphérique direct avec le papier de cellulose et l'enroulement d'isolation. Bien que, ils ont un faible point d'éclair et de feu, une bonne tension de claquage diélectrique et une bonne viscosité [11].

Les applications nanotechnologiques devraient fournir une meilleure solution sur le système d'isolation ayant une résistance diélectrique améliorée dans les systèmes d'alimentation électrique avec un impact minimal sur l'environnement. Ce mémoire passe en revue les performances caractéristiques des esters et huiles MO à base de nanofluides. La

stabilité des nanoparticules due à l'agglomération a été difficile pour les chercheurs de travailler sur les nanofluides comme isolant liquide alternatif dans les transformateurs hautes tensions. De plus, les nanofluides améliorent les caractéristiques de performance de l'isolation liquide, ce qui réduit les défaillances accidentelles dans les transformateurs.

Le titanate de baryum a été introduit en raison de sa bonne propriété diélectrique et de sa faible inflammabilité. Plus tard, il a révélé que dans certaines conditions la combustion par des produits de PCB était toxique. Pour cette raison, l'industrie attend avec impatience les alternatives appropriées [12,13].

Du point de vue des risques pour la sécurité et l'environnement, l'huile minérale MO n'est plus utilisée dans les transformateurs. De ce point de vue, la recherche est ciblée sur l'huile isolante écologique à base d'ester pour transformateur de puissance. Les esters naturels (NE) et les esters synthétiques (SE) sont les huiles isolantes à base d'ester utilisées comme liquide de refroidissement et isolant pour les transformateurs. De nombreuses recherches ont été menées pour rechercher une alternative appropriée d'isolation liquide au MO conventionnel [14]. De préférence, tout liquide isolant doit répondre à certaines exigences, à savoir : excellentes propriétés diélectriques, thermiques et chimiques et biodégradabilité. Les nanofluides ont été au centre des préoccupations des chercheurs et traités comme un liquide de transfert de chaleur de nouvelle génération, ils optent pour une capacité de transfert de chaleur améliorée. En 1995 Choi et al. [15] ont été les premiers à proposer le terme nanofluide, défini comme un fluide colloïdal dispersé de manière homogène avec des particules de taille nanométrique à un pourcentage en poids.

Dans la présente étude, le transfert de chaleur par convection naturelle stationnaire laminaire de nanofluides confinés dans un transformateur (noyau d'enroulement), situé à l'intérieur d'un réservoir fermé avec la source de chaleur discrète est étudié numériquement. Notre objectif est de prédire l'effet du type de fluide de base et du nombre de Rayleigh sur le transfert de chaleur.

L'objectif de ce travail est de prédire l'effet du type de fluide de base et du nombre de Rayleigh sur le transfert de chaleur, et de fournir l'état de l'art de la littérature sur les nombreux impacts de l'application des nanotechnologies dans les liquides isolants à base d'Ester, huile minérale et gaz-liquide des transformateurs de puissance. Plusieurs enquêtes ont révélé que l'influence des nanoparticules a montré de merveilleuses performances dans les propriétés du liquide isolant du transformateur.

La présente mémoire se répartit en quatre chapitres. Le premier chapitre consiste à une synthèse bibliographique sur les principales thématiques abordées par les chercheurs sur le refroidissement et la convection naturelle dans les transformateurs à haute tension.

Le deuxième présente une généralité sur les nanoliquides et les modes de transfert de chaleur le troisième chapitre est consacré à la formulation mathématique et la méthode numérique. En premier, lieu on introduit les équations de conservation qui régissent l'écoulement ainsi que les conditions aux limites. Ensuite, une description de la méthode numérique utilisée est évoquée. Une mise sous forme adimensionnelle des équations gouvernantes, la discrétisation des équations, l'analyse et le choix du maillage, les conditions de convergence sont présentées également dans le troisième chapitre.

Des simulations numériques détaillée des champs dynamique et thermique des écoulements de convection naturelle dans la configuration proposée à un nombre de Rayleigh variable dans la gamme de  $10^3$  à  $10^6$  pour chaque fluide de base (Ester, huile minérale et gaz-liquide) avec nanoparticule le titanate de baryum fait l'objet du quatrième chapitre résultats et discussions.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale sur les résultats obtenus au cours de cette étude et par l'énoncé des perspectives à venir.

## Références

- [1] S.M. Bashi, U.U. Abdullahi, R. Yunus, A. Nordin, Use of natural vegetable oils as alternative dielectric transformer coolants, *Journal of the Institution of Engineers* 67 (2) (2006) 4–9.
- [2] M.A.G. Martins, Vegetable oils, an alternative to mineral oil for power transformers – experimental study of paper aging in vegetable oil versus mineral oil, *IEEE Electr. Insul. Mag.* (2010) 7–13.
- [3] S. Mahmud, G. Chen, I.O. Golosnoy, G. Wilson, P. Jarman, 'Experimental studies of influence of different electrodes on bridging in contaminated transformer oil', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 22 (5) (Oct. 2015) 2433–2441.
- [4] H. Borsi, "Ester fluid MIDELE 7131 as PCB substitute for distribution transformers", in *10 Int. Conf. Conduction and breakdown in Dielectrics, Liq. (ICDL)* (1990) 514–518.

- 
- [5] S. Krawiec, Review of recent changes to mineral insulating oil specifications, in, IEEE Electrical Insulation Conference (2009) 363–367.
- [6] T. Nunn, A comparison of liquid-filled and dry-type transformer technologies, in, Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (2000) 105–112.
- [7] R. Madavan, S. Balaraman, Failure analysis of transformer liquid- solid insulation system under selective environmental conditions using weibull statistics method, *Eng. Fail. Anal.* 65 (2016) 26–38.
- [8] T.O. Rouse, Mineral insulating oil in transformers, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 14 (3) (1998) 6–16.
- [9] I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach, Challenge of mixed insulating liquids for use in high voltage transformers. Part 1: investigation of mixed liquids, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 18 (3) (2002) 18–31.
- [10] R. Liu, C. Törnkvist, V. Chandramouli, O. Girlanda, L.A.A. Pettersson, Ester fluids as alternative for mineral oil: the difference in streamer velocity and LI breakdown voltage, in, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (2009) 543–548.
- [11] T.V. Oommen, Vegetable oils for liquid-filled transformers, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 18 (1) (2002) 6–11.
- [12] H. Borsi, Dielectric behaviour of silicone and ester fluids for use in distribution transformer, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 26 (4) (1991) 755–762.
- [13] H. Kuwahara, K. Tsuruha, H. Munemura, T. Ishii, Partial discharge characteristics of silicone liquids, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 11 (1975) 86–91.
- [14] R. Asano, A. Stephane, Reducing environmental impact and improving safety and performance of power transformer with natural ester insulating fluids, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 50 (1) (2014) 134e141.
- [15] S.U.S. Choi, J.A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME Int. Mech. Eng. Congr, Expos*, 1995.

# Chapitre

## 1

### *Recherche bibliographique*

Lors de l'exploitation de réseaux électriques, le transformateur de puissance est un composant électrique haut tension essentiel. Il s'agit d'un dispositif statique à deux ou plusieurs enroulements qui, pour transmettre l'énergie, utilise l'induction électromagnétique pour transformer un système de tension et de courant alternatif en un autre système de tension et de courant ayant généralement des valeurs différentes mais fonctionnant à la même fréquence. Énergie électrique. Son utilisation principale est de réduire les pertes dans les réseaux électriques. Les transformateurs ont le défaut d'être bruyants, de pouvoir prendre feu et de provoquer des pertes, même si elles sont faibles en proportion. La recherche actuelle tente de remédier à ces problèmes et de réduire les pertes, le bruit et l'impact écologique général. De nouveaux types d'huiles minérales et de matériaux supraconducteurs sont des pistes explorées. Il faut comprendre que même si les transformateurs de puissance ont des rendements allant de 99,5 à 99,8%, les puissances qui les traversent sont tellement importantes que les pertes représentent en valeur absolue de grandes valeurs. Ainsi pour un transformateur de 800 MVA, on a, avec un rendement de 99,8%, des pertes de 1,6 MW, sous forme de chaleur difficile à évacuer. Un système de refroidissement est donc toujours en place pour maintenir les températures des enroulements et de l'isolation (huile par exemple) à des niveaux acceptables.

L'utilisation de nanofluides est la méthode de refroidissement la plus élémentaire. La chaleur créée par les bobines et le circuit magnétique du transformateur, qui évacue la chaleur par convection vers l'extérieur, refroidit le nanofluide, qui à son tour transfère la chaleur vers l'extérieur du transformateur. L'augmentation de la conductivité thermique est possible grâce à des nanofluides ayant une bonne conductivité thermique (élevée). La partie active des

transformateurs larges est généralement immergée dans un nanofluide isolant de qualité supérieure. Ce nanofluide doit être diélectrique liquide, aussi sec et exempt d'oxygène que possible, et exempt de gaz et de particules combustibles.

Les ingénieurs ont étudié divers liquides de refroidissement et les chercheurs ont cherché à augmenter le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur. Les caractéristiques thermiques et électriques de certains liquides et leur applicabilité aux techniques de haute tension ont fait l'objet de plusieurs études. Il est donc fondamental d'étudier les techniques inventives et opérationnelles qui favorisent le rendement de la convection naturelle pour diverses formes de transformateurs. Les nanofluides ont également été utilisés pour améliorer le taux de transfert de chaleur en augmentant les conductivités thermiques du fluide souterrain à l'aide de nanoparticules suspendues. Parmi les travaux existants, nous citons quelques travaux expérimentaux et/ou numériques avec/sans l'utilisation de nanofluides. Fernández et al. [1] ont examiné et comparé les caractéristiques physiques, chimiques et électriques de fluides diélectriques fabriqués à partir d'huiles végétales. Chairul et al. [2] ont examiné les caractéristiques physiques, chimiques et électriques de l'huile de cuisson usagée traitée, conformément aux spécifications, afin d'étudier la possibilité de l'utiliser comme liquide diélectrique pour les transformateurs de puissance à haute tension. Pour évaluer la capacité de l'huile à résister à la rupture sous des contraintes électriques aussi intenses, Ghani et al. [3] ont soumis des huiles isolantes pour transformateurs à des chocs électriques répétés ou à des pannes à l'intérieur de transformateurs de puissance. Tlhabologo et al. [4] ont mis au point l'huile minérale, qui était le matériau de choix pour les diélectriques liquides des transformateurs jusqu'aux esters synthétiques et naturels. Les huiles à base d'esters sont le substitut de l'huile minérale à base de pétrole, qui est non biodégradable et dont les effets diélectriques sont insuffisants, et font l'objet d'études intensives pour en améliorer les qualités. Cette étude s'est penchée sur les tests diélectriques et de gaz dissous, ainsi que sur leurs caractéristiques chimiques, électriques, physiques et de vieillissement. Yamana et al. [5] ont amélioré la fiabilité, la rentabilité et la chaleur environnementale de l'insolation liquide des transformateurs. Auparavant, l'huile minérale à isolation solide était le principal composant des transformateurs à huile. L'augmentation des demandes de modification de l'insolation liquide est due au fait que l'huile minérale présente des propriétés négatives. Pour améliorer l'état de l'insolation liquide, il est très conseillé de présenter une insolation liquide alternative pour une plus grande utilité de l'équipement et de l'approvisionnement en puissance. Les auteurs ont fourni, examiné et résumé des recherches approfondies sur de nombreux types de nanoparticules, le processus de création de nanofluides et les effets de ces matériaux sur les domaines physiques, chimiques et électriques. Mariprasath et al. [6] ont

étudié expérimentalement l'examen spectroscopique des diélectriques liquides alternatifs pour transformateurs. Ils ont utilisé de l'huile minérale imprégnée de matériaux isolants comme milieu isolant dans les transformateurs. Ils se sont efforcés de montrer que l'huile de *Pongamia pinnata* peut fonctionner comme diélectrique liquide de remplacement pour un transformateur. Ils ont réalisé une étude sur la détérioration des matériaux isolants solides en utilisant la DGA, la SEM, la XRD et la spectroscopie UV-Vis. Ali et al. [7] ont analysé l'impact du processus de purification sur la conductivité thermique. Ils ont découvert que la présence d'eau ou d'humidité favorise le vieillissement thermique précoce, ce qui réduit la durée de vie de l'huile de transformateur. Ils ont conclu que la présence d'eau affecte favorablement les propriétés thermiques et négativement les qualités diélectriques. Xue et al. [8] ont étudié la mobilité des porteurs de charge dans des fluides à base d'esters et d'huiles minérales. Ils ont découvert que par rapport aux fluides esters naturels et manufacturés, l'huile minérale avait une mobilité de portage de charge supérieure. Rozga et al. [9] ont étudié les esters sous différents angles, notamment d'un point de vue fondamental sur les mécanismes de rupture et d'un point de vue applicatif. Ils agissent toujours par défi en utilisant des équipements à haute tension, et il est donc nécessaire d'approfondir la compréhension des différentes variables qui peuvent être prises en compte dans leur fonctionnement. Leur intention est de présenter les progrès récents de la recherche sur les esters liquides synthétiques en relation avec les problèmes assignés qui, selon les auteurs, sont les plus importants pour le développement des esters. Bajestan et al. [10] ont utilisé le fluide caloporteur fabriqué à partir de restes d'huiles de cuisson comme substitut universel aux lubrifiants à base de pétrole utilisés dans le refroidissement des transformateurs. Ils ont créé un exemple numérique pour comparer l'efficacité de l'huile végétale étudiée à celle de l'huile de transformateur traditionnelle dans le refroidissement des transformateurs. Les résultats démontrent que l'huile végétale convient mieux au refroidissement que l'huile à base de pétrole. Altay et al. [11] ont utilisé de l'huile minérale comme fluide de transfert de chaleur dans une étude sur le refroidissement des transformateurs. À l'aide d'un modèle informatique en 3D, ils ont comparé les capacités de refroidissement de deux fluides à base d'ester à celles de l'huile minérale. Oparanti et al. [12] ont présenté l'impact des nanoparticules ( $\text{TiO}_2$  &  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sur l'ester méthylique généré à partir d'huile de palmiste pour les équipements électriques remplis d'huile. Ils ont examiné l'écart de perte, la conductivité CA et la force de rupture CA du nanofluide à base d'ester méthylique. Il a été démontré que l'ajout des deux nanoparticules diminuait la tangente de perte de l'ester méthylique et la conductivité CA tout en améliorant le nanofluide d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Qiu et al. [13] ont déterminé la conductivité de distribution des molécules d'eau pour l'huile minérale en étudiant la conductivité de

