



HAL
open science

Effet d'un champ magnétique externe sur la convection naturelle mixte tridimensionnelle dans des cavités remplies par un nanofluide et munie d'un obstacle

Soulayma Gal

► To cite this version:

Soulayma Gal. Effet d'un champ magnétique externe sur la convection naturelle mixte tridimensionnelle dans des cavités remplies par un nanofluide et munie d'un obstacle. Energie électrique. Université de Rennes; Université du Centre (Monastir, Tunisie). Ecole nationale d'ingénieurs, 2025. Français. ⟨NNT : 2025URENS089⟩. ⟨tel-05600800⟩

HAL Id: tel-05600800

<https://theses.hal.science/tel-05600800v1>

Submitted on 23 Apr 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE RENNES

EN COTUTELLE INTERNATIONALE AVEC

L'ÉCOLE NATIONALE D'INGÉNIEURS DE MONASTIR

ECOLE DOCTORALE N° 647

SCIENCES POUR L'INGENIEUR

SPECIALITE : ENERGETIQUE, THERMIQUE ET COMBUSTION

Par

Soulayma GAL

Effet d'un champ magnétique externe sur la convection naturelle et mixte tridimensionnelle dans des cavités remplies par un nanofluide

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 12/12/2025

Unité de recherche : Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique LGCGM - France

Laboratoire de Métrologie et des Systèmes Énergétiques - Tunisie

Rapporteurs avant soutenance :

Christel Metivier
Mohamed Ammar Abbassi

Professeur, Université de Lorraine, Nancy, France
Maître de conférences HDR, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gafsa, Tunisie

Composition du Jury :

Président : Stéphane Fohanno
Examineurs : Stéphane Fohanno
Nour Sghaier

Professeur, Université de Reims, France
Professeur, Université de Reims, France
Professeur, ISBM, Université de Monastir, Tunisie

Dir. de thèse : Patrice Estellé
Dir. de thèse : Walid Hassen

Professeur, Université de Rennes, France ; USTH Vietnam
Maître de conférences HDR, Ecole National d'Ingénieur de Monastir, Tunisie

Invités

Lioua Kolsi Professeur, University of Ha'il, Arabie Saoudite

Table des matières

Abréviations.....	1
Nomenclature.....	2
Résumé.....	5
Introduction.....	7
I. Contexte de recherche.....	7
II. Objectifs.....	8
III. Structure.....	8
IV. Références.....	9
Chapitre I . Généralités et synthèse bibliographique.....	11
I. 1 Introduction.....	12
I.2 Nanofluides.....	12
I.2.1 Définition et composition des nanofluides.....	12
I.2.2 Histoire et développement.....	12
I.2.3 Types de nanoparticules.....	13
I.3 Nanofluides à base de graphène.....	14
I.3.1 Synthèse des dérivés du graphène et préparation des nanofluides.....	15
I.3.2 Stabilité.....	18
I.3.3 Propriétés thermophysiques des nanofluides à base de graphène.....	21
I.4 Nanofluides hybrides à base de graphène.....	40
I.5 Nanofluide ferromagnétique.....	41
I.6 Graphène et ses dérivés : innovations dans les processus de transfert de chaleur.....	42
I.7 Principes fondamentaux de la magnétohydrodynamique (MHD) appliquée à la convection et aux nanofluides	46
I.7.1 Principes généraux de la MHD.....	46
I.7.2 Contexte de la convection MHD.....	46
I.7.3 Impacts des champs magnétiques sur le comportement des nanofluides conducteurs.....	47

Table des matières

I.7.4	Domaines d'application et avancées actuelles.....	49
I.8	Technique de résolution.....	51
I.8.1	Modélisation et préparation.....	51
I.8.2	Résolution des équations.....	51
I.8.3	Post-traitement des données.....	51
I.9	Revue bibliographique.....	52
I.9.1	Convection MHD avec des nanofluides à base de graphène.....	53
I.9.2	Convection MHD avec des nanofluides hybride à base de graphène.....	54
I.10	Conclusion.....	55
I.11	Références.....	59
Chapitre II Caractérisations thermophysiques des nanofluides à base de graphène et de nanofluides hybrides graphène/ Fe₃O₄.....		77
II.1	Introduction.....	79
II.2	Profil thermophysique des nanofluides industriels à base de graphène-eau	80
II.3	Caractérisation des nanofluides hybride à base de graphène et Fe ₃ O ₄ et de leurs propriétés thermophysiques	96
II.3.1	Tension de surface des nanofluides hybrides graphène/Fe ₃ O ₄ à base d'eau.....	96
II.4	Conductivité thermique des nanofluides hybrides.....	107
II.4.1	Effet de surfactant.....	107
II.4.2	Effet de la concentration de nanoparticules et de la température.....	107
II.5	Capacité calorifique.....	111
II.6	Caractérisation du comportement rhéologique des nanofluide hybride.....	112
II.6.1	Effet du surfactant.....	112
II.6.2	Effet de la concentration de nanoparticules et de la température.....	113
II.7	Conductivité électrique.....	119
II.8	Conclusion.....	121
II.9	Références.....	122

Chapitre III Étude tridimensionnelle de la convection naturelle magnétohydrodynamique dans une enceinte remplie de nanofluid.....	124
Résumé.....	125
Chapitre IV Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides, modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques.....	135
IV.1 Introduction.....	137
IV.2 Problématique et hypothèses.....	137
IV.3 Formulation mathématique.....	139
IV.3.1 Équations électromagnétiques.....	139
IV.3.2 Dynamique des fluides.....	140
IV.3.3 Conditions aux limites.....	141
IV.4 Méthodes numériques et outils de simulation.....	143
IV.5 Maillage et sélection des éléments.....	143
IV.6 Dépendance et validation du code numérique.....	144
IV.7 Résultats et discussion.....	146
IV.7.1 Analyse de convergence.....	146
IV.7.2 Influence du sens d'écoulement.....	146
IV.7.3 Effet de la configuration d'écoulement.....	148
IV.7.4 Effet du courant électrique (I).....	150
IV.7.5 Effet du champs magnétique (B).....	157
IV.7.6 Effet de vitesse.....	162
IV.8 Conclusion.....	167
IV.9 Références.....	166
Conclusion générale.....	167

Abréviations

AAD	Écart absolu moyen [%]
Ag	Argent
Al	Aluminium
Al ₂ O ₃	Oxyde d'aluminium
CFD	Dynamique des fluides numérique
CNT	Nanotube de carbone
Co	Cobalt
COP	Coefficient de performance
Cu	Cuivre
CuO	Oxyde de cuivre
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur
FLG	Graphène à quelques couches
Fe ₃ O ₄	Oxyde de fer
GNP	Nanoplaquette de graphène
GO	Oxyde de graphène
MgO	Oxyde de magnésium
M	Maillage
MHD	Magnétohydrodynamique
MWCNT	Nanotubes de carbone multi-parois
NaCl	Chlorure de sodium
PVT	Photovoltaïque-thermique
rGO	Oxyde de graphène réduit
SEM	Microscopie électronique à balayage
TEM	Microscopie électronique en transmission
TiO ₂	Dioxyde de titane

Nomenclature

Symbole	Description	Unité
A	Aire de la section transversale du canal	[m ²]
B	Densité de flux magnétique	[T]
C _p	Capacité calorifique isobare	[J.g ⁻¹ .K ⁻¹]
D _h	Diamètre hydraulique	[m]
d	Épaisseur moyenne d'une nanoparticule en forme de feuille	[m]
E	Champ électrique	[V/m]
ε	Erreur relative	[%]
ε ₀	Permittivité du vide	[F/m]
F	Force de Lorentz	[N]
f	Facteur de frottement	[-]
γ	Taux de cisaillement	[s ⁻¹]
Ha	Nombre de Hartman	[-]
h _m	Épaisseur d'une couche de graphène	[m]
H	Hauteur de l'échangeur de chaleur	[m]
I	Courant DC	[A]
\vec{j}	Vecteur de densité de courant électrique	[A/m ²]
J ₀	Densité de courant imposé	[A]
k	Conductivité thermique	[W/m.K]
L	Longueur de l'échangeur de chaleur	[m]
l	Largeur de l'échangeur de chaleur	[m]
Li	Facteur de dépolarisation	[-]
m	Matrice polymère (indice)	-
\vec{n}	Vecteur normal à la surface	-
n	Nombre de couches dans le graphène multicouche	[-]
Nu	Nombre de Nusselt	[-]
P _e	Périmètre mouillé du canal	[m]
P _t	Puissance totale échangée par unité de surface	[W/m ²]
p	Pression	[Pa]
Pr	Nombre de Prandtl	[-]
Ra	Nombre de Rayleigh	[-]

R	Rayon d'une nanoparticule en forme de feuille	[m]
RI	Résistance de Kapitza	[Ω]
Rs	Rayon de la particule sphérique	[m]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
s	Écart-type	[m]
t	Temps	[s]
T	Température	[K]
TS	Tension de surface	[mN/m]
τ	Contrainte de cisaillement	[Pa]
u	Vitesse	[m/s]
U	Coefficient de transfert de chaleur	[W/m ² .K]
ν	Conductivité électrique	[S/m]
V	Vitesse d'entrée du fluide	[m/s]
V_m	Potentiel magnétique scalaire	[V]
V'	Potentiel électrique	[V]
v	Vitesse des charges	[m/s]
η	Rapport de planéité moyen	[-]
μ	Viscosité dynamique	[mPa.s]
μ_0'	Perméabilité du vide	[H/m]
ρ	Densité	[kg/m ³]
ρ_e	Densité de charge électrique	[C/m ³]
α_p	Expansivité thermique isobare	[K ⁻¹]
φ_v	Fraction volumique des nanoparticules	[%]
φ_m	Fraction massique des nanoparticules	[%]

Indice	Signification
bf	Fluide de base
eff	Effective
exp	Expérimentale
m	Matrice polymère
nf	Nanofluide
np	Nanoparticules
pred	Prédit

Résumé

Cette thèse porte sur l'intensification des échanges thermiques au moyen de nanofluides innovants à base de structures carbonées, en combinant des approches expérimentales rigoureuses et des modélisations numériques avancées. L'objectif principal de cette recherche est de développer et d'évaluer des nanofluides à haute performance thermique pour des applications dans des systèmes compacts, tels que les microéchangeurs, où le transfert de chaleur est assisté par un champ électromagnétique.

La première partie de cette thèse est dédiée à la caractérisation thermophysique approfondie de deux types de nanofluides élaborés à l'échelle industrielle par la société Blackleaf : des nanofluides à base de graphène et des nanofluides hybrides combinant graphène et Fe_3O_4 . L'analyse de la stabilité et du comportement de ces nanofluides a été réalisée. Les propriétés thermophysiques essentielles telles que la conductivité thermique, la capacité calorifique, la viscosité, la tension superficielle et la conductivité électrique sont mesurées expérimentalement en fonction de la concentration en nanoparticules, comprise entre 0,005 % et 0,2 % en masse, ainsi que de la température, variant de 283,15 K à 313,15 K. Les résultats expérimentaux sont ensuite comparés à des modèles théoriques issus de la littérature, et des corrélations empiriques sont aussi proposées. L'ensemble de ces résultats sert de base aux simulations numériques ultérieures.

Les simulations numériques sont réalisées à l'aide de la méthode des éléments finis dans le logiciel COMSOL Multiphysics. La première étude concerne la convection naturelle magnétohydrodynamique (MHD) tridimensionnelle dans une enceinte cubique remplie de nanofluide à base de nanotubes de carbone (CNT). Des corrélations théoriques sont utilisées pour prédire les propriétés thermophysiques des nanofluides et leur comportement thermique sous l'influence d'un champ magnétique. Le modèle inclut deux ailettes froides inclinées soumises à un champ magnétique horizontal, permettant d'analyser l'effet combiné du champ magnétique, de l'inclinaison des ailettes et de la concentration en nanoparticules sur le transfert thermique et la génération d'entropie. Les résultats montrent que l'ajout de CNT améliore considérablement les performances thermiques, tandis que le champ magnétique ralentit l'écoulement du fluide. L'optimisation de l'angle d'inclinaison des ailettes permet également de réduire efficacement les pertes thermodynamiques.

Dans une seconde étude, les résultats de la caractérisation thermophysique des nanofluides à base de graphène et hybrides sont exploités pour étudier la convection mixte MHD dans un microéchangeur. Ce modèle considère l'effet couplé du champ magnétique et d'un courant électrique appliqué, permettant ainsi d'évaluer l'impact de ces paramètres électromagnétiques, des vitesses d'entrée des fluides et des propriétés spécifiques des nanofluides sur les performances thermiques globales du système. Les simulations numériques révèlent des zones de performance optimale, dépendant de la configuration de l'écoulement, de la nature du nanofluide utilisé et des conditions opératoires.

En conclusion, cette thèse apporte une contribution significative à la compréhension des mécanismes de transfert thermique dans des environnements MHD complexes et propose des pistes concrètes pour l'optimisation des systèmes de refroidissement avancés. Elle établit une synergie entre la recherche expérimentale et la simulation numérique, et ouvre la voie à l'optimisation de solutions thermiques dans des applications technologiques.

Résumé

Mots-clés : Nanofluides, Graphène, Fe_3O_4 , Microéchangeurs, Convection MHD, Simulations numériques, COMSOL Multiphysics, Transfert thermique, Champ magnétique, Électromagnétisme, Performance thermique, Ailettes inclinées.

Abstract

This thesis focuses on the enhancement of heat transfer using innovative nanofluids based on carbonaceous nanostructures, through a combination of rigorous experimental approaches and advanced numerical modeling. The primary objective of this research is to develop and evaluate high-performance thermal nanofluids for applications in compact systems, such as micro heat exchangers, where heat transfer is assisted by electromagnetic fields.

The first part of this work is devoted to the in-depth thermophysical characterization of two types of nanofluids developed at an industrial scale by the company Blackleaf: graphene-based nanofluids and hybrid nanofluids combining graphene and Fe_3O_4 nanoparticles. The stability and behavior of these nanofluids have been assessed. Key thermophysical properties, including thermal conductivity, specific heat capacity, viscosity, surface tension, and electrical conductivity, are experimentally measured as functions of nanoparticle concentration (0.005–0.2 wt%) and temperature (283.15 K–313.15 K). The experimental results are then compared to theoretical models available in the literature, and use for the development of empirical correlations that serve as a foundation for subsequent numerical simulations. Numerical simulations are conducted using the finite element method implemented in the COMSOL Multiphysics software. The first study addresses three-dimensional magnetohydrodynamic (MHD) natural convection in a cubic enclosure filled with a carbon nanotube (CNT)-based nanofluid. Theoretical correlations are employed to predict the thermophysical properties and thermal behavior of the nanofluid under the influence of a magnetic field. The model incorporates two inclined cold fins subjected to a horizontal magnetic field, allowing for the analysis of the combined effects of magnetic field strength, fin inclination, and nanoparticle concentration on heat transfer and entropy generation. Results demonstrate that the addition of CNTs significantly enhances thermal performance, while the magnetic field tends to dampen fluid flow. Furthermore, optimizing the fin inclination angle effectively reduces thermodynamic losses.

In a second study, the thermophysical characterization results of graphene-based and hybrid nanofluids are used to investigate mixed MHD convection within a micro heat exchanger. This model accounts for the coupled effects of an external magnetic field and an applied electric current, thereby assessing the impact of electromagnetic parameters, inlet fluid velocities, and nanofluid-specific properties on the system's overall thermal performance. Numerical simulations reveal regions of optimal performance depending on flow configuration, nanofluid composition, and operating conditions.

In conclusion, this thesis provides a significant contribution to the understanding of heat transfer mechanisms in complex MHD environments and proposes practical pathways for optimizing advanced cooling systems. It establishes a synergy between experimental research and numerical simulation, and lays the groundwork for the design of thermal management solutions for energy technologies.

Keywords: Nanofluids, Graphene, Fe_3O_4 , Micro heat exchangers, MHD convection, Numerical simulations, COMSOL Multiphysics, Heat transfer, Magnetic field, Electromagnetism, Thermal performance, Inclined fins.

Introduction générale

I. Contexte de recherche

Le changement climatique, provoqué par l'accumulation progressive des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, représente aujourd'hui l'un des défis majeurs pour l'humanité. Depuis le XIX^e siècle, l'industrialisation et l'intensification des activités humaines ont entraîné une augmentation significative des émissions de GES, perturbant l'équilibre naturel de la planète et provoquant un réchauffement global. Les effets de ce dérèglement climatique sont désormais visibles à l'échelle mondiale, soulignant l'urgence de mettre en œuvre des stratégies de réduction des émissions. Dans ce contexte, l'amélioration de l'efficacité énergétique apparaît comme une priorité essentielle. Réduire la consommation d'énergie, sans compromettre les performances des systèmes, nécessite une optimisation fine des mécanismes de transport thermique. Parmi ces mécanismes, le transfert de chaleur par convection joue un rôle clé dans de nombreux procédés industriels (échangeurs de chaleur, systèmes de refroidissement) et phénomènes naturels. La compréhension et la maîtrise des processus convectifs ont ainsi fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières décennies [1], [2], [3].

Parmi les différentes stratégies explorées pour optimiser ces transferts, l'application de champs magnétiques s'impose comme une approche innovante. Fondée sur les principes de la magnétohydrodynamique (MHD), discipline initiée par Hannes Alfvén en 1942 [4], [5] et récompensée par le prix Nobel de physique en 1970, la MHD étudie l'interaction entre l'écoulement d'un fluide électriquement conducteur et les forces électromagnétiques. Ce couplage permet de contrôler le comportement des écoulements et d'améliorer ainsi la régulation thermique dans divers systèmes [3], [6].

Parallèlement, le choix du fluide caloporteur utilisé pour améliorer les échanges thermiques s'avère déterminant. À cet égard, les nanofluides, obtenus par dispersion de nanoparticules solides hautement conductrices dans un fluide de base courant, ont suscité un grand intérêt depuis plusieurs années [7], [8], [9]. Grâce à leur conductivité thermique améliorée, ces fluides innovants offrent de nouvelles perspectives pour les technologies de transfert de chaleur. Toutefois, leurs performances dépendent fortement de plusieurs facteurs, notamment la nature des nanoparticules, leur taille, leur concentration, la stabilité de la suspension dans le temps, auquel sont associées leurs propriétés thermophysiques, et la température du fluide.

Parmi les différentes familles de nanoparticules, les nanomatériaux à base de carbone, tels que les nanotubes de carbone et le graphène, présentent un intérêt tout particulier en raison de leur conductivité thermique exceptionnelle, de leur grande surface spécifique et de leur bonne compatibilité chimique [10], [11]. Le graphène, en particulier, se distingue par ses propriétés électriques, mécaniques et thermiques remarquables [12], [13], [14], [15]. Sa structure bidimensionnelle, constituée de feuillets accessibles sur leurs deux faces, en fait un candidat idéal pour la conception de nouveaux nanocomposites aux performances thermiques accrues [16], [17].

D'autre part, les matériaux et nanoparticules nanomagnétiques tels que l'oxyde de fer magnétique (Fe_3O_4) attirent l'attention pour leur réponse remarquable aux champs magnétiques. Ces matériaux, intégrés aux nanofluides sous forme de ferrofluides, permettent d'ajuster de manière contrôlée les propriétés optiques, thermiques et rhéologiques en réponse à un champ magnétique externe, ce qui leur confère le statut de fluides "intelligents" [18], [19].

Des études récentes ont montré que l'association du graphène et des nanoparticules de Fe_3O_4 dans les nanofluides permet d'exploiter les propriétés complémentaires de ces deux matériaux : la forte aimantation à saturation du Fe_3O_4 [20] et la conductivité thermique élevée du graphène [13], [15]. En raison des enjeux soulevés par ce développement, la présente thèse de doctorat a pour objectif d'étudier l'effet d'un champ magnétique externe sur la convection naturelle et mixte tridimensionnelle dans des cavités remplies de mono-nanofluides et de nanofluides hybrides ferromagnétiques.

II. Objectifs

L'objectif général de cette thèse est d'étudier et d'optimiser le transfert thermique de nanofluides à base de graphène et de nanofluides hybrides associant graphène et oxyde de fer magnétique (Fe_3O_4), afin d'améliorer l'efficacité thermique des systèmes de transfert de chaleur pour de possibles applications industrielles. Pour atteindre cet objectif, une approche intégrée combinant des investigations expérimentales, des analyses théoriques et des simulations numériques est adoptée.

Les objectifs spécifiques sont :

1. Evaluer les caractéristiques structurales des nanoparticules et leur stabilité en suspensions.
2. Caractériser les propriétés thermophysiques des nanofluides étudiés, telles que la conductivité thermique, la capacité calorifique, la densité et la conductivité électrique, leur comportement rhéologique
3. Étudier l'effet d'un champ magnétique externe sur la convection naturelle dans des cavités remplies de nanofluides à travers des simulations numériques, afin d'analyser les mécanismes de convection magnétohydrodynamique et leur impact sur l'intensification du transfert thermique.
4. Développer et valider un modèle numérique de convection mixte magnétohydrodynamique dans des microéchangeurs à contre-courant, en vue d'optimiser les configurations d'écoulement, les conditions de transfert thermique et les performances des systèmes à petite échelle, en exploitant les propriétés thermophysiques évaluées précédemment.

III. Structure

Afin d'atteindre les objectifs fixés, cette thèse est structurée en quatre chapitres principaux.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les nanofluides à base de graphène, les méthodes de production, leurs propriétés thermophysiques et rhéologiques, ainsi que les modèles de prédiction associés. Il traite également des nanofluides ferromagnétiques et hybrides, des principes fondamentaux de la magnétohydrodynamique appliquée aux nanofluides, et propose une analyse critique des travaux existants, identifiant les tendances et les défis actuels.