distribution des molécules d'eau dans l'huile de palme à l'aide de l'approche de la dynamique moléculaire. Siddique et al. [14] se sont concentrés sur la préparation d'un mélange d'huile d'ester naturel et d'un mélange d'huile minérale comme fluide de base et sur l'étude de la conductivité diélectrique de ce fluide derrière des nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  et de  $\text{ZnO}$  existantes. Kieseewetter et al. [15] ont examiné la résistance électrique du mélange de deux liquides diélectriques de transformateur - huiles de pétrole et liquides de silicone -. On pense que lorsque ces liquides diélectriques sont combinés, des structures colloïdales peuvent se former et influencer les effets électriques de la combinaison. Manerot et al. [16] ont comparé les caractéristiques chimiques et physiques de l'huile de palme à celles de l'huile minérale en tant que liquide isolant. Ils ont examiné les impacts physiques et chimiques des nouveaux liquides avant et après le processus de transformation. Les tests ont permis de déterminer que l'huile de palme est un isolant liquide de remplacement potentiel à utiliser dans le transformateur (six mois après le fonctionnement du transformateur). Taghikhani et al. [17] ont examiné les performances thermiques d'un transformateur huile-air triphasé naturel ainsi que les effets thermodynamiques de trois échantillons de nanofluides à base d'oxyde métallique. Les nanoparticules d'oxyde de cuivre, de magnétite et d'alumine sont distribuées indépendamment dans le fluide de fondation du transformateur des nanofluides étudiés, en supposant des pourcentages de volume solides variés. En réponse aux demandes du conseil mondial des grands réseaux électriques, Zukowski et al. [18] ont conçu et testé une technologie d'insolation à l'huile de papier avec les paramètres  $X = 50\%$  et  $Y = 30\%$ . Il a été constaté que les dimensions du canal d'huile affectaient la qualité du processus d'assemblage. Zdanowski [19] a augmenté la capacité de refroidissement en forçant le liquide isolant à circuler. Il a présenté des données étayant la viabilité de l'utilisation du fullerène  $\text{C}_{60}$  pour réduire le phénomène d'électrification du flux provoqué par l'écoulement de diélectriques liquides. Madavan et al. [20] ont combiné des huiles végétales telles que l'huile de coco, l'huile d'olive et l'huile minérale selon différents schémas. D'après les résultats empiriques, l'ester naturel se comporte de manière plus amicale que l'huile minérale, et les performances de l'isolant liquide combiné augmentent avec l'ajout du rapport de mélange. En comparant les effets électriques des matériaux composites et de l'eau, Zukowski et al. [21] ont évalué et étudié la conductivité et la permittivité des composites liquides-isolants à base d'eau pressés électriquement. Ils ont constaté que la présence d'eau entraînait une augmentation de la perméabilité du composite dans la gamme de fréquences inférieure à 100 Hz. Oparanti et al. [22] ont étudié les effets des nanoparticules sur les caractéristiques des fluides qui protègent les esters. La dispersion des nanoparticules a permis de réduire la perte diélectrique. La tension de pompe DC idéale pour les nanofluides  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$  est de 0,6

%. Les nanofluides d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  se sont avérés être des isolants efficaces. Sabrina et al. [23] ont présenté une compilation d'analyses d'investigation divisées en trois parties. La fabrication du nanofluide est couverte dans la partie I, qui comprend une variété de nanomatériaux, la meilleure augmentation de la concentration et des méthodes de synthèse pratiques pour créer des nanofluides en suspension stable. La partie II examine et analyse le comportement du nanofluide, y compris les tensions de claquage électrique, les tests d'impulsion, les propriétés thermiques et diélectriques. Les limites des nanofluides sont soulignées dans la partie III. Mahidhar et al. [24] ont étudié les effets des nanoparticules de silice sur les propriétés diélectriques de l'huile ester synthétique. Un tensioactif est ajouté pour créer un nanofluide stable. Le constant diélectrique augmente et la constante de perte diélectrique diminue à mesure que l'on ajoute des nanoparticules au système. Khan et al. [25] ont étudié l'impact de la température et des nanoparticules sur les propriétés diélectriques des huiles artificielles à base d'esters. Daghra et al. [26] ont mené des recherches expérimentales sur les performances thermiques de l'ester synthétique liquide pour transformateur et de l'huile minérale hydrocarbonée gaz-liquide pour transformateur en tant que réfrigérants dans un schéma en spirale et en zigzag.

L'objectif principal du système de refroidissement est d'éliminer ou de transférer efficacement la chaleur produite par les pertes dans les enroulements, le noyau et les composants structurels du transformateur de puissance vers l'environnement extérieur. L'air ou l'eau servent généralement de moyen de refroidissement pour l'environnement. Cette nouvelle approche du refroidissement peut être utilisée dans les transformateurs remplis de nanofluides. Zdanowski [27,28] a présenté des essais de tendance à la charge électrostatique (ECT) pour des mélanges d'huile minérale Trafo EN fraîche et vieillie avec l'ester naturel Envirotemp FR3 du point de vue du retrofitting. Les esters naturels et synthétiques sont des liquides caractérisés par des propriétés isolantes, un point d'éclair élevé et une biodégradabilité. Il a été démontré que l'ECT dépend fortement du type de liquide isolant et du matériau de la conduite, ainsi que de la composition des mélanges. Le résultat le plus important est qu'une petite quantité (jusqu'à 10 %) d'huile minérale fraîche et vieillie est efficace pour réduire l'ECT de l'Envirotemp FR3 Natural ester. Ghani et al. [29] ont concentré sur les méthodes utilisées pour améliorer la maniabilité des huiles NEI dans les transformateurs de puissance, à savoir (1) l'abaissement du point d'écoulement, (2) les modifications chimiques, (3) les changements dans la conception du transformateur, (4) l'ajout de nanoparticules, (5) l'ajout d'additifs de résistance à la foudre, et (6) l'ajout d'antioxydants. Les avantages et les défis de chaque méthode sont également abordés. Samikannu et al. [30] ont présenté les huiles naphthéniques ont été le premier choix au fil des

ans et des solutions alternatives sous forme d'esters naturels font l'objet de recherches approfondies en raison des effets de l'huile minérale (MO) sur l'environnement. L'un de ces esters, le Marula. L'expérience se concentre sur la mesure des caractéristiques électriques, physiques, chimiques et thermiques conformément aux normes de l'ASTM et de la CEI. En outre, l'utilisation d'un tel liquide de refroidissement diélectrique minimise les dommages causés aux enroulements à l'intérieur de la cuve du transformateur. Das et al. [31] ont expérimenté un examen comparatif de l'huile isolante à base de *Jatropha Curcas* a été présenté sur la base des résultats expérimentaux des études précédentes, de la perspective de l'état actuel et des besoins de développement futurs. Antonio et al. [32] ont utilisé l'huile minérale naphthénique dans les transformateurs, les disjoncteurs et d'autres équipements électriques pour des fonctions d'isolation et de refroidissement. En raison de leurs conditions d'utilisation, elles peuvent être soumises à des réactions d'oxydation causées par la présence d'oxygène, d'eau et de métaux, ce qui affecte les performances de l'huile. En utilisant la méthode ASTM D2440, des études d'oxydation ont été menées sur des huiles isolantes, en utilisant des antioxydants commerciaux et des passivants métalliques, afin d'évaluer et de comparer leur stabilité thermique à l'oxydation, contrôlée par l'analyse FTIR, l'indice d'acidité total et la teneur en boues des échantillons oxydés. Une séquence expérimentale de combinaisons d'antioxydants et de passivants métalliques a été mise au point pour rechercher les meilleures concentrations susceptibles d'améliorer la stabilité de l'huile naphthénique isolante. La combinaison de l'antioxydant Irganox L115 et du passivant métallique Irgamet 039 a donné les meilleurs résultats en matière d'inhibition de l'oxydation de l'huile parmi les échantillons étudiés. Raj et al. [33] ont déterminé l'applicabilité des esters naturels (EN) comme l'huile de Baobab (BAO) et l'huile de Mongongo (MGO) dans les transformateurs de puissance. La propriété diélectrique du kérosène (KER) est utilisée pour diminuer la viscosité des esters naturels afin de favoriser une meilleure circulation de l'huile dans les réservoirs des transformateurs. Le kérosène, non volatil et bon lubrifiant, protège les métaux alcalins de l'oxydation/corrosion et sa propriété de miscibilité est utile comme diluant d'huile. Les compositions de mélange utilisées ici sont 1% KER : 99% NE, 5% KER : 95% NE et 10% KER : 90% NE et les mélanges sont soumis à des essais diélectriques selon les normes IEC (International Electrotechnical Commission) et ASTM (American Society for Testing and Materials). Des effets favorables de la température sont observés avec une amélioration de 16 % de la résistance au claquage et une réduction de 61,9 % de la viscosité cinématique pour le BAO, tandis qu'une amélioration de 24 % de la résistance au claquage et une réduction de 56,4 % de la viscosité cinématique sont observées pour le MGO avec une addition de 10 % de KER sans affecter la performance diélectrique du NE. Sur la base de ces

résultats, le kérosène est un additif prometteur pour le séchage de la vapeur, et il est donc recommandé comme additif rentable pour réduire la viscosité de l'huile et minimiser la quantité de saturation en eau. Sanz et al. [34] ont étudié le comportement d'imprégnation de huit solides diélectriques courants, avec deux esters et une huile minérale traditionnelle. Des équations empiriques de l'évolution de l'imprégnation dans le temps ont été obtenues, à partir desquelles les matériaux cellulosiques rigides présents dans les transformateurs et la viscosité des huiles diélectriques ont été identifiés comme les matériaux et les propriétés clés à prendre en compte lors de l'imprégnation. Une adaptation des processus d'imprégnation actuels aux huiles alternatives a été proposée en augmentant leur température de la température ambiante jusqu'à 61-74°C, en fonction de la viscosité de l'huile utilisée. Yu et al. [35] ont résumé les progrès récents dans l'étude des nanofluides, tels que les méthodes de préparation, les méthodes d'évaluation de la stabilité des nanofluides, les moyens d'améliorer la stabilité des nanofluides, les mécanismes de stabilité des nanofluides, et présente le large éventail d'applications actuelles et futures dans divers domaines, y compris l'énergie, la mécanique et les domaines biomédicaux. Baruah et al. [36] ont analysé l'effet de la polarisation des nanoparticules (NPs) sur l'amélioration de la permittivité relative lorsqu'elles sont dispersées dans le TO. Pour valider les théories existantes à ce sujet, des expériences sont menées pour déterminer les valeurs de la permittivité relative de l'huile minérale (MO) et de l'huile végétale (VO) fraîches, ainsi que de la MO-NF et de la VO-NF. L'huile végétale utilisée pour cette étude est l'huile de pongamia pinnata. IdrishKhan et al. [37] ont examiné l'influence de la taille et la forme des nanoparticules sur le nanofluide, et l'influence des paramètres clés sur la stabilité des nanofluides et le niveau optimal de chaque paramètre. Amalanathan et al. [38] ont montré que la nanocharge  $\text{TiO}_2$  et le surfactant bromure de cétyle-triméthylammonium (CTAB) dans l'huile d'ester présentent une tension d'amorçage corona plus élevée sous des tensions CA et CC. Khaled et al. [39] ont étudié les effets des nanoparticules conductrices ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) et isolantes ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{SiO}_2$ ) à différentes concentrations sur la rigidité diélectrique en courant alternatif de l'ester synthétique MIDEAL 7131. Les fonctions de distribution normale et de Weibull sont utilisées pour analyser les tensions de claquage avec des probabilités de risque estimées à 1, 10 et 50 %. Bouras et al. [40] ont présenté une étude numérique de la convection naturelle de transferts thermiques laminaires stationnaires dans un anneau horizontal entre un cylindre intérieur carré chauffé et un cylindre extérieur elliptique froid. Un nanofluide Cu-eau circule dans cet espace annulaire. Différentes valeurs du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique des nanoparticules sont étudiées. Le système d'équations régissant le problème a été résolu numériquement par le code de calcul fluent basé sur la méthode des volumes finis et sur l'approximation de Boussinesq. L'objectif

est d'étudier l'influence du nombre de Rayleigh thermique et de la fraction volumique des nanoparticules sur le taux de transfert de chaleur. Taloub et al. [41] ont réalisé une étude numérique sur l'amélioration du refroidissement d'un microprocesseur par l'utilisation de nanofluides. La convection naturelle est analysée dans une boîte clôturée avec une source de température rencontrée à son bord inférieur et chargée d'une nanoparticule d'éthylène glycol et de cuivre. Bouras et al. [42] ont étudié numériquement la convection naturelle des transferts de chaleur laminaires stationnaires dans une cavité rectangulaire fermée avec une source locale de génération de chaleur volumétrique interne. Pour différents nombres de Rayleigh et différentes fractions volumiques de nanoparticules. Le système d'équations régissant le problème a été résolu numériquement par le code informatique fluent basé sur la méthode des volumes finis. Ils ont étudié les effets de différents nombres de Rayleigh et fractions volumiques de nanoparticules sur la convection naturelle. Taloub et al. [43, 44] ont étudié numériquement la convection naturelle du transfert de chaleur laminaire en régime permanent dans un anneau horizontal entre un cylindre intérieur hexagonal chauffé et un cylindre extérieur hexagonal froid et dans un anneau horizontal à l'intérieur d'une surface elliptique interne chauffée et d'une surface carrée externe froide. Un nanofluide Cu-eau traverse cet espace annulaire. Le système d'équations régissant le problème a été résolu numériquement par le code de calcul fluent basé sur la méthode des volumes finis. Basée sur l'approximation de Boussinesq. Les côtés intérieur et extérieur des deux cylindres sont maintenus à une température fixe. Son objectif est d'examiner l'impact de différents paramètres sur le flux de transfert de chaleur.