Le deuxième chapitre présente les systèmes expérimentaux et dispositifs utilisés pour la caractérisation expérimentale des propriétés thermophysiques et détaille les résultats expérimentaux concernant la caractérisation des nanofluides industriels à base de graphène et hybride (stabilité, conductivité thermique, viscosité dynamique, densité, etc.). Une attention particulière est portée à l'influence du surfactant, de la température et de la fraction massique de nanoparticules sur les propriétés thermophysiques des deux familles de nanofluides. Une partie de ces résultats a fait l'objet de publications scientifiques.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude numérique de la convection naturelle, de la génération d'entropie et des effets électromagnétiques dans une cavité tridimensionnelle remplie de nanofluide à base de carbone, soumise à un champ magnétique externe. La modélisation repose sur la méthode des éléments finis, en

intégrant la force de flottabilité (approximation de Boussinesq) et la force de Lorentz. Ce travail a également donné lieu à une publication scientifique.

Enfin, le quatrième chapitre porte sur l'étude de la convection magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à contre-courant. Il présente la modélisation physique et mathématique du système, décrit la méthode numérique utilisée, et analyse les performances thermiques en fonction de divers paramètres : champ magnétique, courant électrique, vitesse d'écoulement, nature du nanofluide, gradient thermique.

Les principales conclusions et les perspectives à ce travail sont finalement exposées à la fin de ce manuscrit.

IV. Références

- [1] M. Nemati, M. Sefid, A. Karimipour et A. J. Chamkha, « Computational thermal performance analysis by LBM for cooling a hot oval object via magnetohydrodynamics non-Newtonian free convection using magneto-ferrofluid », *J. Magn. Magn. Mater.*, 577, 170797, 2023, doi: 10.1016/j.jmmm.2023.170797.
- [2] A. Al-Amiri et K. Khanafer, « Fluid–structure interaction analysis of mixed convection heat transfer in a lid-driven cavity with a flexible bottom wall », *Int. J. Heat Mass Transf.*, pp. 3826–3836, 2011, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.047.
- [3] A. Hossain, M. M. Molla, M. Kamrujjaman, M. Mohebujjaman et S. C. Saha, « MHD mixed convection of non-Newtonian Bingham nanofluid in a wavy enclosure with temperature-dependent thermophysical properties: A sensitivity analysis by response surface methodology », *Energies*, 16, 4408, 2023, doi: 10.3390/en16114408.
- [4] H. Alfvén, « Existence of electromagnetic hydrodynamic waves », *Nature*, pp. 405–406, 1942, doi: 10.1038/150405d0.
- [5] C.-G. Fälthammar, « The scientific legacy of Hannes Alfvén », *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, pp. 201–202, 2012, doi: 10.1029/2012EO210001.
- [6] M. M. Ali, M. A. Alim, R. Akhter et S. S. Ahmed, « MHD natural convection flow of CuO/water nanofluid in a differentially heated hexagonal enclosure with a tilted square block », *Int. J. Appl. Comput. Math.*, pp. 1047–1069, 2017, doi: 10.1007/s40819-017-0400-y.
- [7] N. M. Maleki et S. Pourahmad, « Heat transfer enhancement in a heated copper tube using electromagnetic vibration method for nanofluids: An experimental study », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 141, 106566, 2023, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106566.
- [8] R. Balaga, R. Koona et S. Tunuguntla, « Heat transfer enhancement of f-MWCNT–Fe₂O₃/water hybrid nanofluid with combined effect of wire coil with twisted tape and perforated twisted tape », *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 184, 108023, 2023, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.108023.
- [9] M. L. G. Ho, C. S. Oon, L.-L. Tan, Y. Wang et Y. M. Hung, « A review on nanofluids coupled with extended surfaces for heat transfer enhancement », *Results Eng.*, vol. 17, 100957, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.100957.
- [10] A. Fiorani, J. P. Merino, A. Zanut, A. Criado, G. Valenti, M. Prato et F. Paolucci, « Advanced carbon nanomaterials for electrochemiluminescent biosensor applications », *Curr. Opin. Electrochem.*, pp. 66–74, 2019, doi: 10.1016/j.coelec.2019.04.018.
- [11] Ç. D. Güngüneş, Ş. Şeker, A. E. Elçin et Y. M. Elçin, « Comparative in vitro cytotoxic responses of two mammalian cell types to fullerenes, carbon nanotubes and iron oxide nanoparticles », *Drug Chem. Toxicol.*, 40(2), pp. 215–227, 2017, doi: 10.1080/01480545.2016.1199563.
- [12] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov et A. K. Geim, « The electronic properties of graphene », *Rev. Mod. Phys.*, 81, 109–162, 2009, doi: 10.1103/RevModPhys.81.109.

- [13] A. Y. Al-Rabeeh, I. Seres et I. Farkas, « Effects of concentration and temperature on viscosity and thermal conductivity of graphene-Fe₃O₄/water hybrid nanofluid and development of new correlation », *J. Eng. Thermophys.*, pp. 328–339, 2022, doi: 10.1134/S1810232822020138.
- [14] C. Soldano, A. Mahmood et E. Dujardin, « Production, properties and potential of graphene », *Carbon*, pp. 2127–2150, 2010, doi: 10.1016/j.carbon.2010.01.058.
- [15] A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao et C. N. Lau, « Superior thermal conductivity of single-layer graphene », *Nano Lett.*, pp. 767–775, 2008, doi: 10.1021/nl0731872.
- [16] A. Arshad, M. Jabbar, Y. Yan et D. Reay, « A review on graphene-based nanofluids: Preparation, characterization and applications », *J. Mol. Liq.*, pp. 444–484, 2019, doi: 10.1016/j.molliq.2019.01.153.
- [17] D. A. C. Brownson, D. K. Kampouris et C. E. Banks, « An overview of graphene in energy production and storage applications », *J. Power Sources*, 196(11), pp. 4873–4885, 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.02.022.
- [18] M. S. Dar, K. B. Akram, A. Sohail, F. Arif, F. Zabihi, S. Yang, S. Munir, M. Zhu, M. Abide et M. Nauman, « Heat induction in graphene-Fe₃O₄ nanohybrids for magnetic hyperthermia applications with artificial neural network modeling », *RSC Adv.*, pp. 21702–21715, 2021, doi: 10.1039/D1RA03428F.
- [19] Z. Shi, S. Qing, Z. Luo, Y. Liu et J. Li, « Thermal physical and magnetic properties of water-based yolk-shell Fe₃O₄@C nanofluids », *Inorg. Chem. Commun.*, 2023, doi: 10.1016/j.inoche.2023.110562.
- [20] H. Eshgarf, A. A. Nadooshan, A. Raisi et M. Afrand, « Experimental examination of the properties of Fe₃O₄/water nanofluid and correlation estimation using an artificial neural network », *J. Mol. Liq.*, 121150, 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2022.121150.

Chapitre I. Généralités et synthèse bibliographique

I.1	Introduction	12
I.2	Nanofluides	12
I.2.1	Définition et composition des nanofluides	12
I.2.2	Histoire et développement	12
I.2.3	Types de nanoparticules	13
I.3	Nanofluides à base de graphène	14
I.3.1	Synthèse des dérivés du graphène et préparation des nanofluides	14
I.3.2	Stabilité.....	18
I.3.3	Propriétés thermophysiques des nanofluides à base de graphène	21
I.4	Nanofluides hybrides à base de graphène.....	39
I.5	Nanofluide ferromagnétique.....	40
I.6	Graphène et ses dérivés : innovations dans les processus de transfert de chaleur.....	41
I.7	Principes fondamentaux de la magnétohydrodynamique (MHD) appliquée à la convection et aux nanofluides.....	45
I.7.1	Principes généraux de la MHD.....	45
I.7.2	Contexte de la convection MHD	45
I.7.3	Impacts des champs magnétiques sur le comportement des nanofluides conducteurs	46
I.7.4	Domaines d’application et avancées actuelles.....	48
I.8	Technique de résolution	50
I.8.1	Modélisation et préparation	50
I.8.2	Résolution des équations	50
I.8.3	Post-traitement des données	50
I.9	Revue bibliographique	51
I.9.1	Convection MHD avec des nanofluides à base de graphène	52
I.9.2	Convection MHD avec des nanofluides hybride à base de graphène.....	53
I.10	Conclusion.....	55
I.11	Références	59

I.1 Introduction

L'optimisation des performances de transfert de chaleur constitue un enjeu majeur dans divers secteurs industriels, notamment dans les échangeurs thermiques, les systèmes de refroidissement électronique, les technologies solaires thermiques à haut rendement, ainsi que dans les procédés opérant à des températures extrêmes. Les fluides caloporteurs conventionnels, tels que l'eau, l'éthylène glycol, le propylène glycol ou encore les huiles thermiques, présentent une conductivité thermique intrinsèquement faible, limitant leur efficacité dans les applications nécessitant un transfert thermique rapide et performant. Les nanofluides, créés par l'ajout de nanoparticules à ces fluides traditionnels constituent une solution innovante permettant d'améliorer significativement les capacités de transport thermique. En particulier, le graphène se démarque par ses excellentes propriétés thermiques, rendant les nanofluides à base de graphène très prometteurs pour l'amélioration des échanges thermiques.

Ce chapitre est organisé en deux grandes parties. La première dresse un état des lieux sur les connaissances actuelles et enjeux des nanofluides, en s'intéressant particulièrement à ceux incorporant des nanoparticules de graphène : leur composition, leurs méthodes de synthèse, ainsi que leurs propriétés physiques et thermophysiques sont détaillées, tout en abordant également les nanofluides hybrides à base de graphène et les nanofluides ferromagnétiques. La seconde partie se concentre sur l'étude du comportement des nanofluides en présence de champs magnétiques, dans le cadre de la convection magnétohydrodynamique (MHD), en mettant en lumière l'influence de ces champs sur les performances thermiques globales.

I.2 Nanofluides

I.2.1 Définition et composition des nanofluides

Les nanofluides sont des solutions colloïdales constituées de nanoparticules en suspension dans un liquide de base. Les particules, dont au moins une dimension est inférieure à 100 nm, confèrent au mélange des propriétés thermiques particulières. Les fluides de base couramment utilisés, tels que l'eau, l'éthylène glycol et les huiles, présentent une conductivité thermique relativement faible, limitant leur efficacité dans les applications de transfert de chaleur. L'ajout de nanoparticules solides à haute conductivité thermique dans ces fluides de base permet d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange, améliorant ainsi les performances thermiques globales.

I.2.2 Histoire et développement

Le concept de nanofluides constitue une avancée relativement récente dans le domaine des sciences thermiques et des matériaux. Il a été introduit pour la première fois en 1993 par Masuda et al. [1], à travers des expériences portant sur l'ajout de nanoparticules d'oxydes métalliques (tels que Al_2O_3 et TiO_2) à de l'eau. Ces travaux pionniers ont mis en évidence une amélioration significative de la conductivité thermique du fluide, établissant ainsi les fondements de cette nouvelle catégorie de fluides, bien que le terme « nanofluide » n'ait pas encore été employé à cette époque.

En 1995, Choi et al. [2] ont formalisé le concept en démontrant que l'introduction de nanoparticules métalliques, de taille inférieure à 100 nm, dans des liquides de transfert thermique classiques permettait d'améliorer substantiellement leurs propriétés thermophysiques, notamment la conductivité thermique. Ils ont également mis en évidence que la très grande surface spécifique des nanoparticules conférait aux nanofluides un potentiel élevé en matière de transfert thermique, ainsi qu'une meilleure stabilité des suspensions, comparativement aux fluides conventionnels ou aux suspensions contenant des particules de taille micrométrique.