## Références

- [1] I. Fernández, A. Ortiz, F. Delgado, C. Renedo, S. Pérez, Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers, *Electric Power Systems Research*. 98 (2013) 58-69.
- [2] I. S. Chairul, N. Abu Bakar, M. N. Othman, S. Ab Gha, Potential of Used Cooking Oil as Dielectric Liquid for Oil-Immersed Power Transformers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 28(4) (2021) 1400-1407.
- [3] S. Ab Ghani, M. S. A. Khiar, I. S. Chairul, M. I. Zamir, Effect of repeated electrical breakdowns on mineral and natural ester insulating oils, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 10 (2) (2021) 2989-2996.

- 
- [4] B. A. Tlhabologo, R. Samikannu, Alternative liquid dielectrics in power transformer insulation: A review, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 23(3) (2021) 1761-1777.
- [5] M. Yamuna, M. Rengar, A comprehensive review on nanotechnology for enhancement in performance of transformer liquid insulation, *Materials Today: Proceedings*. 47(2) (2021) 229-234.
- [6] T.S. Mariprasath, K. Victor, M. Sreedhar, K. Amaresh, An experimental study on spectroscopic analysis of alternating liquid dielectrics for transformer, *Electrical Engineering* 103(2) (2021).
- [7] M. Ali, N.K. Deenesh, G. Kadir, K. Hasnan, Effect of purification process on the thermal conductivity and breakdown voltage of inhibited, isoparaffinic transformer oil used in electric train, *Journal of Physics Conference Series*, 1878 (1) (2021) 012009.
- [8] Q. Xue, I. Timoshkin, M. P. Wilson, M. Given, Mobility of charge carriers in mineral oil and ester fluids. *High Voltage*, 6 (6) (2021) 1040-1050.
- [9] P. Rozga, A. Beroual, P. Przybylek, M. Jaroszewski, A Review on Synthetic Ester Liquids for Transformer Applications, *Energies*. 13(23) (2020) 1-33.
- [10] E. E. Bajestan, H. Tiznobaik, P. Gheorghe, M. Arjmand, Thermal Behavior of Power Transformers Filled With Waste Vegetable Oil-Based Biodiesel Under Dynamic Load, *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME* 143(9) (2021) 1-9.
- [11] R. Altay, A. Santisteban, C. Olmo, C. Renedo, Use of Alternative Fluids in Very High-Power Transformers. *Experimental and Numerical Thermal Studies, IEEE Access*. 8 (2020) 207054-207062
- [12] S. Oparanti, A. Khaleed, A. A .Abdelmalik, AC breakdown analysis of synthesized nanofluids for oil-filled transformer insulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 117(5-6) (2021) 1-9.
- [13] Q. Qiu, J. Zhang, L. Yang, J. Zhang, Simulation of the diffusion behavior of water molecules in palm oil and mineral oil at different temperatures, *Renewable Energy* 174 (1) (2021) 909-917.
- [14] Z. b. Siddique, S. Basu, P. Basak, Dielectric Behavior of Natural Ester Based Mineral Oil Blend Dispersed with TiO<sub>2</sub> And ZnO Nanoparticles as Insulating Fluid for Transformers, *Journal of Molecular Liquids*. 339 (4) (202) 116825.
- [15] V. Kiesewetter, A. S. Reznik, N. M. Zhuravleva, Research of Dielectric Properties of the Mixtures of Petroleum Transformer Oils and Silicone Liquids. *Conference: 2021*

- IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus).
- [16] S. Maneerot, N. Pattanadech, The Comparative Study of Physical and Chemical Properties of Palm Oil and Mineral Oil Used in a Distribution Transformer, 8<sup>th</sup> International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2020, pp. 385-388.
- [17] Z. Taghikhani, M. A. Taghikhani, G. B. Gharehpetian, Comprehensive comparative analysis of Metal-Oxide nanoadditives impacts on Oil-Filled Finemet and Vitroperm alloy core transformers HST concerning nanofluid thermophysical properties accurate estimation, *Energy Conversion and Management*. 260 (1) (2022) 115594.
- [18] P. Zukowski, P. Rogalski, V. Bondariev, M. Sebok, Diagnostics of High Water Content Paper-Oil Transformer Insulation Based on the Temperature and Frequency Dependencies of the Loss Tangent, *Energies* 15(8) (2022) 2813.
- [19] M. Zdanowski, Streaming Electrification of C60 Fullerene Doped Insulating Liquids for Power Transformers Applications. *Energies* 15(7) (2022) 2496.
- [20] R. Madavan, S. Saroja, A. Karthick, S. Murugesan, Performance analysis of mixed vegetable oil as an alternative for Transformer insulation oil, *Biomass Conversion and Biorefinery*. (2022).
- [21] P. Zukowski, P. Rogalski, T. N. Kołtunowicz, K. Kierczynski, DC and AC Tests of Moisture Electrical Pressboard Impregnated with Mineral Oil or Synthetic Ester—Determination of Water Status in Power Transformer Insulation, *Energies* 15(8) (2022) 2859.
- [22] S. O. Oparanti, A. A. Khaleed, A. A. Abdelmalik, Nanofluid from Palm Kernel Oil for High Voltage Insulation, *Materials Chemistry and Physics*. 259 (2021) 123961.
- [23] N. S. Suhaimi, A. R. A. Rahman, M. F. M. Din, M. Z. Hassan, M. T. Ishak, and M. T. bin Jusoh, A Review on Oil-Based Nanofluid as Next-Generation Insulation for Transformer Application, *Journal of Nanomaterials*. 2020 (2020) 1-177.
- [24] G. D. P. Mahidhar, R. Sarathi, N. Taylor and H. Edin, Dielectric properties of silica based synthetic ester nanofluid, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27 (5) (2020) 1508-1515.
- [25] S. A. Khan, A. A. Khan, M. Tariq, Measurement of Tan-delta and DC Resistivity of Synthetic Ester Based Oil Filled with Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles, *Smart Science*. 9 (3) (2021) 216-225.

- 
- [26] M. Daghrah, Z. Wang, S. Member, Q. Liu, A. Hilker, and A. Gyore, Experimental Study of the Influence of Different Liquids on the Transformer Cooling Performance, *IEEE Transactions on power delivery*. 34 (2) (2019) 588-595.
- [27] M. Zdanowski, Electrostatic Charging Tendency Analysis Concerning Retrofilling Power Transformers with Envirotemp FR3 Natural Ester, *Energies*. 13 (17) (2020) 4420.
- [28] M. Zdanowski, Streaming Electrification of Nycodiel 1255 Synthetic Ester and Trafo EN Mineral Oil Mixtures by Using Rotating Disc Method, *Energies*. 13 (23) (2020) 6159
- [29] S. Ab Ghani, N. A. Muhamad, Z. B. A. Noorden, H. Zainuddin, Methods for improving the workability of natural ester insulating oils in power transformer applications: A review, *Electric Power Systems Research*. 163 (Part B) (2017) 655-667.
- [30] R. Samikannu, R. A. Raj, S. Murugesan, S. K. Venkatachary, Assessing the dielectric performance of Sclerocarya birrea (Marula oil) and mineral oil for eco-friendly power transformer applications, *AEJ - Alexandria Engineering Journal* 61(5) (2021).
- [31] A. Das, A. S. Chavan, D. Shill, S. Chatterjee, Jatropha Curcas oil for distribution transformer – A comparative review, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 46(6) (2012) 101259.
- [32] A. Antonio, Pontes Filho, F. Murilo T. Luna, Jr. Celio Loureiro Cavalcante, Oxidative stability of mineral naphthenic insulating oils: Optimization of commercial antioxidants and metal passivators, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 26 (1) (2019) 240-246.
- [33] R. A. Raj, R. Samikannu, A. Yahya, M. Mosalaosi, Enhancement of dielectric properties of Baobab Oil and Mongongo Oil using cost-effective additive for power transformer insulating fluids, *Environmental Technology & Innovation*. 20 (1) (2020)101150.
- [34] J. Sanz, O. Sancibrian, C. Olmo, C. Méndez, Study of the Impregnation of Power-Transformer Cellulosic Materials With Dielectric Ester Oils, *IEEE Access* PP. (99) (2020) 1-1.
- [35] W. Yu, H. Xie, A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications, *Journal of Nanomaterials*. 2012 (1) (2012) 1–1
- [36] N. Baruah, M. Maharana, S. S. Dey and S. K. Nayak, Nanoparticle Polarization Effect on the Permittivity of the Dielectric Liquid, 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), 2019, pp. 1-4

- 
- [37] A. IdrishKhan, A.Valan Arasu, A review of influence of nanoparticle synthesis and geometrical parameters on thermophysical properties and stability of nanofluids, *Thermal Science and Engineering Progress*. 11 (2019) 334-364.
- [38] A. J. Amalanathan, R. Sarathi, N. Harid and H. Griffiths, Investigation on flow electrification of ester-based  $\text{TiO}_2$  nanofluids, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 27 (5) (2020) 1492-1500.
- [39] U. Khaled and A. Beroual, AC dielectric strength of synthetic ester-based  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  nanofluids — conformity with normal and weibull distributions, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 26 (2) (2019) 625-633.
- [40] A. Bouras, D. Taloub, Z. Driss, S. Debka, Heat Transfer By Natural Convection from a Heated Square Inner Cylinder to Its Elliptical Outer Enclosure Utilizing nanofluids, *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 27 (2) (2022) 22-34.
- [41] D. Taloub, A. Bouras, D. Zied, Numerical study on the improvement of the cooling of ah microprocessor by the use of nanofluids, *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*. 17 (1) (2022) 66-79.
- [42] A. Bouras, D. Taloub, A. Amroune, Z. Driss, The Impact of Nanofluid on Natural Convection in an Isosceles Rectangular Container with a Heat Source, *Advanced Engineering Forum*. 47 (2022) 19-28.
- [43] D. Taloub, A. Bouras, D. Zied, Numerical Study of Heat Transfer by Natural Convection in Concentric Hexagonal Cylinders Charged with a Nanofluid, *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*. 17 (2022) 19-28.
- [44] D. Taloub, A. Bouras, 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.

# Chapitre

## 2

### *Généralité sur les nanoliquides et les modes de transfert de chaleur*

Ce chapitre est un petit rappel des concepts de base liés aux nano fluides et à leurs applications.

#### **2.1. Définition nano fluide**

Les nano-fluides sont dispersions de particules de taille nanométrique dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm, appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés [1].

#### **2.2. Préparation des nano fluides**

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

- Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.
- Les procédés chimiques, comme la pyrolyse ou la précipitation chimique.

Par contre pour les nano fluides il existe deux procédés distincts :

##### **2.2.1 Procédé en une étape (one-step method)**

Consiste à la dispersion des nanoparticules directement dans un fluide de base (synthèse directe dans un fluide de base) et de prévenir l'oxydation des particules de métal pur [2].

##### **2.2.2 Procédé en deux étapes (two-step method)**

La première étape consiste à fabriquer les nanoparticules, et dans la seconde étape les nanoparticules sont dispersées dans un fluide de base [3].

#### **2.3. Applications des nanofluides**

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications pour leurs propriétés magnétiques (paliers magnétiques à Ferro fluides, agents de contraste

enimagerie médicale), pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électro mouillage pour lentilles liquides), et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules fonctionnalisées.

En thermique, les nano fluides peuvent être utilisés partout où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées : refroidissement de composants électriques et électroniques, radars, automobile...etc.).

Les nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance, ainsi que des Micro Electro Mechanical Systems [4].

## 2.4. Propriétés thermo-physiques

Les propriétés thermo physiques qui caractérisant les nano fluides sont différentes selon la nature des nanoparticules. Ces caractéristiques sont :

- La masse volumique  $\rho$
- La fraction volumique  $\varphi$
- La conductivité thermique  $K$
- Le coefficient d'expansion volumique  $\beta$
- La chaleur spécifique  $C_p$
- La viscosité dynamique  $\mu$

### 2.4.1. Masse volumique

Pour calculer la masse volumique d'un nano-fluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique  $\varphi$  à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange.

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} = \frac{\rho_f V_f + \rho_p V_p}{V_f + V_p} \quad (2.1)$$

### 2.4.2. Fraction volumique

Des nanoparticules, notée  $\varphi$  désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + particule).

$$\varphi = \frac{\text{Volume particule}}{\text{Volume total du nanofluide}} = \frac{V_p}{V_f + V_p} \quad (2.2)$$

On en déduit alors la masse volumique du nano-fluide :

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_f \quad (2.3)$$

Où :

$\rho_{nf}$ : La masse volumique du nano – fluide

$\rho_f$ : La masse volumique du fluide de base.

$\rho_p$ : La masse volumique des nanoparticules.

### 2.4.3. Conductivité thermique

Une grande partie des travaux traitant des nanofluides porte sur la quantification de l'augmentation de la conductivité thermique [5], [6].

La conductivité thermique, exprimée en [ $W.m^{-1}K^{-1}$ ]

#### A) Modèle de Maxwell

La conductivité thermique effective du nano fluide peut être estimée par le modèle suivant Approximation auto-cohérente de Maxwell. Pour les entités à deux composants en suspension Particules sphériques [7]. Le modèle de Maxwell (1873) est donné par la formule suivante :

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} k_f \quad (2.4)$$

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 [6].

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

Établissement du modèle Hamilton et Cross pour résoudre la limite du modèle Maxwell. Car ce dernier n'est efficace que dans le cas des particules sphériques. La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante [8] :

$$k_{nf} = \frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_p)\varphi}{k_s + (n-1)k_f + \varphi(k_f - k_p)} k_f \quad (2.5)$$

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 HamiltonCrosser. Ce modèle considère l'effet d'interface entre les particules et le fluide de base, mais n'est efficace que pour les particules sphériques [5].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2(1+R)^3(k_f - k_p)\varphi}{k_p + 2k_f + (1+R)^3(k_f - k_p)\varphi} \quad (2.6)$$

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

#### 2.4.4. Coefficient d'expansion volumique

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 [5] :

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (2.7)$$

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 :

$$\beta_{nf} = \frac{\varphi(\rho\beta)_p + (1-\varphi)(\rho\beta)_f}{\rho_{nf}} \quad (2.8)$$

#### 2.4.5. Chaleur massique

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

$$(c_p)_{nf} = \varphi(c_p)_p + (1 - \varphi)(c_p)_f \quad (2.9)$$

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

$$(\rho c_p)_{nf} = \varphi(\rho c_p)_p + (1 - \varphi)(\rho c_p)_f \quad (2.10)$$

$(C_p)_{nf}$ ,  $(C_p)_f$ ,  $(C_p)_p$  désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nano fluide, du fluide de base et des nanoparticules [8]

#### 2.4.6. Viscosité dynamique

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 [7]. Les différents modèles de viscosités :

##### 2.4.6.1. 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 [8].

$$\mu_{nf} = \mu_f (2.5\varphi + 1) \quad (2.11)$$

Où :

$\mu_{nf}$  : La viscosité dynamique du nano fluide.

$\mu_f$  : La viscosité dynamique du fluide de base.

$\varphi$ : la fraction volumique des nanoparticules.

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

#### 2.4.6.2. Modèle de Brinkman

La formule de Brinkmann (1952) a complété le modèle d'Einstein jusqu'à La concentration volumique est inférieure à 4% [8] La viscosité du nano fluide est donnée par Brinkman :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (2.12)$$

#### 2.4.6.3. Modèle de Batchelor

Batchelor montre que la viscosité est une fonction non linéaire de  $\varphi$  en présence de

$$\mu_{nf} = \mu_f (6.2 \varphi^2 + 2.5\varphi + 1) \quad (2.13)$$

#### 2.4.6.4. Modèle de Maiga

D'autres relations ont été proposées dans la littérature, limitées à de bonnes applications. Précis. Maiga et ainsi de suite. (2005) propose la corrélation à partir des résultats de mesure [8] :

$$\mu_{nf} = \mu_f (123^2 + 7.3\varphi + 1) \quad (2.14)$$

#### 2.4.6.5. Modèle de Pak et Cho

$$\mu_{nf} = \mu_f (533.9 \varphi^2 + 39.11\varphi + 1) \quad (2.15)$$

### 2.5. Propriétés thermo-physiques de nanofluide

Le tableau 2.1 présente les propriétés thermo physiques des liquides et des nanoparticules les plus utilisées dans la littérature des nano fluides.

**Tableau. 2.1.** Propriétés thermo physiques des nanoparticules et les fluides caloporteurs.

	$\rho$ (kg .m <sup>-3</sup> )	$Cp$ (J .kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$K$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\mu$ (Kg . m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )
<b>Eau</b>	997.1	4179	0.613	0.001002	0.00021
<b>Cuivre</b>	8933	385	401	—	0.0000167

## 2.6. Avantage des nano-fluides

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

## 2.7. Les inconvénients des nano-fluides

- Fortes pertes de charge.
- Erosion.
- Sédimentation.
- Bouchons dans les écoulements.
- Le coût élevé des nano-fluides.
- Difficultés dans le processus de production.

## 2.8. Modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois façons :

- La conduction.
- Le rayonnement.
- La convection.

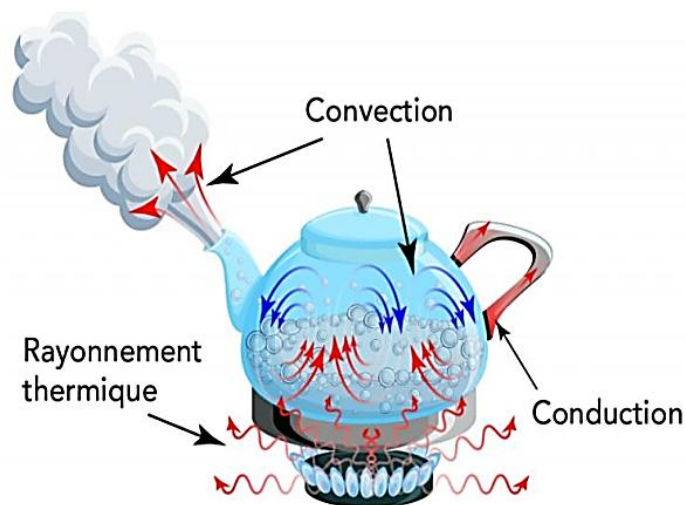
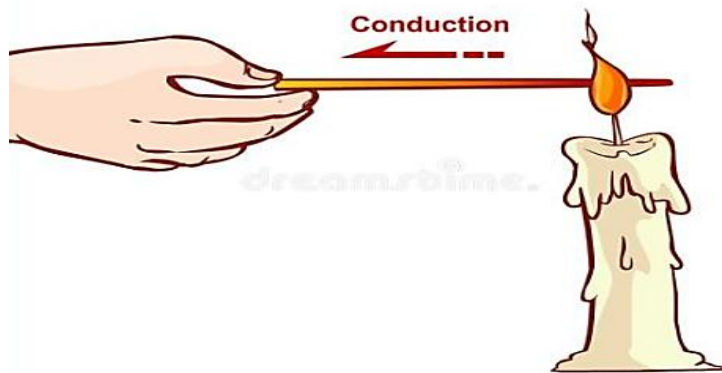


Fig. 2. 1. Schème transfert de chaleur.

### 2.8.1. Transfert de chaleur par conduction

Le processus de transfert de chaleur par conduction dépend d'un milieu physique sans mouvement de matière et est dû à des phénomènes physiques microscopiques (excitation d'atomes ou de molécules, flux d'électrons libres, etc.). Il peut être considéré comme un transfert d'énergie de particules chaudes à haute énergie vibratoire vers des particules froides à faible énergie vibratoire, du fait d'une collision entre particules.



**Fig. 2. 2.** Schéma du phénomène de transfert de chaleur par conduction

Ce transfert de chaleur obéit à la loi de Fourier exprimée par l'équation :

$$dQ = - KS \frac{dT}{dx} dt \quad (2.16)$$

$dQ$ : Quantité de chaleur transmis par conduction [J]

$K$ : Conductivité thermique du milieu [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

$S$ : Aire de la section de passage du flux de chaleur [ $\text{m}^2$ ].

$\frac{dT}{dx}$ : Gradient de température en [ $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$ ].

$dt$ : est le temps caractéristique élémentaire [s].

Le flux de chaleur  $\phi$  en watt qui circule est donné par :

$$\phi = \frac{dQ}{dt} = - KS \frac{dT}{dx} \quad (2.17)$$

Ainsi que la densité de chaleur  $\varphi$  en [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

$$\varphi = \frac{Q}{S} = - K \frac{dT}{dx} \quad (2.18)$$

### 2.8.2. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est le transfert de chaleur d'un corps à un autre sans aucune chaleur le contact entre eux se fait grâce aux fluctuations de l'espace. Ce transfert de chaleur La longueur d'onde impliquée est comprise entre 100  $\mu\text{m}$  et 0,01  $\mu\text{m}$ , allant de l'infrarouge à En couvrant les rayons ultraviolets visibles [9]. C'est donc le seul mode qui peut chauffer la chaleur L'équation de Stefan-Boltzmann peut calculer le flux de vide La chaleur transmise par rayonnement est [10] :

$$\Phi = M.S = \sigma . T^4 . S \quad (2.19)$$

Sachant que :

$\Phi$  : Flux de chaleur transmis par rayonnement [W]

$\sigma = 5,67.10^{-8}$  est la constante de STEFAN-BOLTZMANN [W/ (m<sup>2</sup>.k<sup>4</sup>)].

$M$  : Emittance [W/m<sup>2</sup>].

$T$  : température absolue [k].

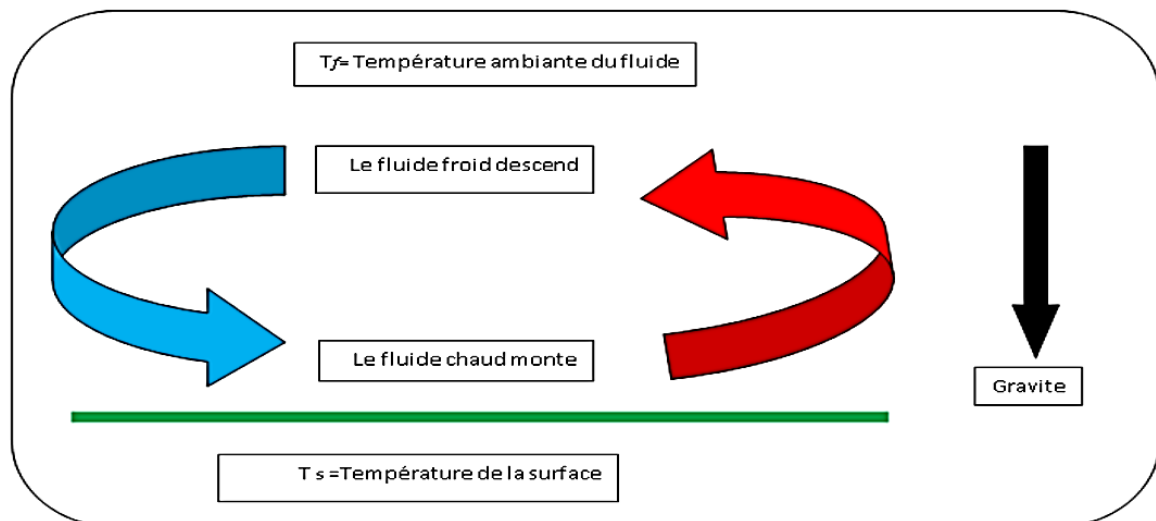
$S$  : surface [m<sup>2</sup>].



**Fig. 2. 3.** Schéma du phénomène de transfert de chaleur par rayonnement

### 2.8.3. Transfert de chaleur par convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le mouvement macroscopique de la matière. Ce phénomène se produit au sein des milieux fluides en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement



**Fig. 2. 4.** Schéma du phénomène de transfert de chaleur par convection

Donné par une relation appelée loi de Newton :

$$\Phi = h . S . \Delta T \quad (2.20)$$

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

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

$T_c$  : La température de la paroi du milieu considéré.

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

#### 2.8.4. Différents types de Convection

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue :

➤ La convection libre ou naturelle :

Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

➤ La convection forcée :

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...etc.). L'étude du Transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

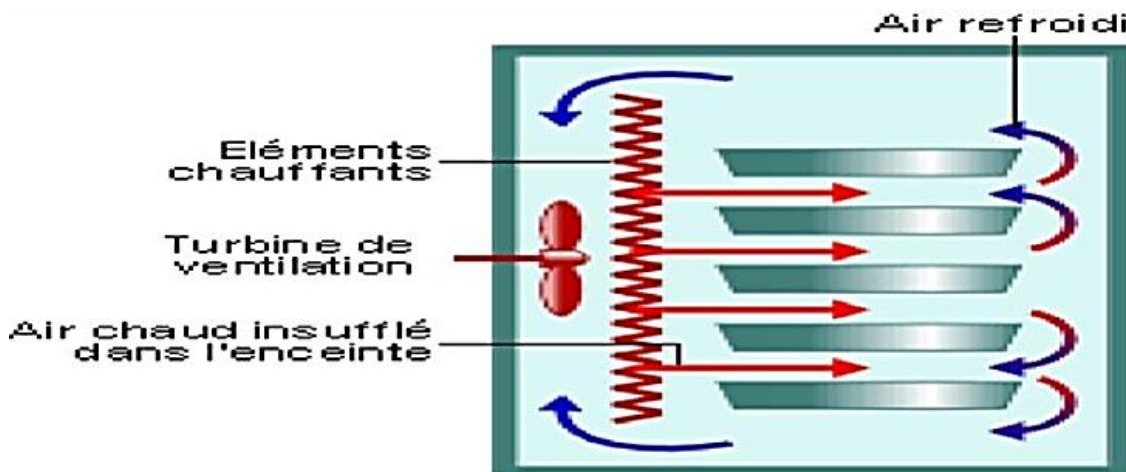


Fig. 2. 5. Four à convection forcée [4]

➤ La convection mixte :

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (Convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convections sont considérées séparément, du même ordre de grandeur.

#### 2.9. Convection naturelle (libre)

En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densité due au non uniformité du champ de température. Les couches chaudes, donc de poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, suivant un mécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions à température élevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant. Le phénomène inverse de courants

descendants se produisent pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud [12].

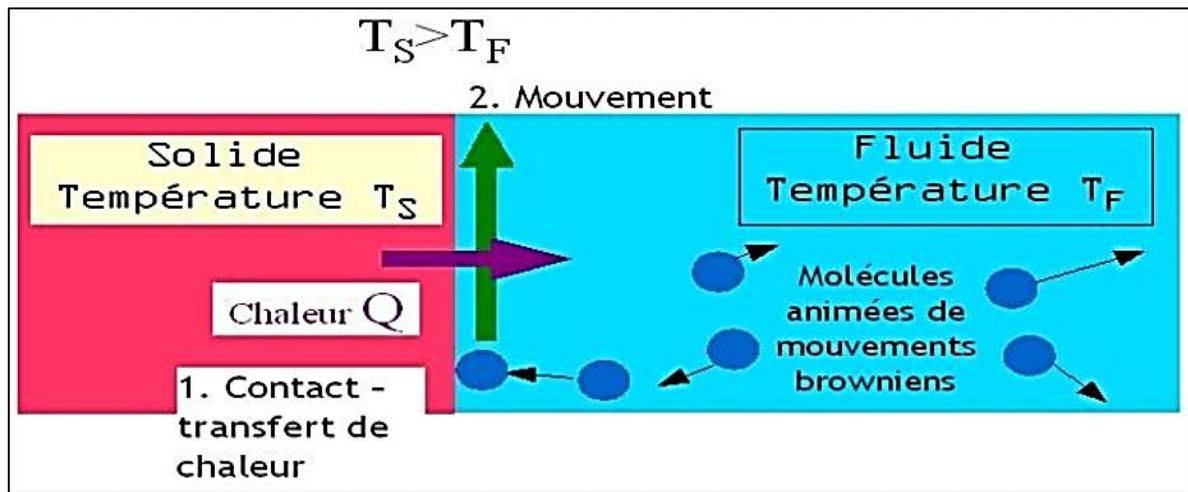


Fig. 2. 6. Schéma de la convection naturelle



Fig. 2. 7. Schème travail de la convection

---

**Reference**

- [1] Talbi Elnadhir, Etude numérique de la convection autour des composants électroniques montés entre deux plaques planes verticales en présence d'un nano-fluide, Mémoire en vue de l'obtention de diplôme de master de l'université de Biskra, 2016.
- [2] Lebbihi Saci, Refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur localisée au fond d'une enceinte remplie de nano-fluide, Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master de l'université de Biskra, 2014.
- [3] Soufi El Habib, Application Des NANOFUIDES Pour Le Refroidissement : Etude D'un Cas D'une Géométrie Simple', Université KASDI Merbah d'Ouargla, 2013.
- [4] Ribiero João-Paulo, Dossier Technique de l'ingénieur, nm5115, Nanofluides pour les applications thermiques, 2009.
- [5] 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.
- [6] Billel Boudjeniba, "Etude Numérique De La Convection Naturelle Dans Une Cavité Rectangulaire Contenant Un Nano fluide", Université 20 Août (1955) De Skikda, (2015).
- [7] Hamdi Moumni, Hedia Welhezi, Ridha Djebali, Ezeddine Sediki, Accurate finite volume investigation of nanofluid mixed convection in two-sided lid driven cavity including discrete heat sources', Univ. Tunis El-Manar, Tunisia, 2015.
- [8] Bouchoucha Abd El Malik, Génération D'entropie Due Au Refroidissement Par Convection Naturelle D'un Nano fluide", Université Des Frères Mentouri – Constantine, (2017).
- [9] J. Crabol, livre, transfert de chaleur tome 1 – les principes.
- [10] 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).
- [11] M. Benmerabet, Modélisation et simulation des phénomènes de transfert thermique par convection assistés par le mouvement fluide», mémoire de master, Université «Badji Mokhtar», Annaba- Algérie (2017).
- [12] Salhi Hicham, Etude numérique de la convection naturelle dans les enceintes : nano fluide, Thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat de l'université de Batna, 2015.