Depuis, les recherches sur les nanofluides se sont intensifiées au fil des années pour mieux comprendre les mécanismes d'amélioration thermique et explorer l'influence de différentes nanoparticules (métaux, oxydes, carbures, ...) dans des fluides de caloporteurs classiques. Il a été démontré que la taille, la forme et le type de nanoparticules influencent fortement l'efficacité thermique. Au cours des années 2000, l'intérêt pour les nanofluides à base de carbone, tels que le graphène et les nanotubes de carbone, s'est accru en raison de leurs propriétés thermiques et électriques remarquables. Depuis, les nanofluides ont trouvé des applications potentielles dans divers secteurs comme la microélectronique [3], [4], l'aérospatiale [5] et les énergies renouvelables [6].

I.2.3 Types de nanoparticules

Les recherches sur les nanofluides ont principalement porté sur deux grandes familles de nanoparticules (NP) : d'une part, les nanoparticules métalliques et leurs oxydes, et d'autre part, les nanomatériaux carbonés tels que le nanographite, les nanodiamants ou encore les nanotubes de carbone (CNT). Ces matériaux sont choisis en fonction de leurs propriétés thermiques et électriques intrinsèques, qui surpassent de loin celles des fluides caloporteurs classiques.

Les caractéristiques thermiques des nanoparticules couramment employées dans la formulation des nanofluides sont récapitulées dans le Tableau I.1 ci-dessous. Il apparaît notamment que certaines nanoparticules présentent des conductivités thermiques et électriques exceptionnellement élevées. À titre d'exemple, la conductivité thermique des NP métalliques peut atteindre des valeurs comprises entre 6 et 400 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, soit deux à trois ordres de grandeur supérieurs à celles des fluides de base traditionnellement utilisés, tels que l'eau, l'éthylène glycol (EG), les huiles thermiques ou leurs mélanges [2][10]. Cette différence souligne clairement l'intérêt d'utiliser des nanoparticules pour améliorer les performances thermiques des fluides caloporteurs.

Plus récemment, une nouvelle approche a émergé avec l'introduction des nanofluides dits « hybrides » ou « mixtes », qui combinent plusieurs types de nanoparticules dans une même suspension. Cette stratégie vise à tirer parti des propriétés spécifiques de chaque type de nanoparticule afin d'optimiser les performances globales du fluide [7]. Les nanofluides hybrides offrent ainsi une flexibilité accrue dans l'ajustement des propriétés thermophysiques en fonction des besoins de l'application ciblée, tout en apportant une réponse potentiellement plus efficace que les systèmes à nanoparticules uniques [8].

Tableau I.1. Caractéristiques physiques des nanoparticules et des fluides de base utilisés pour la formulation des nanofluides à 293,15 K.

	Conductivité thermique ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	Capacité calorifique ($\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$)	Densité (kg/m^3)	Conductivité électrique (S/m^{-1})
Eau	0,596 [9]	4,183 [9]	998 [9]	$5,5 \times 10^{-6}$ [10]
Ethylene glycol	0,257[11]	2,74 [11]	1111 [11]	107 [12]
Huile de silicone	0,156 [13]	1,47 [14]	930 [15]	-
Huile de moteur	0,145 [15]	1,88 [15]	880 [15]	-
Argent Ag	429 [16]	0,234 [16]	10400 [16]	$6,2 \times 10^7$
Cuivre Cu	383 [16]	0,385 [16]	8954 [16]	$5,96 \times 10^7$ [17]

Chapitre I. Généralités et synthèse bibliographique

Cobalt Co	100 [16]	0,422 [9]	8900 [16]	$1,6 \times 10^7$ [17]
Aluminium Al	237 [16]	0,877 [16]	3970 [16]	29×10^{-4} [17]
Oxyde de magnésium MgO	55 [16]	0,955 [16]	3580 [16]	$1,65 \times 10^{-2}$ [18]
Alumine Al ₂ O ₃	40 [19]	0,775 [20]	3970 [21]	10^{-10} [17]
Oxide de cuivre CuO	32,9 [19]	0,525 [22]	6500 [23]	10^{-3} [17]
Titanium TiO ₂	8. 4 [24]	0,692-0,711 [25]	3900 [25]	10^{-1} [26]
Oxyde de fer Fe ₃ O ₄	80,4 [17]	0,670 [27]	5180 [17]	80,4 [17]
Graphène	5000 [17]	0,643-2,1 [28]	2250 [28]	6×10^8 [18]
Nanotube de carbone CNT	3 500 [29]	0,425 [29]	700-1700 [29]	$10^6 - 10^7$ [18]

I.3 Nanofluides à base de graphène

Le graphène, souvent considéré comme la "mère de toutes les formes graphitiques du carbone", est une monocouche d'atomes de carbone organisés en un réseau hexagonal par des liaisons sp² [30]. Ses propriétés exceptionnelles incluent une surface spécifique élevée (jusqu'à 2630 m²·g⁻¹) [31], une rigidité élevée, une conductivité thermique remarquable (~3000–5000 W·m⁻¹·K⁻¹) à 298,15 K [28], une mobilité élevée des porteurs de charge (200 000 cm²·V⁻¹·s⁻¹) [31], une imperméabilité aux gaz et une transparence optique (~97,7%) [32]. Ces caractéristiques uniques rendent le graphène idéal pour diverses applications industrielles, à condition qu'il puisse être produit de manière rentable et fiable à grande échelle, tout en maintenant un rendement et une qualité élevés. Par ailleurs, ses propriétés électrochimiques, particulièrement marquées aux bords, lui confèrent une capacité de stockage supérieure, une rapidité de mouvement des électrons et un pouvoir catalytique amélioré.

I.3.1 Synthèse des dérivés du graphène et préparation des nanofluides

Avant de détailler les méthodes de préparation des nanofluides, une description des techniques de synthèse des nanomatériaux à base de graphène est présentée. La production du graphène et la mise au point de nanofluides à base de ce matériau suscitent un intérêt croissant en raison de ses propriétés exceptionnelles. Pour une exploitation industrielle, le graphène doit être produit à un rythme comparable à celui des matériaux traditionnels [33], [34]. Le développement de procédés efficaces, de haute qualité, économiquement viables, reproductibles et adaptables à grande échelle reste un défi majeur [35]. L'analyse des techniques de synthèse du graphène s'articulera autour de ces critères [36]. Selon les propriétés recherchées (pureté, morphologie, taille des feuillets), plusieurs méthodes ont été développées pour obtenir des couches minces de graphène. La Figure I.1 illustre les deux grandes approches de synthèse : « bottom-up (de bas en haut) » et « top-down (de haut en bas) ».

L'approche « bottom-up » repose sur l'assemblage contrôlé de précurseurs moléculaires ou atomiques pour former des structures carbonées, souvent déposées sur un substrat [37]. Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) permet la production de graphène de haute qualité, caractérisé par une structure dense

et interconnectée, une grande surface spécifique et un minimum de défauts structuraux [38]. Les gaz hydrocarbures tels que le méthane (CH_4), l'acétylène (C_2H_2), l'éthylène (C_2H_4) et l'hexane (C_6H_{14}) sont utilisés dans le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) pour produire des couches de graphène sur des catalyseurs métalliques (Cu, Ni) à des températures élevées (923,15–1273,15 K). Lors du CVD, les précurseurs carbonés se décomposent en atomes de carbone, qui diffèrent à travers le catalyseur et forment une couche de graphène [39] : [40] [41] [42]. Cependant, le CVD présente des inconvénients, tels que des coûts élevés, des rendements faibles et la nécessité de purification. Pour améliorer ce processus, des recherches se sont orientées vers l'optimisation des conditions de synthèse, comme l'utilisation du CVD plasma-enhancé par onde de surface (PECVD), permettant de synthétiser du graphène à des températures plus basses (723,15 K) et un temps de dépôt réduit à 5 minutes [43]. Cette méthode pourrait être adaptée pour des applications commerciales en complément d'autres technologies CVD. Une autre approche bien connue est la synthèse thermique épitaxiale du graphène sur une surface de carbure de silicium monocristallin (SiC), qui permet de faire croître un film de graphène épitaxié sur un substrat monocristallin [37]. Lorsque le film et le substrat sont du même matériau, c'est une couche homoépitaxiale, et lorsqu'ils sont différents, c'est une couche hétéroépitaxiale. Sur SiC, cette méthode génère un film de graphène ou de graphite monocouche. En 1975, Bommel et al. [44] ont rapporté que le traitement thermique à haute pression produisait du graphite sur les faces polaires de SiC. En 2004, Berger et al. [45] ont créé des couches de graphène ultrafines sur la surface de 6H-SiC. En 2012, Juang et al. [46] ont amélioré la méthode en utilisant un catalyseur à base de Ni, permettant ainsi de transférer facilement le graphène sur d'autres substrats. Cette technique est prometteuse en raison de sa scalabilité et de la haute qualité du graphène produit.

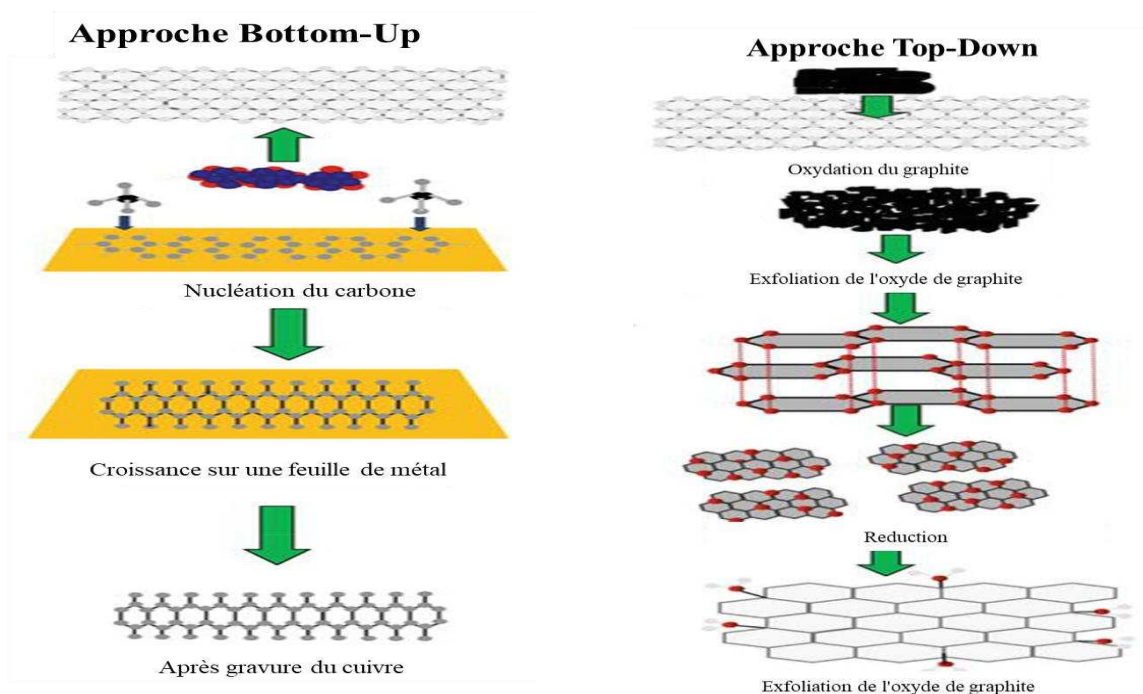


Figure I.1. Synthèse de graphène à partir d'approches bottom-up et top-down [49].

L'approche « top-down » consiste à fragmenter des matériaux macroscopiques comme le graphite pour en extraire des feuillets de graphène. Ces feuillets sont obtenus par exfoliation ou déchirement de graphite pyrolytique hautement ordonné (HOPG) ou d'oxyde de graphène (GO), ce qui permet d'ajuster les paramètres de synthèse. Chaque technique présente des avantages en termes de rendement, qualité

et fonctionnalisation [47], [48]. L'exfoliation mécanique est une méthode éprouvée pour obtenir des nanofeuillets de graphène de haute qualité à partir de différentes formes de graphite (vierge, expansé ou oxydé). Le clivage micromécanique, ou méthode du ruban adhésif, constitue la première technique expérimentale utilisée pour isoler des couches individuelles de graphène (Figure I.2) [37]. Elle a permis la production des premiers échantillons, marquant un tournant majeur dans l'étude des propriétés remarquables du graphène.

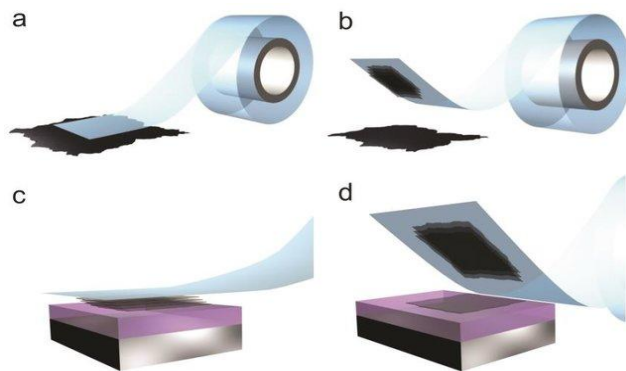


Figure I.2. Présentation schématique de l'exfoliation micromécanique du graphite au scotch [9].

La synthèse chimique du graphène repose sur l'oxydation du graphite, conduisant à un composé intercalé (GIC) où les forces de van der Waals sont affaiblies, facilitant l'exfoliation par chauffage rapide ou ultrasonication. L'oxyde de graphène (GO) a été produit pour la première fois en 1860 par Brodie [50], suivie des procédés de Hummers [51] et Staudenmaier [52]. L'ultrasonication permet d'obtenir des monocouches d'oxyde de graphène (SGO) [52], [53], [54], [55], et l'ultracentrifugation en gradient de densité permet de trier les feuillets selon leur nombre de couches [56]. Le GO est généralement synthétisé par oxydation du graphite à l'aide de KMnO_4 et NaNO_3 dans un milieu acide, puis réduit chimiquement, par exemple avec l'hydrazine, pour obtenir du Graphène [53], [57]. D'autres précurseurs, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAHs), permettent également de générer du graphène par cyclodéshydrogénation [58] [51–53]. Le graphène peut être dispersé dans divers solvants, tels que l'orthodichlorobenzène et le chloroforme [59]. Des techniques laser, comme l'utilisation de Nd:YAG pulsé, sont aussi utilisées pour exfolier le graphène, notamment pour des applications en électrodes transparentes et matériaux de stockage d'énergie [60].

La préparation des nanofluides à base de dérivés du graphène repose principalement sur deux approches : la méthode à une étape, où les nanofluides sont directement synthétisés par voie chimique, et la méthode à deux étapes, qui consiste à produire préalablement des nanopoudres de graphène via des procédés chimiques ou physiques (ablation laser, broyage, sol-gel), puis à les disperser dans un fluide de base [61].

Cependant, l'hydrophobicité intrinsèque du graphène, due aux interactions π - π entre ses feuillets, conduit à son agglomération et à sa sédimentation, en particulier dans des milieux aqueux. Pour pallier ces limitations, l'ajout de tensioactifs ioniques ou non ioniques est couramment utilisé pour stabiliser les dispersions. Néanmoins, cette approche peut être inadaptée dans certaines applications (tribologie, lubrification) et induire une augmentation significative de la viscosité du nanofluide.

La fonctionnalisation chimique du graphène constitue une alternative efficace pour améliorer sa dispersibilité sans recourir à des agents externes. Les méthodes covalentes, qui introduisent des groupes fonctionnels par liaison chimique, et les méthodes non covalentes, exploitant les interactions π - π , sont deux stratégies principales. L'oxydation du graphite permet l'introduction de groupes oxygénés favorisant la

dispersion du GO dans l'eau, mais au prix d'une diminution de la conductivité thermique. Un traitement acide suivi d'une réduction contrôlée de l'oxyde de graphène permet ainsi de produire des dérivés adaptés, combinant stabilité colloïdale et performances thermiques élevées.

Hajjar et al. [62] ont synthétisé du GO à partir de poudre de graphite en utilisant la méthode modifiée de Hummers. La surface hydrophile obtenue a permis une bonne compatibilité entre l'eau et les feuillets de graphène oxydé. Ainsi, les feuillets de GO ont été dispersés dans le fluide de base par ultrasonication, sans dispersant.

Sadri et al. [63] ont préparé des dispersions de GNPs fonctionnalisés de manière covalente, qui étaient stables et respectueuses de l'environnement. Les GNPs ont été fonctionnalisés avec des boutons de clou de girofle par la méthode "one-pot". Ensuite, les GNPs traités aux clous de girofle ont été ajoutés au fluide de base pour préparer le nanofluide selon la méthode à deux étapes. Les groupes fonctionnels hydrophiles ont été confirmés par spectres d'absorption UV-vis, ce qui a permis d'obtenir une stabilité de bonne qualité pendant environ deux mois après la synthèse.

Wang et al. [64] ont rapporté la préparation d'un nanofluide à base de graphène hautement stable avec un liquide ionique, sans ajout d'additifs. Il est à noter que les nanofluides à base de liquides ioniques sont appelés ionanofluides. Des photos optiques ont montré la dispersion des nanoparticules dans le fluide de base, avec une distribution uniforme des feuilles de graphène dans le liquide.

Baby et al. [65] ont présenté une méthode pour préparer des nanofluides contenant des feuillets de graphène décorées avec des nanoparticules d'oxyde métallique. Pour cela, les auteurs ont ajouté des groupes fonctionnels hydroxyle et carboxyle à la surface des feuillets de graphène sous traitement acide et ultrasonication, avant d'ajouter les nanoparticules d'oxyde de cuivre.

Le Tableau I.2, présente certaines des études réalisées sur les méthodes de préparations des nanofluides à base de graphène.

Tableau I.2. Caractéristiques de synthèse des nanofluides à base de graphène.

Référence	Type de graphène	Fluide de base	Méthode de synthèse
Wang et al. [64]	Oxyde de graphène réduit (rGO)	Liquide ionique : ([HMIM] BF ₄)	Méthode de Hummers
Baby et al. [66]	Oxyde de graphène (GO)	Ethylène glycol	Méthode de Hummers
Cai et al. [68]	Nanoplaquette de graphène (GNP)	Huile pour moteur diesel	Commerciale
Esfahani et al. [69]	Oxyde de graphène (GO)	Eau distillé	Méthode de Hummers
Mirsaeidi et al. [70]	Dots quantiques de graphène (GQD)	Eau distillé	CVD
Yang et al. [71]	Oxyde de graphène (GO)	Eau distillé	Méthode de Hummers
Yu et al. [72]	Oxyde de graphène réduit (rGO)	Ethylène glycol	Méthode de Hummers

Chapitre I. Généralités et synthèse bibliographique

Shazali et al. [73]	Nanoplaquette de graphène (GNP)	Eau distillé	Commercial
Hamze et al. [74]	Graphène à quelques couches (FLG)	Propylene glycol : Eau (40 :60)	Méthode d'exfoliation mécanique
Agarwal et al. [75]	Nanoplaquette de graphène (GNP)	Kérosène	Commerciale
Ahammed et al. [76]	Fibre de graphène (GF)	Eau distillé	Commerciale
Ghozatloo et al. [77]	Graphène à quelques couches (FLG)	Eau distillé	CVD
Ghozatloo et al. [78]	Graphène à quelques couches (FLG)	Eau distillé	CVD
Goharshadi et al. [79]	Dots quantiques de graphène (GQD)	Eau distillé	Commerciale
Hajjar et al. [62]	Oxyde de graphène (GO)	Eau distillé	Méthode de Hummers
Ijam et al. [81]	Oxyde de graphène (GO)	Eau : Ethylène glycol (60 :40)	Méthode de Hummers
Iranmanesh et al. [82]	Nanoplaquette de graphène (GNP)	Eau distillé	Commerciale
Sadri et al. [63]	Nanoplaquette de graphène (GNP)	Eau distillé	Commerciale
Vallejo et al. [83]	Nanoplaquette de graphène (GNP)	Havoline XLC : eau (50 :50)	Commerciale
Zhang et al. [84]	Oxyde de graphène réduit (rGO)	Eau distillé	Méthode de Hummers
Yu et al. [80]	Oxyde de graphène (GO)	Ethylène glycol	Méthode de Hummers

Afin d'assurer une performance optimale des nanofluides à base de graphène dans des applications industrielles, il est crucial d'analyser leur stabilité, qui constitue un facteur clé pour maintenir leur efficacité et leur fonctionnalité sur le long terme.

I.3.2 Stabilité

La stabilité des nanofluides est cruciale pour préserver leurs propriétés et assurer leur performance dans les échangeurs de chaleur, en empêchant l'agglomération des nanoparticules et en maintenant leur dispersion sur le long terme [85]. Selon la théorie DLVO [86], la stabilité des particules est déterminée par l'équilibre entre les forces d'attraction de Van der Waals et les forces de répulsion électrique dues à la double couche électrique. Lorsque les forces d'attraction sont plus fortes que les forces de répulsion, les particules

s'agglomèrent et se déposent, rendant le colloïde instable. À l'inverse, des forces de répulsion suffisantes maintiennent la stabilité de la suspension. Cette stabilité peut être renforcée par des interactions stériques, électrostatiques ou électro-stériques.

Plusieurs méthodes ont été développées pour améliorer cette stabilité, notamment la fonctionnalisation covalente et non covalente, l'utilisation de tensioactifs, la sulfonation, la polymérisation et l'ultrasonication. La fonctionnalisation covalente introduit des groupes chimiques sur la surface du graphène, améliorant sa dispersion, mais pouvant modifier ses propriétés intrinsèques. Les méthodes non covalentes, quant à elles, utilisent des forces électrostatiques et stériques, via des agents comme les tensioactifs, pour prévenir l'agglomération sans altérer la structure du graphène. Les tensioactifs se répartissent en quatre catégories : anioniques (par exemple, le sodium dodécylsulfate, SDS), cationiques (par exemple, le bromure de cetyltriméthylammonium, CTAB), non ioniques (comme le polyéthylène glycol monododécyl éther) et amphotères (comme le lauryl bétaine)[80], [81]. La sulfonation introduit des groupes sulfonés favorisant la dispersion dans des milieux polaires, tandis que l'ultrasonication aide à désagréger les amas de nanoparticules. L'application de revêtements inorganiques constitue également une alternative efficace pour stabiliser les nanoparticules sans compromettre leurs propriétés thermiques.