# Chapitre

## 3

### *Modèle mathématique et approche numériques*

Ce chapitre présente et une collaboration avec le groupe de Dr. Bouras Abdelkrim le modèle physique, les hypothèses simplificatrices, les équations mathématique 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.

#### **3.1. Mise en équation du problème**

##### **3.1.1. 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 Ester synthétique (SE), de l'huile minérale (MO) et gaz-liquide (GTL) avec nanoparticules de titanate de baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ) (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 l'huile minérale - titanate de baryum, le nanofluide Ester synthétique (SE) - titanate de baryum et le nanofluide gaz-liquide (GTL)- - titanate de baryum sont considérés 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.

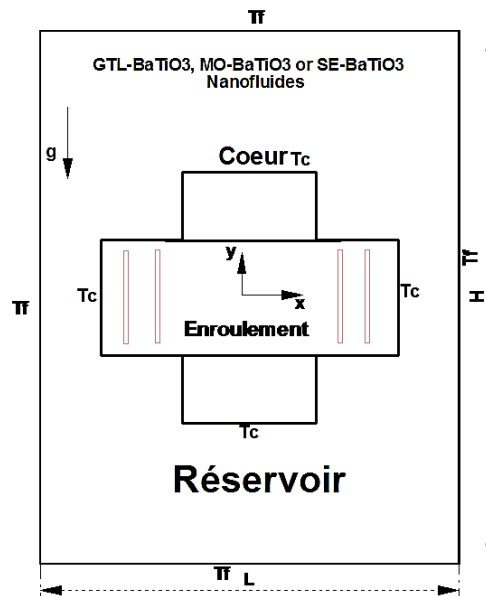


Fig. 3. 1. Modèle physique

### 3.1.2. Modèle mathématique

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

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

#### 3.1.2.1. 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.

### 3.1.2.1.1 Equation de continuité

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

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

### 3.1.2.1.2 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 :

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

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

Où  $p$  est la pression et  $\mu$  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.

$\rho$  : La masse volumique

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

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

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

L'équation (3.2) s'écrit alors :

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

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

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

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

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

Par contre, la décomposition  $\rho$  ne fait que modifier légèrement le terme d'inertie

par rapport à  $\rho_0 \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$  et on peut faire l'approximation :

Si  $\beta \cdot (T - T_0) \ll 1 \Rightarrow \rho \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \cong \rho_0 \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$ , 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 :

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

### 3.1.2.1.3. 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 :

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

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.

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

$\phi$  : La fonction de dissipation.

$q_s$  : La source de chaleur interne.

Si on suppose pour un écoulement à dissipation et l'effet de la pression sont négligeables à conductivité thermique constante, et pas de source de chaleur interne l'équation (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 indicelle

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 :

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

$\tau_{ij}$  : 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 :

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide.

$\delta_{ij}$  : Fonction delta de Kronecker.

### 3.1.4. 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 anisotherme, moyennant les hypothèses énoncées ci-dessus s'écrivent :

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

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

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

### 3.1.5. 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,

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

Équations de quantité de mouvement,,

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

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

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, Ester synthétique et gaz-liquide) et des nanoparticules (titanate de baryum) sont indiquées dans le tableau 3. 1.

**Tableau 3. 1.** Propriétés thermophysiques du fluide de base et des nanoparticules de BaTiO<sub>3</sub>

	$\rho(Kg/m^3)$	$C_p \left(\frac{J}{KgK}\right)$	$K \left(\frac{W}{mK}\right)$	$\beta \left(\frac{1}{K}\right)$	$\mu (Ps.s)$
SE	941	1994	0,141	0,00078	1,32E-02
MO	845	1877	0.130	7.8x10 <sup>-4</sup>	0,004394
GTL	780	2365	0.140	0.00081	0.004368
BaTiO <sub>3</sub>	5750	299,054	3,6747	5.30x10 <sup>-6</sup>	-

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 MO-BaTiO<sub>3</sub>, GTL-BaTiO<sub>3</sub> et SE-BaTiO<sub>3</sub> pour les nanoparticules sphéroïdales est de [7] :

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

### 3.1.6. 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 :

Cylindre interne (transformateur)

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

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

Cylindre extérieur (cuve)

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

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

### 3.1.7. Calcul du nombre de Nusselt

Une autre quantité utile comme le nombre de Nusselt pour chaque cylindre 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.

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

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

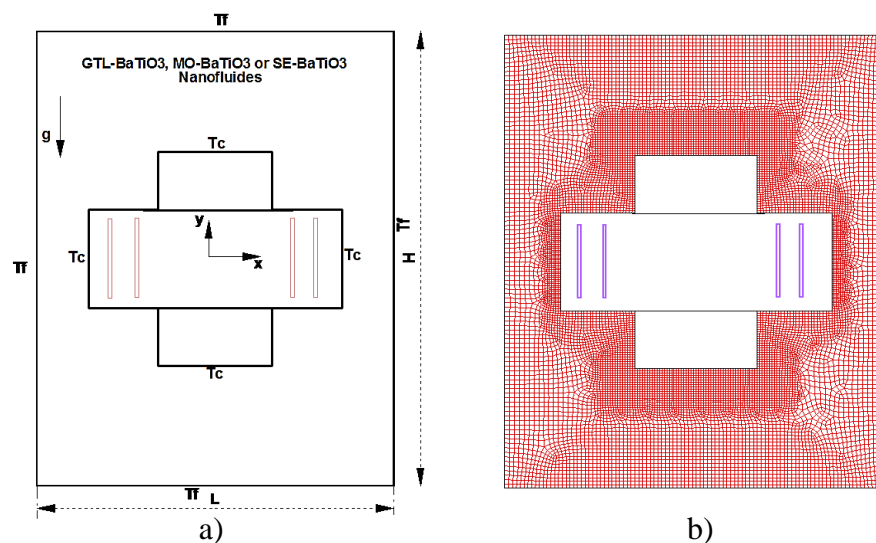
$$\overline{Nu}_{avg} = \frac{Nu_h + Nu_c}{2} \quad (3.33)$$

### 3.2. Approche numérique

#### 3.2. 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 3. 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. 3. 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 (Computational Fluid Dynamics 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 « segregated » 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.

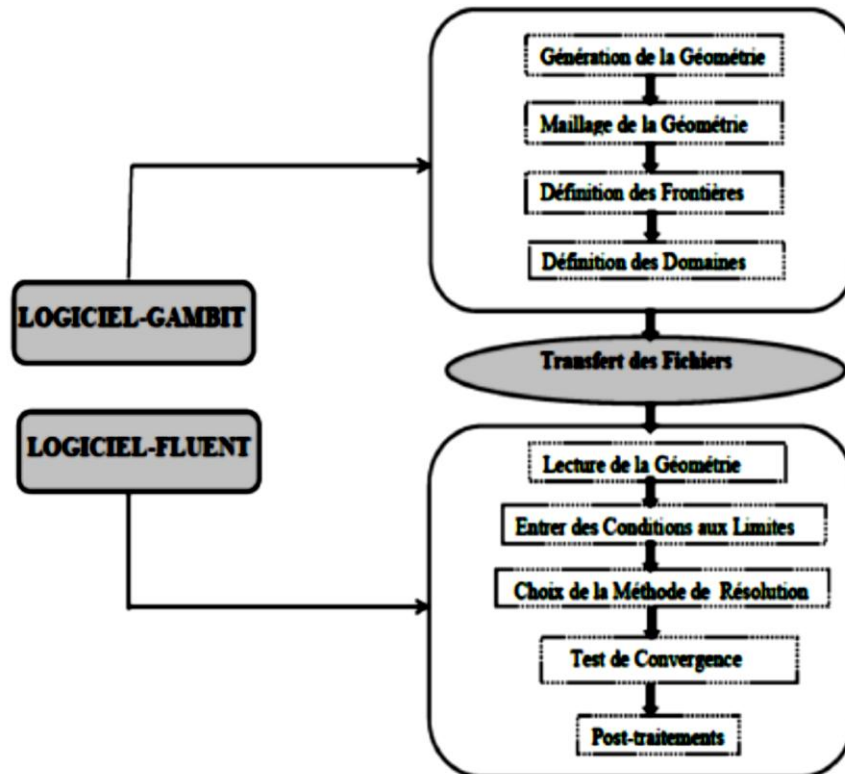
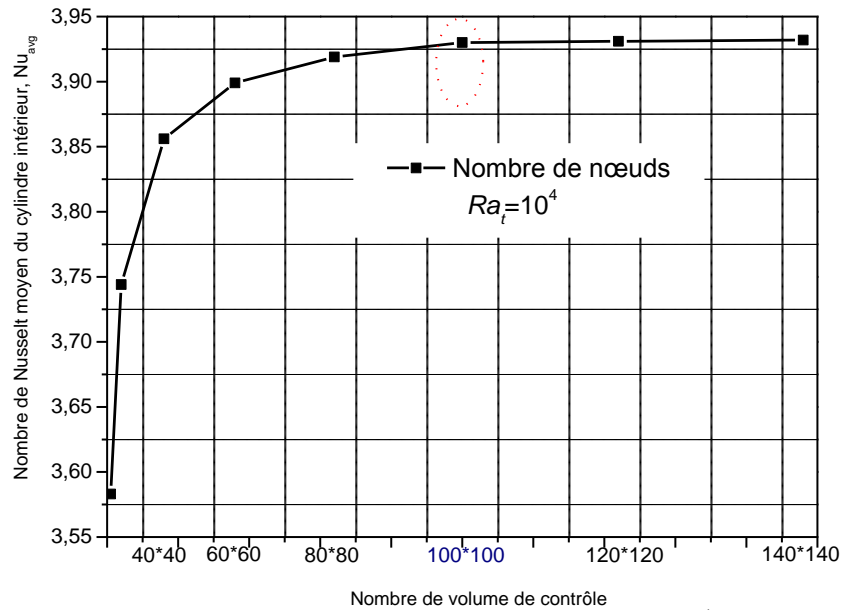


Fig. 3. 3. Etapes de résolution suivies par GAMBIT et FLUENT.

### 3.2. 2. Etude de maillage

L'influence du nombre de nœuds et de la taille à la solution désignée sur le transfert thermique dans la région chauffée du cylindre intérieur est définie par le nombre de Nusselt moyen dans la figure 3. 4. Les phénomènes physiques ont été abordés, en particulier dans la région de la couche limite indiquée par la présence de gradients significatifs dans les zones pariétales. Un transformateur isotherme intérieur fournit une lecture de raffinement de grille à un réservoir à  $Ra_t = 10^4$  afin d'obtenir le meilleur maillage possible (figure 3. 4). Dans cette étude, six combinaisons de volumes d'essai (40 x 40, 60 x 60, 80 x 80, 100 x 100, 120 x 120 et 140 x 140) ont été utilisées pour étudier l'impact de la taille de la grille sur la précision des impacts indiqués. La figure 3. 4 illustre la convergence du nombre de Nusselt moyen vers le niveau du cylindre interne réchauffé par l'affinage de la grille. Il convient d'observer que si les volumes de contrôle (100 x 100) sont joints lors de la libération du maillage, le nombre de Nusselt moyen n'est pas affecté de manière significative par l'affinage de la grille fine. La concordance a été jugée très bonne, ce qui se compare indirectement au présent calcul puisque le défaut relatif dans cette grille est inférieur à 0,1 %.



**Fig. 3.4.** Convergence avec raffinement du maillage à  $Ra_t = 10^4$  le long du cylindre thermique interne à partir du nombre de Nusselt moyen

### 3.2. 3. Conditions initiales et conditions aux limites : (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 :

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

### 3.2. 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 conservés.
- 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<sup>er</sup> ordre, second ordre, loi de puissance, schéma type Quick. Nous développerons dans cette partie les schémas utilisés lors de notre étude.

#### 3.2. 4.1 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 2<sup>nd</sup> 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.

#### 3.2. 4.2 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.

### 3.2. 4.3 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. 5).

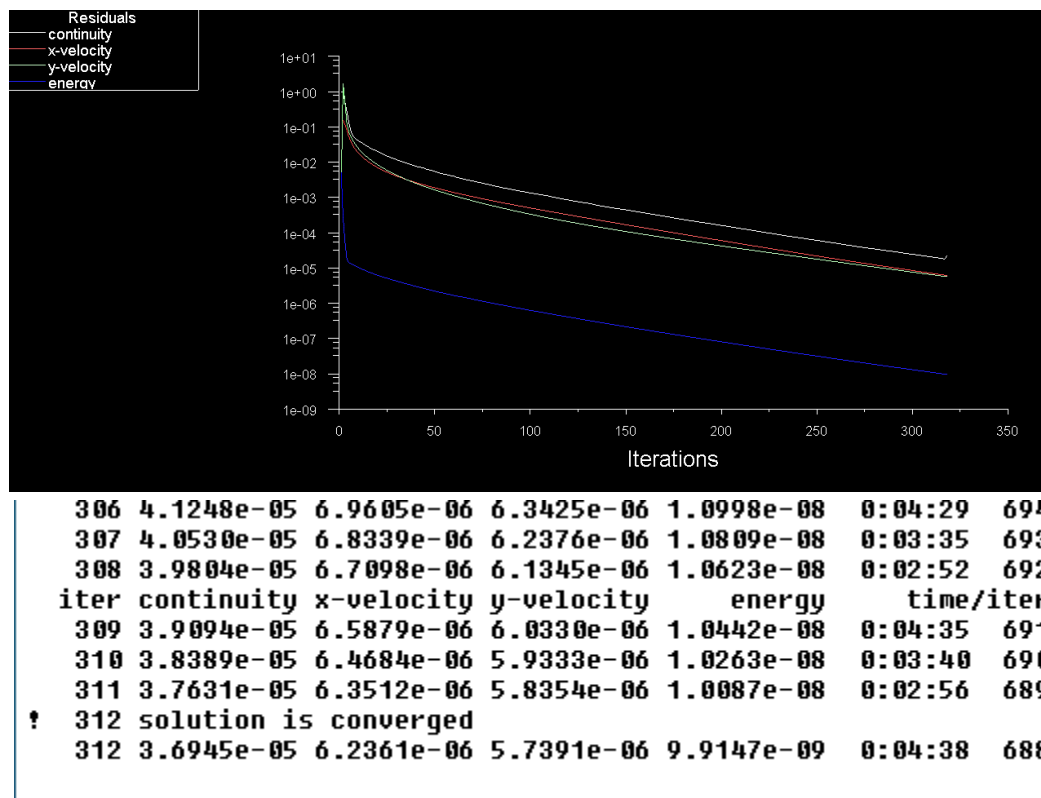


Fig. 3. 5. Evolution des résidus pour un transformateur rempli de nanofluide (MO-BaTiO<sub>3</sub>)  $\varphi = 0.01, Ra_t = 10^5$

### 3.2. 4.4 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 3. 2.

**Tableau 3. 2.** Critères de résolution et coefficients de sous-relaxation utilisés

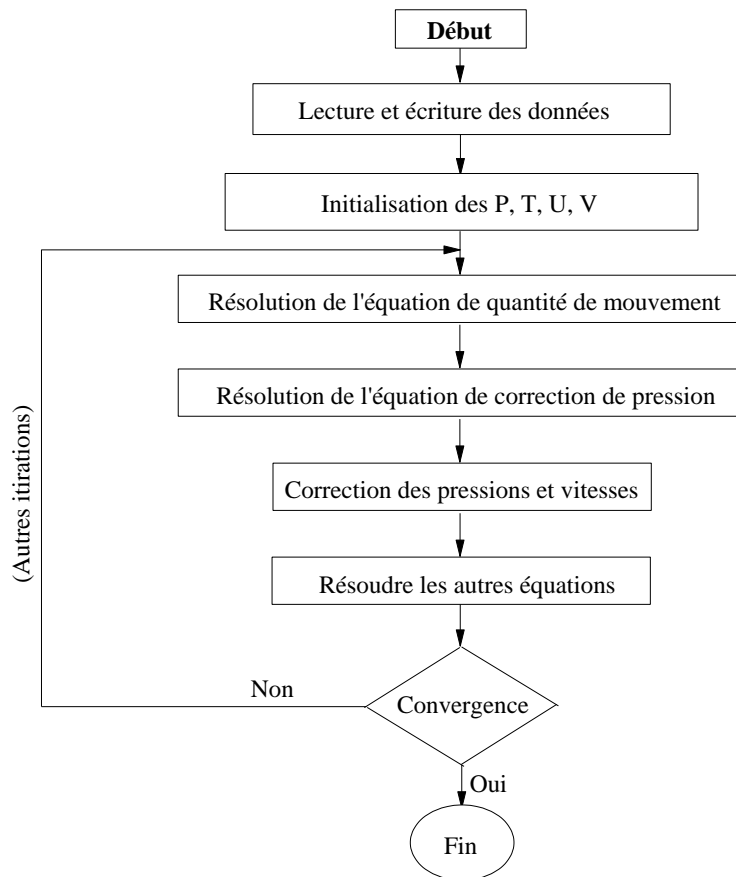
	Facteur de Relaxation	Type de Discrétisation
Pression	0.3	Body force weighted
Masse volumique	1	-
Force de gravité	1	-
Quantité de mouvement	0.7	2 <sup>nd</sup> order upwind
Energie	1	2 <sup>nd</sup> order upwind
Couplage Pression-Vitesse	-	SIMPLE

### 3.2. 4.5 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 [13-24] :

- 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. 3. 6.** Système d'itération

### 3.3 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. Hossein Nezhad, 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  $Al_2O_3$  ewater nanofluidflow in an annulus, *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 37, pp. 585-595. 2011.

- [5] M. Nuim Labib, 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. Bouras Abdelkrim, 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. Bouras Abdelkrim, 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. Bouras Abdelkrim, 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.
- [24] Djedid Taloub, Abdekrim Bouras, Ali J. Chamkha, Mahfoud Djezzar, Numerical simulation of the natural double-diffusive convection in an elliptical cylinder -Impact of the buoyancy force-, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 144, 106790, 2023.

# Chapitre

## 4

### *Résultats et discussion*

Cette étude présente les résultats numériques de la convection naturelle d'un transformateur immergé dans un réservoir fermé avec des nanofluides incompressible de viscosité cinématique  $\nu_{nf}$  et de diffusivité thermique  $\alpha_{nf}$ . Les températures dans les deux cylindres sont fixes. Le système d'équations régissant le phénomène est résolu numériquement à l'aide d'une technique de volumes finis basée sur l'algorithme SIMPLE. Les champs d'écoulement dynamique et thermique sont représentés. Parmi les paramètres qui régissent le système étudié, le nombre de Rayleigh thermique ( $Ra_t$ ) caractérise la variance de la température.

Dans ce travail, les résultats obtenus sont présentés pour titanate de baryum ( $BaTiO_3$ ), Ester synthétique (SE), de l'huile minérale (MO) et gaz-liquide (GTL) comme fluides de base, le mélange  $BaTiO_3$ -SE,  $BaTiO_3$ -MO et  $BaTiO_3$ -GTL avec la fraction volumique en nanoparticules ( $\phi$ ) variant de 0% à 10% et le nombre de Rayleigh ( $Ra$ ) variant de  $10^3$  à  $10^6$

#### **4.1 Effet du nombre de Rayleigh thermique**

La figure 4. 1 montre les lignes de courant et les isothermes du nanofluide  $BaTiO_3$ -SE,  $BaTiO_3$ -MO et  $BaTiO_3$ -GTL de fraction volumétrique  $\phi = 10\%$  et d'une source de chaleur pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh.

La modification des cellules des lignes de courant, et en particulier le vortex de la cellule interne, ainsi que la déformation des isothermes, indiquent que le nombre de Rayleigh a un effet néfaste sur ce type d'écoulement. L'augmentation de la conductivité thermique du nanofluide est le résultat direct de l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.

Le transfert d'énergie de la source de chaleur vers le fluide et la dominance de la flottabilité dans le fluide augmentent avec la croissance du nombre  $Ra_t$  et de la fraction de volume solide. Comme le montre cette figure, le regroupement des isothermes près de la source de chaleur diminue avec une augmentation de la fraction de volume solide en raison de l'augmentation de la diffusion thermique. La concentration des isothermes augmente près de la source de chaleur.

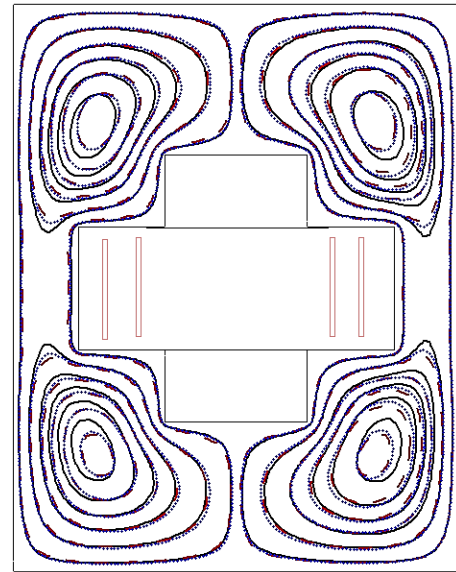
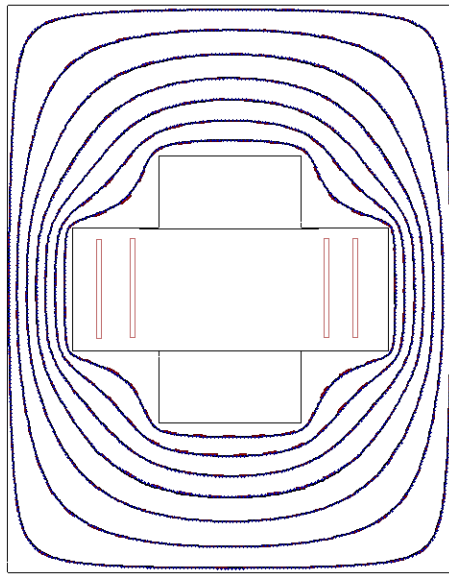
La figure montre que les nanofluides chauds adjacent à la surface du cylindre interne isotherme chaude se déplacent vers le haut et frappe ensuite la surface froide isotherme de l'enceinte carrée. Après avoir frappé la surface froide de l'enceinte, il change de direction en produisant des tourbillons symétriques en rotation. En ce qui concerne les isothermes, lorsque les nombres de Rayleigh sont faibles entre  $10^3$  et  $10^4$ , les isothermes sont approximativement parallèles et la chaleur est transférée en raison de la conduction. A  $Ra_t$  ( $= 10^5$  et  $10^6$ ), les contours de température et les lignes de courant deviennent plus confus et l'intensité des vortex augmente quand le nombre de Rayleigh augmente. Dans ce cas, l'écoulement frappe fortement le haut de l'enceinte carrée, ce qui conduit à produire une couche thermique mince. La forme des tourbillons en rotation augmente, les isothermes se déplacent vers le haut et la chaleur est transférée par convection. À un nombre de Rayleigh plus élevé l'intensité de la convection augmente considérablement, le cœur des tourbillons en rotation monte et les contours isothermes changent, indiquant clairement que la convection naturelle est le mécanisme de transfert de chaleur dominant.

Dans la figure 4.1, les contours des nanoparticules de  $BaTiO_3$  avec Ester synthétique (SE) comme fluide de base est située au-dessus de celle de l'huile minérale (MO) et gaz-liquide (GTL) comme fluide de base. Le transfert de chaleur des nanofluides, en particulier la conductivité thermique, peut être influencée par les propriétés des fluides de base.

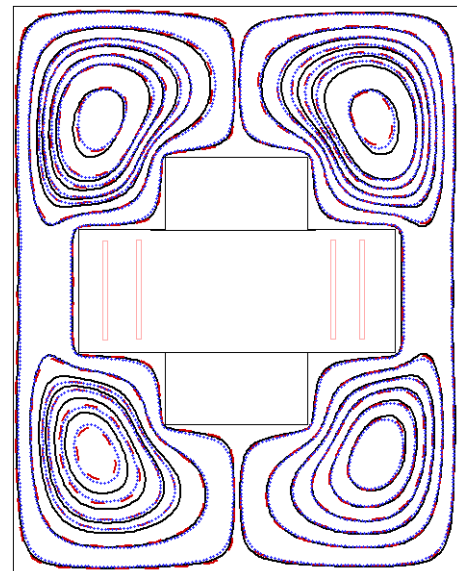
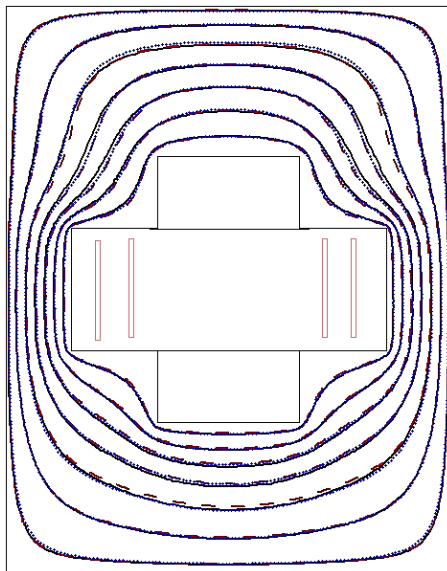
Dans cette partie, nous avons étudié l'effet des nanofluides  $BaTiO_3$  avec Ester synthétique (SE), l'huile minérale (MO) et gaz-liquide (GTL) comme fluides de base, respectivement.

On a constaté que le nombre de Nusselt local des nanofluides de  $BaTiO_3$  avec SE comme fluides de base est supérieur à celui de MO ou GTL comme fluide de base.

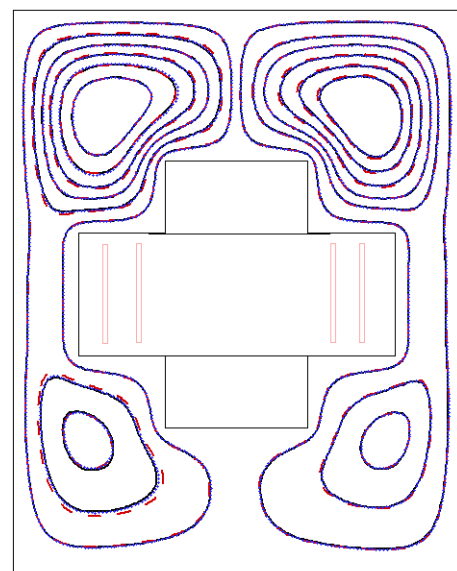
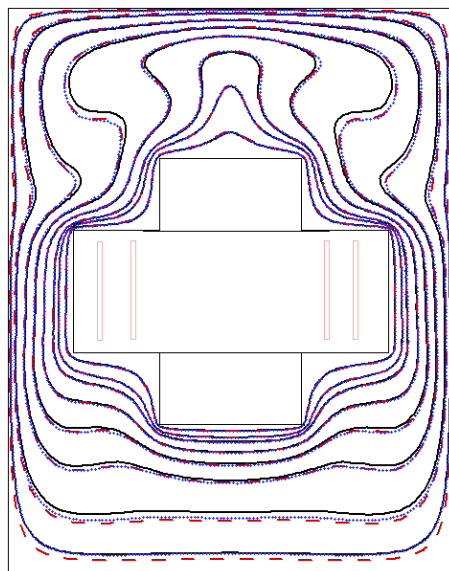
L'analyse comparative entre les trois nanofluides montre que les valeurs les plus élevées des lignes de courant sont toujours plus élevées pour le fluide de base Ester synthétique que pour l'huile minérale et gaz-liquide comment fluides de base, ce qui signifie que la conductivité et, par conséquent, le coefficient de transmission de chaleur, augmentent avec la fraction de volume.