De récents travaux de recherche se sont concentrés sur l'amélioration de la stabilité des matériaux à base de graphène dans différents liquides, en mettant en œuvre des stratégies de fonctionnalisation covalente et non covalente. Par exemple, Sarsam et al. [87], ont examiné l'effet de différents tensioactifs notamment le sodium dodécylsulfate (SDS), le sodium dodécylbenzènesulfonate (SDBS), la gomme arabique (GA) et le bromure de cetyltriméthylammonium (CTAB) sur la stabilité des nanofluides à base d'eau et de nanoplaquettes de graphène (GNPs). Ils ont observé que la meilleure stabilité était obtenue après 60 minutes d'ultrasonication, alors que les suspensions sans tensioactif présentaient une faible stabilité. Parmi les tensioactifs testés, le SDBS s'est révélé le plus efficace, bien que certains agents, tels que le SDS, le SDBS et le CTAB, aient induit la formation de mousse. Ghoozati et al. [78] ont appliqué une méthode de traitement alcalin pour fonctionnaliser les feuilles de graphène, leur conférant ainsi des propriétés hydrophiles favorables à leur dispersion dans l'eau. Ils ont proposé une approche simple et efficace basée sur une oxydation douce, en utilisant du carboxylate de potassium et du persulfate de potassium, pour la synthèse de nanofluides à base d'eau et de graphène.

Dans une autre approche, Radnia et al. [88] ont développé un nouveau nanofluide en utilisant du graphène sulfoné (G-DS-Su), destiné à améliorer la récupération assistée du pétrole. Le graphène, obtenu par dépôt chimique en phase vapeur (CVD), a été sulfoné à l'aide du sel de diazonium de 4-sulfobenzène, suivi par une augmentation du taux de sulfonation. Le nanofluide final, présentant un potentiel zêta d'environ -30 mV, a démontré une bonne stabilité ainsi qu'une nature amphiphile favorable aux applications interfaciales.

Pour évaluer la stabilité des nanofluides, plusieurs techniques sont couramment utilisées dans la littérature. Ces méthodes fournissent différentes perspectives sur la stabilité et la dispersion des nanoparticules dans les fluides caloporteurs traditionnels. Parmi les techniques les plus répandues, on trouve :

La sédimentation et la centrifugation permettent d'évaluer la stabilité physique des nanofluides en observant la séparation des nanoparticules sous l'effet de la gravité ou de la force centrifuge [89]. Ces méthodes fournissent des informations essentielles en analysant la densité et la taille des sédiments formés, ainsi que l'évolution de la concentration et de la taille des particules dans le surnageant au fil du temps. Un nanofluide est considéré comme stable lorsque ces paramètres restent constants. Bien que simples à mettre en œuvre, ces techniques peuvent nécessiter une période d'observation plus longue que d'autres [90].

Le potentiel zêta est essentiel pour comprendre la stabilité et la dispersion des nanoparticules, notamment celles à base de graphène, dans des solutions liquides. Il mesure la charge de surface des nanoparticules et

évalue les forces répulsives et attractives entre elles. Selon le modèle de la double couche électrique [91], le potentiel électrostatique se divise en deux zones : la couche compacte (ou couche de Stern) et la couche diffuse. Les nanofluides avec un faible potentiel ζ tendent à se coaguler, tandis que ceux avec un potentiel ζ élevé (positif ou négatif) sont électriquement stabilisés. Une bonne stabilisation est obtenue lorsque le potentiel ζ se situe entre +/-40 et +/-60 mV, et une stabilisation optimale lorsque ce potentiel est supérieur à +/-60 mV. Cette méthode est largement utilisée par les chercheurs pour étudier la stabilité des nanofluides en raison de sa simplicité [74], [76], [87], [92], [93]. Cela nécessite néanmoins souvent une dilution des nanofluides pour réaliser une telle analyse.

La mesure de l'absorbance et de la transmittance spectrales permet d'évaluer l'absorption de la lumière par un milieu en fonction de la longueur d'onde et du temps, selon la loi de Beer-Lambert. La spectrophotométrie UV-visible est particulièrement efficace pour analyser la dispersion des nanoparticules en suspension et détecter les agglomérats. La lumière incidente traverse la suspension, et l'atténuation de la lumière transmise, causée par l'absorption et la diffusion par les nanoparticules, permet de surveiller la concentration, la taille des particules et leur stabilité [94], comme illustré à la Figure I.3 [95]. Ici aussi, un recours à une étape de dilution est souvent nécessaire.

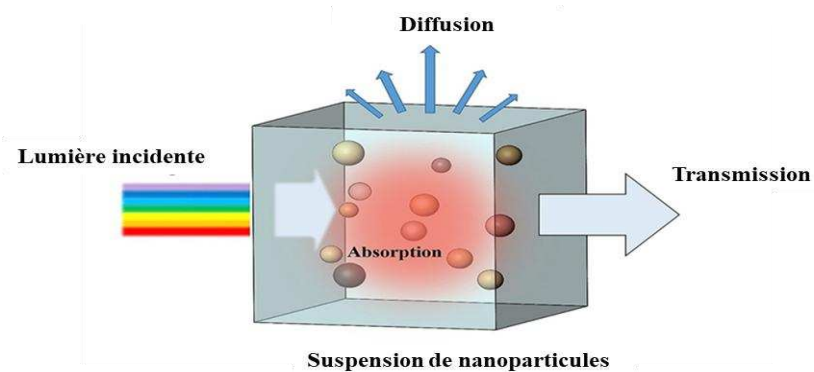


Figure I.3. Schéma de la diffusion, de l'absorption, et de la transmission de la lumière dans une suspension de nanoparticules [95].

La diffusion dynamique de la lumière (DLS) permet de mesurer la taille des particules dans les liquides [96]. Elle fonctionne en envoyant un faisceau laser sur l'échantillon et en analysant la façon dont la lumière est diffusée par les particules en mouvement (Figure I.4). Les petites particules bougent plus vite que les grandes, ce qui affecte la manière dont la lumière est diffusée. En suivant ces variations au fil du temps, la DLS permet de déterminer la taille moyenne des particules et leur distribution. Les nanofluides stables présenteront une taille moyenne des particules constante au fil du temps, tandis que les nanofluides instables afficheront des tailles de particules croissantes avec le temps [97]. La technique étant basée sur la diffusion de la lumière, des échantillons trop opaques doivent être dilués pour être analysés.

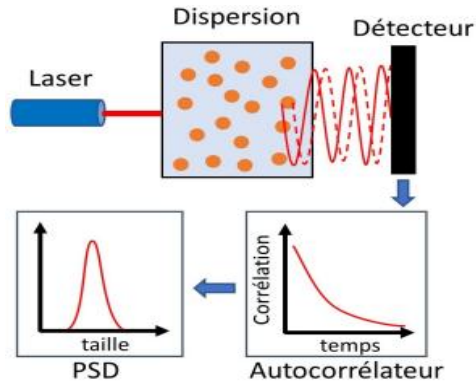


Figure I.4. Principe de la DLS : du laser à la taille [97].

I.3.3 Propriétés thermophysiques des nanofluides à base de graphène

Après avoir décrit les modes de préparation des nanofluides à base de graphène et les méthodes de caractérisation de leur stabilité, cette partie se penche sur l'analyse des connaissances actuelles concernant les propriétés thermophysiques et le comportement thermique de ces nanofluides dans les systèmes thermiques.

I.3.3.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique est une propriété cruciale qui définit l'efficacité d'un matériau à transférer la chaleur. Elle joue un rôle fondamental aussi bien dans les solides, où elle est régie par les vibrations du réseau atomique et la diffusion des électrons libres, que dans les fluides, où elle dépend des interactions moléculaires directes [98]. L'amélioration de cette propriété est essentielle pour optimiser la dissipation thermique et l'efficacité énergétique dans les systèmes thermiques.

Le graphène, en raison de sa structure bidimensionnelle parfaitement ordonnée, présente une conductivité thermique exceptionnellement élevée, variant entre 2000 et $5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ selon les conditions expérimentales [28], [99], [100]. Cette performance est principalement attribuée à une mobilité phononique exceptionnelle. Plusieurs méthodes expérimentales, telles que la méthode du fil chaud transitoire, la méthode d'oscillation de température et la méthode $3-\omega$, sont employées pour caractériser avec précision cette propriété [61].

I.3.3.1.1 Paramètres effectifs de la conductivité thermique de graphène

La littérature scientifique [17], [28], [99], [100], [101], [102], souligne que la conductivité thermique des nanofluides à base de graphène dépend de divers paramètres, notamment la taille, l'épaisseur des feuillets, la température, la concentration massique, la méthode de synthèse, le type de graphène et le fluide de base [103], [104]. Cette section examine certains de ces paramètres.

I.3.3.1.1.1 La méthode de synthèse

La méthode de fabrication du graphène impacte significativement ses propriétés thermiques. La présence de défauts topologiques introduits par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) perturbe l'ordre cristallin du matériau et limite la propagation efficace des phonons [105]. De plus, l'utilisation d'un substrat lors des mesures expérimentales peut induire des pertes thermiques par fuite de phonons à l'interface [106].

La fonctionnalisation chimique influence également cette propriété. La fonctionnalisation covalente, en modifiant l'hybridation sp^2 vers sp^3 , introduit des défauts qui entravent la propagation des phonons [82,100–103]. Par exemple, Chen et al. [107] ont démontré que l'hybridation sp^3 de certains atomes de carbone, par liaison avec trois autres atomes de carbone et un atome d'hydrogène, introduit des défauts hydrogénés exogènes qui réduisent significativement la conductivité thermique. Ainsi, une substitution de seulement 2,5 % des atomes de carbone suffit à diminuer la conductivité thermique de 40 %. D'autres études ont révélé que la dispersion aléatoire des atomes d'hydrogène dans le réseau cristallin affecte également de manière considérable cette propriété.

La fonctionnalisation non covalente, bien que préservant le réseau sp^2 , peut entraîner l'adsorption de tensioactifs, tels que le polyvinylpyrrolidone (PVP) ou le dodécylbenzènesulfonate de sodium (SDBS) à la surface du matériau, formant une couche isolante qui limite les transferts de chaleur entre les feuillets de graphène dispersés dans le fluide [101], [108].

Des études récentes de Zhang et al. [109] ont révélé que les déformations en traction et en compression ont un impact significatif sur la conductivité thermique des nanorubans de graphène (GNRs). En utilisant la méthode de dynamique moléculaire non-équilibrée inversée (RNEMD), ils ont analysé l'effet de la déformation en cisaillement sur la conductivité thermique des GNRs (dimensions 4 nm × 15 nm). Les résultats montrent que la déformation par cisaillement induit une variation modérée de la conductivité thermique. Selon les simulations en régime non-équilibré, la conductivité thermique diminue de 12 % et 16 %, respectivement, pour les orientations zigzag et armchair, indiquant ainsi une faible sensibilité de la conductivité thermique à ce type de déformation.