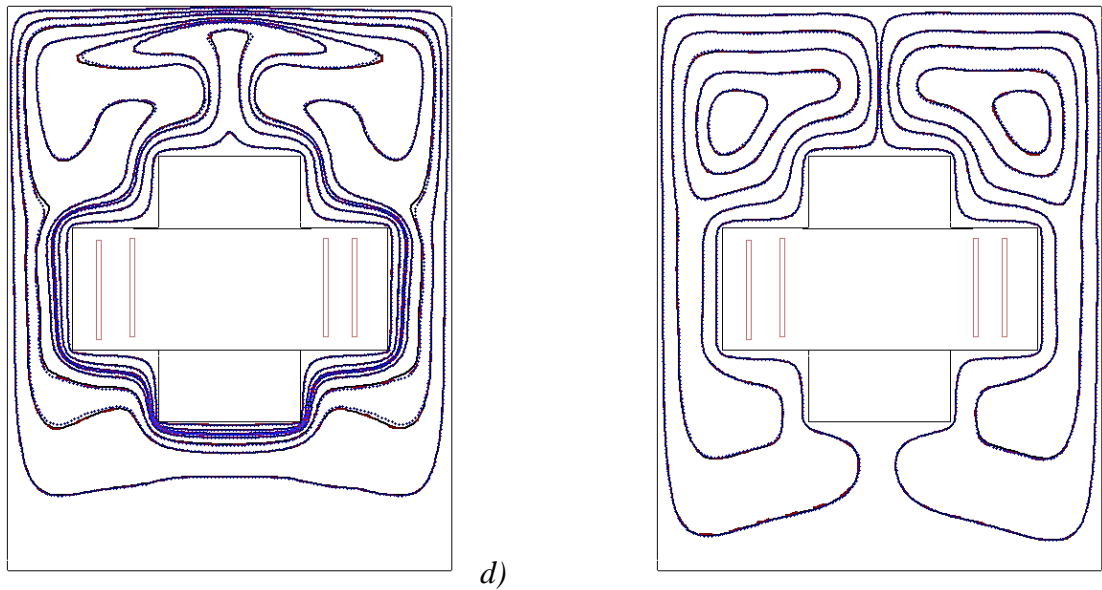
a)



b)



c)



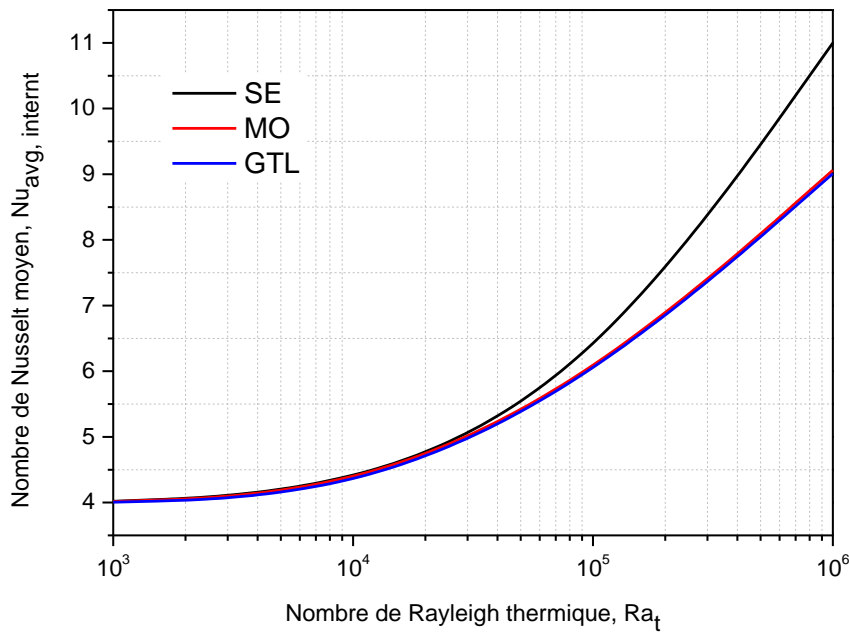
**Fig. 4.1** Isothermes (à gauche) et Isocourants (à droite) du nanofluides  $\text{BaTiO}_3\text{-SE}$  (....),  $\text{BaTiO}_3\text{-MO}$  (-.-.-) et  $\text{BaTiO}_3\text{-GTL}$  (—), a)  $Ra_t = 10^3$ , b)  $Ra_t = 10^4$ , c)  $Ra_t = 10^5$ , d)  $Ra_t = 10^6$  avec  $\varphi = 10\%$

#### 4.2 Corrélation entre le nombre de Nusselt moyen et le nombre de Rayleigh thermique

La figure 4.2 montre la variation du nombre de Nusselt moyen de la paroi cgaude ( $Nu_{avg}$ ) en fonction de la nanoparticule ( $\text{BaTiO}_3$ ) pour un nombre de Rayleigh  $Ra_t = 10^6$  et diverses fluides de bases, et présente l'influence du nombre de Rayleigh thermique sur les nombres moyens de Nusselt. Ces résultats démontrent que lorsque  $Ra_t > 10^3$ , le nombre moyen de Nusselt augmente en raison d'une augmentation du nombre de Rayleigh thermique, mais lorsque  $Ra_t = 10^3$ , les valeurs de Nusselt moyen sont essentiellement identiques et ont les mêmes valeurs. Cette augmentation est plus importante lorsque la fraction volumique augmente. Ces résultats indiquent que lorsque le nombre de Rayleigh augmente le nombre de Nusselt moyen devient plus important pour Ester synthétique (SE) comme fluide de base employé que l'huile minéral (MO) et le gaz-liquide (GTL), c'est à dire que sa conductivité thermique équivalente augmente également.

De plus, le nombre de Nusselt moyen dépend du changement de fluide de base.

D'un point de vue physique, le fluide de base, la fraction volumique des nanoparticules et la nature de l'écoulement ont tendance à agir sur le transfert de chaleur.



**Fig. 4. 2** Distribution de nombre de Nusselt moyen en fonction de nombre de Rayleigh thermique autour d'un transformateur (paroi interne) pour différents fluides de bases à  $\phi = 10\%$ .

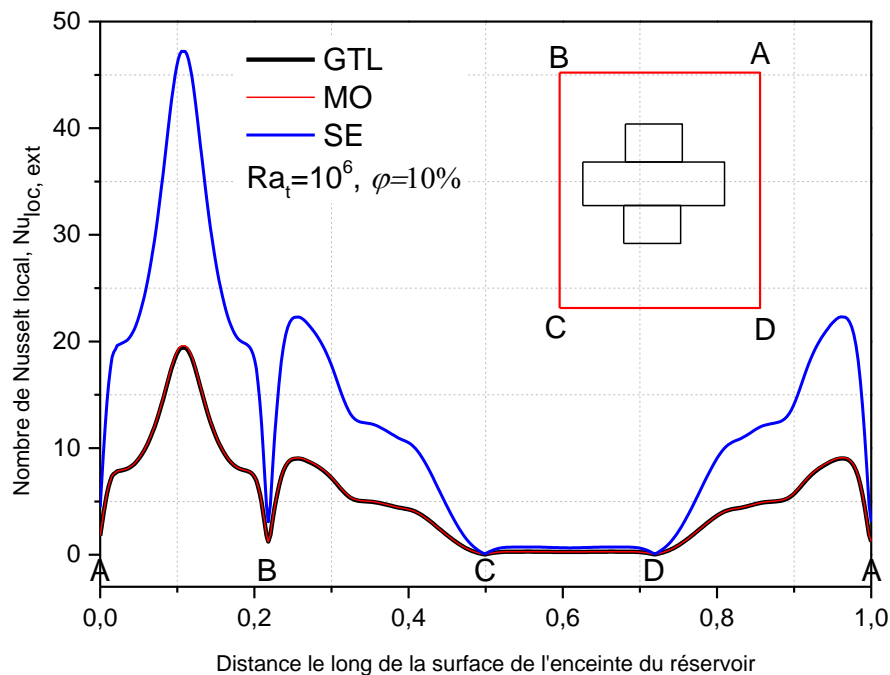
### 4.3 Effet du fluide de base

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet des nanofluides  $BaTiO_3$  avec l'Ester synthétique (SE), l'huile minérale (MO) et gaz-liquide (GTL) comme fluides de base, respectivement. Pour les nanofluides  $BaTiO_3$ -SE, les nanofluides  $BaTiO_3$ -MO et les nanofluides  $BaTiO_3$ -GTL, l'effet du fluide de base sur le nombre de Nusselt local interne et externe d'une source de chaleur est clairement présenté dans la figure 4. 3 et la figure 4. 4. La valeur du nombre de Nusselt local augmente avec l'accroissement de la fraction volumique des nanoparticules pour tous les fluides de base.

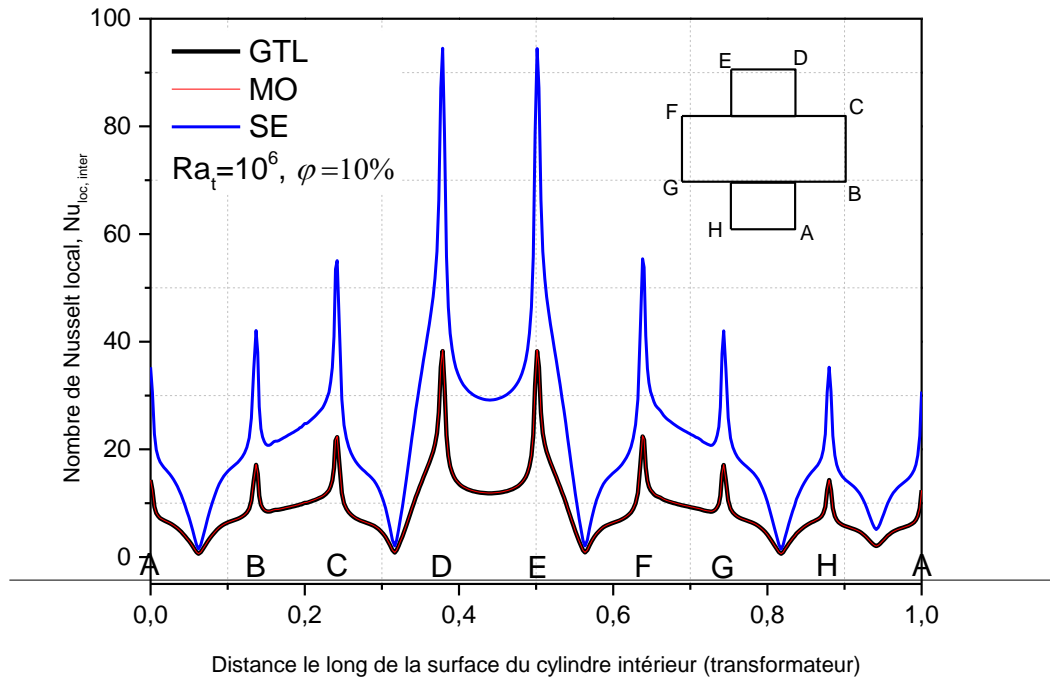
Dans les deux figures, la courbe des nanoparticules de  $BaTiO_3$  avec de l'Ester synthétique (SE) comme fluide de base est située au-dessus de celle de l'huile minérale (MO) ou de gaz-liquide (GTL) comme fluide de base. Le transfert de chaleur des nanofluides  $BaTiO_3$ , en particulier la conductivité thermique, peut être affectée par les caractéristiques des fluides de base. Nous avons constaté que le nombre de Nusselt local des nanofluides  $BaTiO_3$  avec MO ou GTL comme fluides de base est inférieur à celui de l'ES comme fluide de base. Le nombre de Nusselt moyen est plus élevé sur la source de chaleur en raison de l'existence d'un gradient de température plus élevé.

Les profils de distribution des taux de transfert de chaleur locaux avec les périmètres des cylindres extérieur et intérieur pour différents fluides de bases pour une fraction volumique

10% et le nombre de Rayleigh thermique  $10^6$  sont représentés sur les figures (4.3) et (4.4). Une température uniforme est réalisée dans les flancs internes du transformateur, qui sont enfermés dans une cuve. Lorsque les taux de transfert de chaleur locaux évoluent et se combinent, les valeurs du nanofluide SE est supérieures à celles de MO et GTL. Ce-ci est provoquée par la conductivité plus élevée du nanofluide SE que celle de MO et GTL, ce qui améliore le transfert et la dispersion de la chaleur du cylindre interne. A  $Ra_t = 10^6$ , comme indiqué sur la figure 4.3, les valeurs de convection thermique et de fraction volumique de nanoparticules ont des effets significatifs sur les valeurs du taux de transfert de chaleur local, en l'augmentant. Sur la figure (4.3). On voit, par exemple, sur cette image que le taux de transfert de chaleur local externe est maximal dans la zone supérieure et minimal dans la partie inférieure du réservoir, où le fluide est presque immobile. Sur la paroi interne de la figure 4.4, les variations sont inversées : De telles oppositions se retrouvent quelle que soit la géométrie étudiée et s'expliquent si l'on connaît les distributions des lignes isothermes et de courant.