I.3.3.1.1.2 Effet de la température

La température accentue l'agitation moléculaire et le mouvement brownien des nanoparticules, favorisant les collisions interparticulaire et, par conséquent, l'augmentation de la conductivité thermique [110]. Baby et al. [66] ont montré qu'une faible concentration de 0,056 % vol de graphène dans une base aqueuse permet d'améliorer la conductivité thermique de 64 % à 323,15 K, soulignant l'efficacité thermique du graphène même à faible dosage. De même, Ijam et al. [81] ont rapporté une amélioration de la conductivité thermique de 6,67 % à 10,47 % pour un nanofluide à base de graphène oxydé (GO) dans un mélange eau/éthylène glycol (40 :60), lorsque la température passe de 298,15 à 315,15 K, à une concentration de 0,1 %. Des tendances similaires ont été confirmées dans d'autres fluides. Wang et al. [64] ont étudié un nanofluide à base de liquide ionique, où la conductivité thermique s'améliore de 11,8 % à 12,3 % entre 298,15 et 338,15 K pour une concentration de 0,03 %, et de 15,5 % à 18,6 % pour une concentration portée à 0,06 %. Par ailleurs, Askari et al. [111] ont démontré qu'un nanofluide de graphène dispersé dans du kérosène (0,1 wt.%) voit sa conductivité thermique passer de $0,111 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à $0,162 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ lorsque la température varie de 293,15 à 333,15 K.

Ces résultats, synthétisés dans le Tableau I.3, confirment une tendance d'augmentation de la conductivité thermique avec la température. Cette évolution est quantifiée par le Ratio d'amélioration de la conductivité thermique (TCER), défini par l'Eq I.1.

$$TCER = \frac{k_{nf} - k_{bf}}{k_{bf}} \times 100\% \quad \text{Eq I.1}$$

Tableau I.3. Effet de la température sur la conductivité thermique de nanofluide de graphène.

Référence	Nanofluide	Concentration	Température (K)	TCER (%)
Baby et al. [66]	Graphène fonctionnalisé/Eau	0,056 vol%	298,15-323,15	14 - 64
Ijam et al. [81]	Oxide de graphène (GO)/ (Eau-Ethylene glycol (40 :60))	0,1 wt.%	298,15-318,15	6,67 - 10,47
Chen et al. [112]	Oxide de graphène réduit (rGO)/Eau	0,02 wt.%	303,15-353,15	9,6 – 33,6
Wang et al. [64]	Graphène/Liquide ionique	0,06 wt.%	298,15-338,15	15,5 - 18,6
Yang et al. [71]	Oxide de graphène (GO)/Eau	1,5 wt.%	293,15-333,15	23,1 - 48,2
Gal et al. [93]	Graphène à quelques couches (FLG)/Eau distillé	0,1 wt.%	283,15-313,15	12
Agromayor et al. [113]	Nanoplaquette de graphène/Eau	1 wt.%	288,15-312,15	12
Liu et al. [114]	Graphène	0,03 wt.%	298,15-338,15	8,4
Zhang et al. [84]	Oxide de graphène réduit (rGO)/Eau	1,0 mg/ml	293,15-333,15	32,19

I.3.3.1.1.3 Effet de la taille de graphène

Plusieurs études ont montré qu’une réduction de la taille des feuillets favorise une amélioration significative du transfert thermique. Park et al. [115] ont étudié cet effet en formulant des nanofluides contenant des particules de graphène de dimensions latérales moyennes de 5 µm et 15 µm, M-5 et M-15. Les résultats ont révélé une relation inverse entre la taille des nanoparticules et la conductivité thermique : les plus petites particules présentent une conductivité thermique plus élevée. Mehrali et al. [116] ont confirmé cette tendance en utilisant des nanoplaquette de graphène (GNPs) caractérisées par des surfaces spécifiques croissantes (300, 500 et 750 m²/g) dont les clichés sont montrés sur la Figure I.5. Une amélioration proportionnelle de la conductivité thermique a été observée, atteignant jusqu’à 27,64 % à une concentration de 0,1 % en masse avec les GNPs de plus grande surface. Cette amélioration est attribuée à une dispersion plus homogène et à une interaction thermique accrue entre les nanoparticules et le fluide de base.

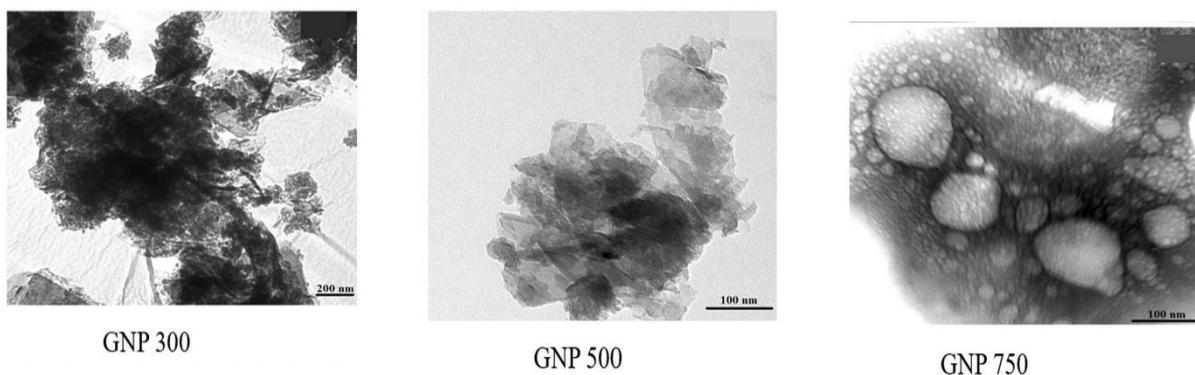


Figure I.5. Clichés MET de nanoplaquette de graphène [116].

Dans une étude complémentaire, Agarwal et al. [75] ont formulé des nanofluides à base de kérosène à l'aide de l'ultrasonication et de la stabilisation stérique. Les nanoplaquette (GNP) utilisées, d'épaisseur constante (2,5 nm) et de longueurs variantes entre 100 nm et 2000 nm, présentaient une surface spécifique du même ordre de grandeur que celles rapportées par Mehrali et al. [116], comprises entre 300 et 750 m²/g. Les auteurs ont montré que l'augmentation de la surface de contact entre les nanoparticules et le fluide améliore significativement la conductivité thermique, indépendamment de la nature du fluide porteur. Wang et al. [95] ont observé une diminution de la conductivité thermique avec l'augmentation du nombre de couches dans les nanorubans de graphène. Cette baisse est attribuée à la résonance des modes phononique hors du plan, qui perturbe la propagation efficace de la chaleur. De plus, ils ont montré que la diminution de la conductivité thermique en fonction de l'épaisseur des couches suit une relation proportionnelle, renforçant l'hypothèse d'un effet phononique dominant.

Par ailleurs, Gal et al. [93] ont montré que le rapport de planéité diminue à mesure que la concentration en graphène à quelques couches (FLG) augmente, en raison d'un chevauchement et d'une déformation plus fréquents des feuillettes dans le fluide. Ce résultat est décrit en détail plus loin au chapitre 2. Cette étude, réalisée à l'aide du modèle de Chu [117], révèle un comportement différent de celui observé par Hamze et al. [74], où l'utilisation de tensioactifs conduit à un rapport de planéité constant grâce à l'adsorption en grande quantités des molécules sur la surface des nanofeuillettes.

I.3.3.1.1.4 Fluide de base

Le fluide de base, principal composant des nanofluides de graphène, influence fortement le transfert de chaleur. Les recherches se sont principalement concentrées sur l'eau et l'éthylène glycol (EG), bien que d'autres fluides, comme la paraffine ou les liquides ioniques, aient été étudiés [118], [119]. Les résultats concernant les nanofluides à base d'eau et d'EG restent parfois contradictoires : certaines études rapportent de meilleures performances avec l'eau en raison de sa conductivité thermique plus élevée, tandis que d'autres mettent en avant l'EG, en soulignant une meilleure stabilité et dispersion des nanoparticules, limitant les phénomènes d'agglomération [120].

Les travaux de Baby et al. [66] ont montré que le coefficient de transfert thermique effectif (TCER) des nanofluides à base de graphène diffère selon que le fluide porteur est l'eau ou l'éthylène glycol (EG). Pour une même concentration en nanoparticules et une même température, l'eau induit une amélioration plus importante de la conductivité thermique des nanofluides au graphène que l'EG. Sundar et al. [121] ont approfondi cette analyse en synthétisant des nanoparticules hybrides d'oxyde de graphène et d'oxyde de cobalt (GO/Co₃O₄) par réduction dans une solution aqueuse de chlorure de cobalt. Ils ont utilisé différentes compositions de fluides de base : eau pure, EG pur, et mélanges massiques (20 :80, 40 :60, 60 :40 (EG : Eau)). À une concentration de 0,05 vol%, les améliorations observées à 333,15 K ont été de 8,58 %, 4,44 %, 7,92 %, 6,28 % et 5,14 % respectivement. Gao et al. [122] ont confirmé cette tendance avec des nanofluides de graphène, enregistrant une amélioration de la conductivité thermique de 6,8 % pour l'eau, 4,6 % pour l'EG, et 18 % pour un mélange (1 :1). Cependant, certaines études rapportent des résultats inverses. Par exemple, Selvam et al. [123] ont observé une amélioration de 21 % avec l'éthylène glycol, contre 16 % avec l'eau, pour une concentration volumique de 0,5 % à 30 °C, en présence d'un tensioactif. Cependant, certaines études rapportent des observations inverses.

Aravind et al. [124] ont préparé des nanofluides contenant des nanotubes de carbone multi-parois enrobés de graphène (Graphène-MWNT, ou GC), dispersés dans de l'eau et de l'éthylène glycol (EG) (0,04 vol%). À 298,15 K, les augmentations de conductivité thermique sont de 11,3 % pour l'eau et 17,3 % pour l'EG. Ces résultats suggèrent que l'EG, bien que moins conducteur à l'état pur, peut parfois générer un TCER plus élevé, selon les dimensions des nanoparticules et les méthodes de dispersion. Naddaf et al. [125] ont

montré que l'ajout de nanoplaquette de graphène fonctionnalisées à l'acide humique (HA-GNP) dans une huile de base améliore la conductivité thermique du nanofluide, atteignant une augmentation maximale de 87 % à 0,5 wt% et 353,15 K. Cette performance dépasse celle du graphène fonctionnalisé à l'acide oléique (OA-GNP), avec une amélioration supplémentaire d'environ 4 %, grâce à une meilleure dispersion, une réduction de l'agglomération et la formation de nanocouche thermiquement conductrices autour des nanoparticules.

Ainsi, les futures recherches devraient viser à mieux comprendre les mécanismes de couplage thermofluide dans les nanofluides de graphène et à établir une méthode d'évaluation systématique de l'influence du fluide de base. Cela permettrait de définir des critères objectifs pour l'optimisation des formulations.