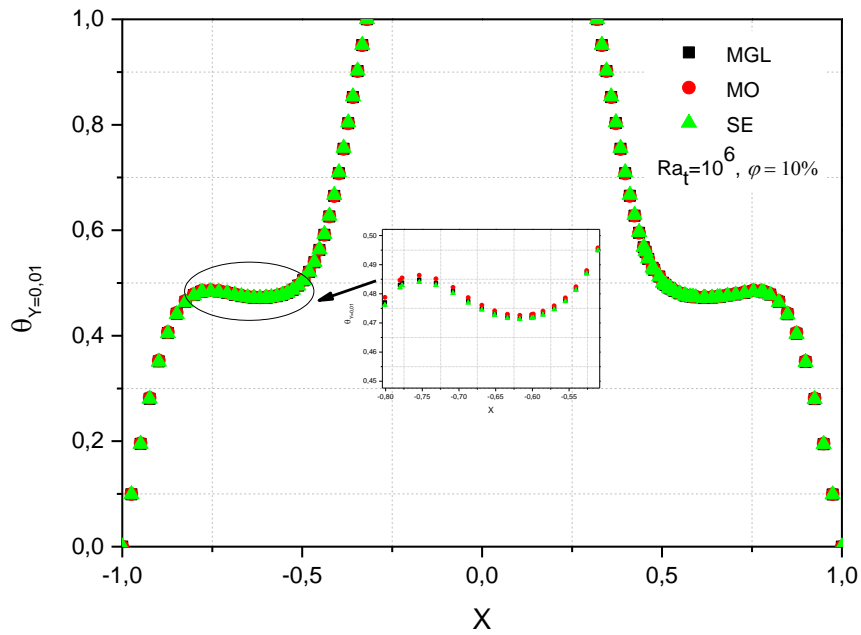


**Fig. 4. 3** Distribution du nombre de Nusselt local le long de la surface de la paroi externe pour différents fluides de bases à  $Ra_t = 10^6$  et  $\phi = 10\%$

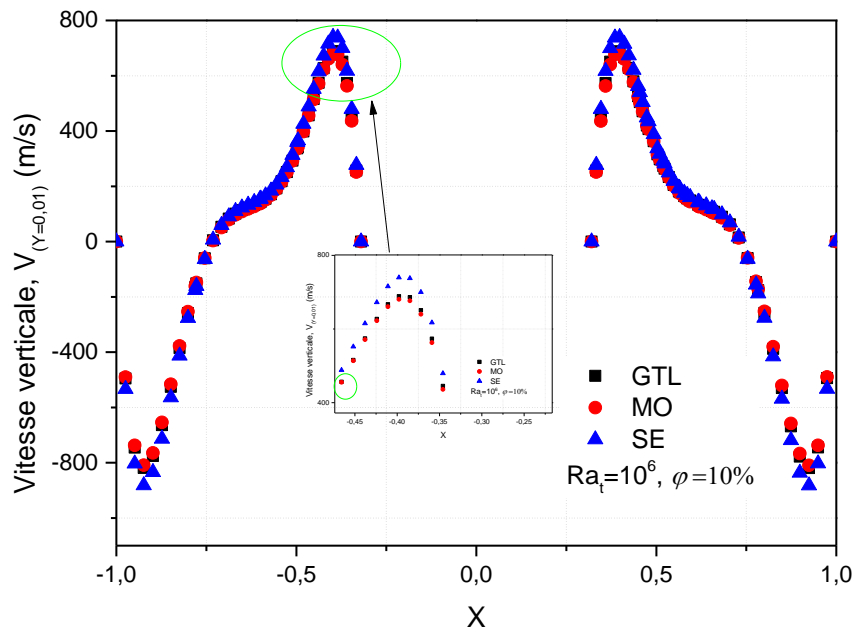


**Fig. 4. 4** Distribution du nombre de Nusselt local le long de la surface de la paroi interne pour différents fluides de bases à  $Ra_t = 10^6$  et  $\varphi=10\%$

Les figures 4. 5 et 4. 6 montrent les évolutions de la température adimensionnelle ( $\theta$ ) et de la composante perpendiculaire à la vitesse d'écoulement ( $V$ ) le long de la direction horizontale s'étendant sur le flanc supérieur du transformateur chaud ( $Y = 0,01$ ). Ces figures permettent de confirmer les résultats obtenus précédemment et de comprendre le comportement d'écoulement à l'intérieur de la cuve pour les trois fluides de bases avec la nanoparticule  $BaTiO_3$  à nombre de Rayleigh thermique de l'ordre  $10^6$ . Les deux côtés des évolutions de température long de l'axe  $Y = 0,01$  augmentent vers le côté chaud du transformateur. À  $Ra_t = 10^6$ , le nanofluid SE- $BaTiO_3$  a une vitesse plus élevée et une température plus basse que les nanofluides MO- $BaTiO_3$  et GTL- $BaTiO_3$  en raison de flux flottants plus forts et de nombres de Rayleigh thermiques plus élevés. Le mouvement des flux flottants plus forts dans le réservoir avec le nombre de Rayleigh thermique le plus élevé est ce qui fait augmenter l'amplitude de  $V$  à mesure que le nombre de Rayleigh thermique augmente. Cela explique pourquoi le transfert de chaleur est en mode convection à un nombre de Rayleigh thermique élevé, tandis que la conduction est responsable du transfert de chaleur à un nombre de Rayleigh thermique inférieur.



**Fig. 4. 5** Evolution de la température sans dimension en  $Y = 0.01$  pour les trois fluides de bases à  $Ra_t=10^6$  et  $\phi=10\%$



**Fig. 4. 6** Vitesse perpendiculaire dans  $Y = 0,01$  pour les trois fluides de bases à  $Ra_t=10^6$  et  $\phi=10\%$

## 4.4 Conclusion

Cette étude tente d'étudier numériquement le transfert thermique par convection naturelle des nanofluides enfermés dans un transformateur à haute tension chauffé par une source de chaleur discrète avec différents fluides de base.

Dans ce mémoire, la convection naturelle est étudiée numériquement afin d'améliorer le refroidissement d'une transformatrice haute tension (source de chaleur) enfermé dans un réservoir contenant de SE, MO et GTL et des nanoparticules de titanate de baryum  $\text{BaTiO}_3$ . Pour une fraction volumique 10% de nanoparticules et un nombre de Rayleigh de l'ordre  $10^6$ . Dans ce travail, il a été montré comment les températures élevées et les fractions volumiques affectent les champs d'écoulement et le nombre de Nusselt loca et moyen.

Les résultats montrent que l'augmentation du pourcentage volumique de nanoparticules dans le nanofluide améliore et accélère le transfert de chaleur. Le nombre de Rayleigh thermique augmente avec l'ampleur de l'impact du pourcentage de volume. L'ampleur de la convection peut être estimée à l'aide de la vitesse ( $V$ ). Plus le nombre de Rayleigh thermique est élevé, plus la vitesse complémentaire est importante, ce qui entraîne la présence de flux flottants plus importants. L'ajout de nanoparticules au fluide pur augmente la conductivité thermique du nanofluide, ce qui améliore la diffusion de la chaleur et augmente le taux d'échange de chaleur vers l'extérieur du transformateur. Il est souhaitable d'envisager des recherches sur le transfert de chaleur dans les nanofluides, où les effets énumérés ci-dessous peuvent être testés:

- Les impacts du volume et de la forme des nanoparticules, ainsi que de la stationnarité et du débit.
- Le nombre de Nusselt moyen dépend du changement de fluide de base.
- L'impact du transfert de chaleur des nanofluides de  $\text{BaTiO}_3$  est lié aux types de fluides de base.

Dans cette étude, les nanoparticules dispersées dans l'Ester synthétique (SE) ont confirmé l'amélioration du comportement des propriétés du nanofluide par rapport à l'huile minérale (MO) ou de gaz-liquide (GTL) de base.

Dans le prolongement de ce travail, il serait intéressant d'étudier le chauffage avec une variation périodique dans le temps pour mieux représenter le cas du refroidissement des transformateurs et des composants électroniques. Un autre aspect concernerait l'utilisation d'un autre type de nanofluide qui a pris de l'ampleur ces dernières années : les nanofluides hybrides.

---

## Conclusion générale

---

Dans ce mémoire, la convection naturelle est étudiée numériquement dans un transformateur (noyau d'enroulement), situé à l'intérieur d'un réservoir fermé chargé de fluide de base Ester synthétique (SE), de l'huile minérale (MO) et gaz-liquide (GTL) avec nanoparticules de titanate de baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ). 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 l'huile minérale - titanate de baryum, le nanofluide Ester synthétique (SE) - titanate de baryum et le nanofluide gaz-liquide (GTL)- - titanate de baryum sont considérés 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.

Le but de cette étude est d'améliorer le refroidissement d'un transformateur à haute tension (source de chaleur) enfermé dans un réservoir contenant des fluides de base l'ester, l'huile minérale et le gaz-liquide avec la nanoparticule de titanate de baryum  $\text{BaTiO}_3$ . Pour un pourcentage de volume de nanoparticules de 10% et différents nombres de Rayleigh.

Dans ce travail, il a été montré comment les températures élevées et le pourcentage volumique de nanoparticules affectent les champs de flux et le nombre de Nusselt local.

Les résultats montrent que l'augmentation du pourcentage de solides en volume de nanoparticules dans les trois nanofluides améliore le transfert de chaleur et accélère le transfert de chaleur. Le nombre de Rayleigh thermique augmente l'importance du pourcentage d'impact en volume. La quantité de convection peut être estimée en utilisant la vitesse ( $V$ ). Plus le nombre de Rayleigh thermique est élevé ; plus la vitesse complémentaire est élevée, ce qui conduit à la présence de flux flottants plus importants. L'ajout des nanoparticules au fluide pur augmente la conductivité thermique du nanofluides, ce qui améliore la diffusion de la chaleur ; cela augmente le taux d'échange de chaleur vers l'extérieur du transformateur. Il est souhaitable d'envisager des études de transfert de chaleur dans les nanofluides, où les effets énumérés ci-dessous peuvent être testés :

Les impacts du volume et de la forme des nanoparticules, ainsi que de la stationnarité et du débit.

Au cours de cette étude, les nanoparticules dispersées dans le fluide de base l'Ester synthétique (SE) ont confirmé le comportement amélioré des propriétés des nanofluides par rapport à l'huile minérale (MO) de base et le gaz-liquide (GTL) de base.

Dans la continuité de ce travail, il serait intéressant d'étudier le chauffage avec une variation périodique dans le temps pour mieux représenter le cas du refroidissement des transformateurs et des composants électroniques. Un autre aspect concernerait l'utilisation d'un autre type de nanofluide qui a pris de l'ampleur dans dernières années ; nanofluides hybrides.

## Résumé

Dans cette mémoire, les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques des nanofluides de Titanate de baryum remplissant dans un transformateur (noyau d'enroulement), situé à l'intérieur d'un réservoir fermé sont étudiées numériquement. Ester synthétique (SE), de l'huile minérale (MO) et gaz-liquide (GTL) sont utilisés comme fluides de base. Le modèle mathématique pour le transfert de chaleur par convection dans les nanofluides est suivi pour tenir compte des effets de la distribution de la fraction volumique des nanoparticules sur les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie, dans lesquelles le code fluent est utilisé. Cette dernière est basée sur la méthode des volumes finis couplée à l'algorithme SIMPLER. Les résultats numériques pour le transfert de chaleur sont présentés sous la forme des lignes de courant et des profils isothermes pour une valeur différente du nombre de Rayleigh, du fluide de base et de 10% fraction volumique des nanoparticules. Les effets de ces paramètres sur le nombre de Nusselt local et moyen sont analysés. Au cours de cette étude, les nanoparticules dispersées dans le fluide de base l'Ester synthétique (SE) ont confirmé le comportement amélioré des propriétés des nanofluides par rapport à l'huile minérale (MO) de base et le gaz-liquide (GTL) de base.

**Mots clés :** Fraction volumique, Enceinte de réservoir, Convection naturelle, Nanofluide, Nombres de Rayleigh thermiques.

## Abstract

In this memory, the hydrodynamic and thermal characteristics of barium titanate nanofluids filling in a transformer (winding core), located inside a closed tank are studied numerically. Synthetic ester (SE), mineral oil (MO) and gas-liquid (GTL) are used as base fluids. The mathematical model for convective heat transfer in nanofluids is followed to account for the effects of nanoparticle volume fraction distribution on the continuity, momentum and energy equations, in which the fluent code is used. The latter is based on the finite volume method coupled with the SIMPLER algorithm. Numerical results for heat transfer are presented in the form of streamlines and isothermal profiles for a different value of Rayleigh number, base fluid and 10% volume fraction of nanoparticles. The effects of these parameters on the local and average Nusselt number are analyzed. In this study, the nanoparticles dispersed in the base fluid synthetic Ester (SE) confirmed the improved behavior of the nanofluid properties compared to the base mineral oil (MO) and base gas-liquid (GTL).

**Key words:** Volume fraction, Tank enclosure, Natural convection, Nanofluid, Thermal Rayleigh numbers.

## ملخص

في هذه المذكرة، تمت دراسة الخصائص الهيدروديناميكية والحرارية لسوائل تيتانات الباريوم النانوية التي تملأ في محول (قلب متعرج)، الموجود داخل خزان مغلق، عددياً. يتم استخدام الإستر الصناعي (SE) والزيوت المعدنية (MO) والغاز السائل (GTL) كسوائل أساسية. يتم اتباع النموذج الرياضي لنقل الحرارة بالحمل الحراري في السوائل النانوية لتفسير تأثيرات توزيع الكسور الحجمية للجسيمات النانوية على معادلات الاستمرارية والزخم والطاقة، حيث يتم استخدام الكود بطلاقة. يعتمد الأخير على طريقة الحجم المحدود المقترنة بخوارزمية SIMPLER. يتم تقديم النتائج العددية لنقل الحرارة في شكل خطوط انسيابية وملامح متساوية الحرارة لقيمة مختلفة من عدد رايلي والسائل الأساسي وكسر حجم 10% من الجسيمات النانوية. تم تحليل تأثير هذه المتغيرات على متوسط عدد نسلت المحلي والمتوسط. في هذه الدراسة، أكدت الجسيمات النانوية المشتتة في السائل الأساسي الصناعي إستر (SE) تحسن سلوك خصائص الموائع النانوية مقارنة بالزيت المعدني الأساسي (MO) والغازات السائلة السائلة (GTL).

**الكلمات المفتاحية:** الكسر الحجمي، حاوية الخزان، الحمل الحراري الطبيعي، المائع النانوي، أرقام رايلي الحرارية.