I.3.3.1.1.5 Effet de concentration

De nombreuses études ont mis en évidence l'effet significatif de la concentration en graphène sur l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides, indépendamment du type de fluide de base ou de la méthode de synthèse utilisée. Ghozatloo et al. [78] ont synthétisé des nanofeuillets de graphène par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) afin de formuler des nanofluides à base d'eau. Ils ont observé des augmentations de la conductivité thermique de 15,0 %, 29,2 % et 12,6 % pour des concentrations massiques respectives de 0,05 %, 0,075 % et 0,1 %, à une température de 298,15 K, mettant en évidence la sensibilité du transfert thermique à la concentration en nanofeuillets.

De même, Mehrali et al. [116] ont étudié l'effet des nanoplaquette de graphène (GNP) sur les propriétés thermiques de nanofluides aqueux. À une concentration de 0,1 % en masse, une augmentation de 27,64 % de la conductivité thermique a été enregistrée, sans influence notable de la taille des particules ou de l'ajout de tensioactifs. Baby et al. [66] ont également confirmé l'augmentation progressive de la conductivité thermique avec la concentration en graphène, un résultat corroboré par d'autres travaux expérimentaux [76].

Akhavan-Zanjani et al. [152] ont étudié la conductivité thermique d'un nanofluide à base d'eau contenant des feuillets de graphène. Leurs résultats ont mis en évidence une amélioration notable de la conductivité thermique, même pour de faibles concentrations de graphène. Une augmentation maximale de 10,30 % a été observée.

Alklaibi et al. [15] ont réalisé des comparaisons de conductivité thermique entre le graphène et d'autres nanoparticules d'oxydes métalliques. Ils ont découvert qu'à une très faible concentration volumique de 0,15 %, il était possible d'obtenir une amélioration de la conductivité thermique de 37,2 % à 323,15 K avec un nanofluide à base d'eau et de graphène. Comparé à un fluide eau-argent à une température similaire, le graphène dépasse celui-ci de 5,2 %. Pour différents fluides de base, Askari et al. [111] ont ajouté des nanoparticules de graphène dans du kérosène et ont constaté que la conductivité thermique du nanofluide augmentait avec l'augmentation de la concentration en graphène [107], [108], [109].

S'agissant des nanocomposites hybrides, Barai et al. [126][106] ont développé des nanofluides à base d'oxyde de graphène réduit-oxyde de fer (rGO-Fe₃O₄), pour des concentrations volumiques de 0,01 %, 0,05 %, 0,07 %, 0,1 % et 0,2 %. À une température de 313,15 K, des augmentations respectives de la conductivité thermique de 41,35 %, 57,23 %, 66,76 %, 77,72 % et 83,44 % ont été observées, illustrant clairement l'effet amplificateur de la concentration en phase dispersée.

Les données regroupées dans le Tableau I.4 confirment la tendance générale d'une amélioration de la conductivité thermique de nanofluide en fonction de la concentration en nanoparticules de graphène, indépendamment du fluide de base utilisé.

Tableau I.4. Résumé des performances thermiques de nanofluides au graphène selon la concentration.

Référence	Nanofluide	Concentration	Température (K)	TCER (%)
Baby et al. [66]	Graphène fonctionnalisé / Eau	0,005 - 0,056 vol%	323,15	9,5-64
Ahammed et al. [76]	Graphène / Eau	0,05 - 0,15 vol%	323,15	18,6-37,2
Askari et al. [111]	Graphène / Keroséne	0,05 - 0,5 wt. %	333,15	3,9–23,6
Yu et al. [80]	Oxyde de graphène (GO) / Éthylène glycol	1- 5 vol%	303,15	10,5-61
Zhang et al. [84]	Oxyde de graphène réduit (rGO) / Eau	0,2-1 mg/ml wt. %	333,15	4,7-32,2
Ghozatloo et al. [127]	Graphène / Eau	0,05 ; 0,075 ; 0,1 wt. %	298,15	15-29,2-12,6
Sedaghat et al. [128]	Points quantiques de graphène (GQDs)/ Eau	0,5 % vol	323,15	53%
Liu et al. [114]	Graphène/Liquide ionique	0,03 - 0,06 wt. %	473,15	22,9
Mehrali et al. [116]	Nanoplaquette de graphène (GNP)/Eau	1mg/ml	313,15	27,64
Wang et al. [129]	Nanoplaquette de graphène/Eau	1 wt%	298,15	14,2%

I.3.3.1.2 Modèle théorique de la conductivité thermique des nanofluides à base de graphène

Depuis les premiers modèles classiques proposés par Maxwell [130], puis celui de Hamilton–Crosser [131], la modélisation de la conductivité thermique des nanofluides a considérablement évolué pour surmonter les limites de ces approches initiales. Ces modèles précurseurs, bien qu'importants, se sont avérés insuffisants pour prédire précisément la conductivité thermique des nanofluides à base de graphène, car ils ne prenaient pas en compte des facteurs cruciaux tels que l'épaisseur des particules, leur taille, leur orientation, ainsi que les interactions entre celles-ci. Afin de remédier à ces limitations, plusieurs modèles ont été proposés au fil des années. En 1993, Nan et al. [132] a introduit un modèle théorique majeur en incorporant des éléments essentiels comme la résistance thermique d'interface (effet Kapitza), le rapport d'aspect, la taille des particules et leur distribution spatiale. Ce modèle a permis d'obtenir une meilleure concordance avec les résultats expérimentaux des nanofluides. En 2012, Shahil et al. [133], a développé un modèle spécifiquement pour les nanoparticules en forme de feuillets, comme les nanoplaquette de graphène (GNP), en tenant compte de leur géométrie anisotrope, ce qui n'avait pas été pris en considération dans les approches antérieures. En 2013, Chu et al. [117] ont étendu le modèle de Nan aux nanofluides à base de graphène, en intégrant les propriétés thermiques particulières du graphène lorsqu'il est dispersé dans une phase liquide. En 2016, Shen et al. [134] ont proposé un raffinement du modèle de Nan en introduisant un paramètre anisotrope, qui dépend du nombre de couches de graphène, afin de mieux modéliser la conductivité

thermique directionnelle. Plus récemment, Zhang et al. [135] ont conçu un modèle destiné aux composites polymères chargés de nanoparticules en forme de feuillets, prenant en compte l'épaisseur et la conductivité thermique de l'interphase, l'anisotropie thermique, ainsi que la forme, la taille et la fraction volumique des nanoparticules. Ce modèle a été validé expérimentalement pour des feuillets d'épaisseur allant de 15 à 250 nm, une plage où l'effet de l'interphase reste négligeable. Ces modèles sont présentés dans le Tableau I.5, chaque paramètre étant défini dans la nomenclature. Ils ont permis d'améliorer la compréhension et la prédiction de la conductivité thermique des nanofluides à base de graphène.

Tableau I.5. Modèles théoriques pour la prédiction de la conductivité thermique des nanofluides de graphène.

Equation	
Nan's [132]	$k_{effx} = k_{effy} = k_m \frac{2+f_{np}[\beta_x(1-L_x)(1+\cos^2\theta) + \beta_z(1-L_z)(1-\cos^2\theta)]}{2-f_{np}[\beta_x L_x(1+\cos^2\theta) + \beta_z L_z(1-\cos^2\theta)]}$ $\beta_i = \frac{k_{npi}^e - k_m}{k_m + L_i(k_{npi}^e - k_m)} ; i = x, y \text{ et } z$
Shahil's [133]	$k_{eff} = \frac{k_{np}(3k_m + 2f_{np}(k_{np} - k_m))}{(3 - f_{np})k_{np} + k_m f_{np} + R_l k_m k_{np} f_{np} / (nh_m)}$
Shen [134]	$k_{eff} = k_m \frac{3+f_{np}[2\beta_x(n)(1-L_x) + \beta_z(n)(1-L_z)]}{3-f_{np}[2\beta_x(n)L_x + \beta_z(n)L_z]}$ $\beta_i(n) = \frac{k_{npi}^e(n) - k_m}{k_m + L_i(k_{npi}^e(n) - k_m)}$
Zhai [135]	$k_{eff} = k_m \frac{3+f_{eff}[2\frac{k_{npx}^{eff} - k_m}{k_m + L_x(k_{npx}^{eff} - k_m)}(1-L_x) + \frac{k_{npz}^{eff} - k_m}{k_m + L_z(k_{npz}^{eff} - k_m)}(1-L_z)]}{3-f_{eff}[2\frac{k_{npx}^{eff} - k_m}{k_m + L_x(k_{npx}^{eff} - k_m)}(L_x) + \frac{k_{npz}^{eff} - k_m}{k_m + L_z(k_{npz}^{eff} - k_m)}(L_z)]}$
Chu [117]	$k_{nf} = k_{bf} \left(\frac{3 + \frac{2\eta^2\phi}{[k_{bf}(\frac{2R_k}{L} + 13.4\sqrt{\epsilon})]}}{3 - \eta\phi} \right)$

Avec f_{np} est la fraction volumique de particules, L_x , L_z sont les facteurs de dépolarisation et θ est l'angle d'orientation des particules par rapport à l'axe de référence.

I.3.3.2 Viscosité

Le comportement rheologique des nanofluides se décrit par l'interaction entre la contrainte de cisaillement (τ) et le taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$). La contrainte de cisaillement correspond à la composante tangentielle de la force exercée par unité de surface sur un plan de glissement au sein du fluide, tandis que le taux de cisaillement représente la vitesse à laquelle la déformation de cisaillement évolue dans le temps. Le rapport

entre ces deux grandeurs définit la viscosité dynamique (μ), qui exprime la résistance à l'écoulement provoquée par le frottement entre les couches fluides.

Les fluides peuvent être classés en deux catégories selon leur comportement rhéologique [136]: les fluides Newtoniens et les fluides non Newtoniens. Les fluides Newtoniens présentent une viscosité indépendante du taux de cisaillement, ce qui implique une relation linéaire entre contrainte et taux de cisaillement. En revanche, les fluides non Newtoniens manifestent une viscosité qui varie en fonction du taux de cisaillement. Ce comportement peut adopter différentes formes, telles que le comportement pseudo-plastique, dilatant ou encore celui d'un plastique de Bingham. Le schéma illustrant ces différents types de comportements rhéologiques est présenté dans la Figure I. 6.

La viscosité des nanofluides à base de graphène résulte d'interactions complexes entre multiples facteurs : nature, taille, morphologie et concentration des nanoparticules, température, propriétés physico-chimiques du fluide porteur, taux de cisaillement, et traitements de surface appliqués aux particules [137], [64]. Bien que l'incorporation de nanoparticules améliore la conductivité thermique, elle s'accompagne souvent d'une augmentation non négligeable de la viscosité dynamique, nécessitant une gestion optimisée pour concilier efficacité thermique et contraintes hydrodynamiques.

L'évaluation de la viscosité des nanofluides repose à la fois sur des études expérimentales et sur des modèles théoriques, utilisant divers instruments et méthodes [82], [138]. Plusieurs études expérimentales ont été menées pour mesurer la viscosité des nanofluides à base de graphène [10], [61], [129], [139], [140], [141] [93], mettant en évidence l'effet du graphène et de la température sur le comportement rhéologique du fluide de base. Par exemple, Mehrali et al. [116] ont étudié des nanofluides contenant des nanoplaquette de graphène à différentes concentrations. À une température de 333,15 K, ils ont observé une augmentation de la viscosité de l'ordre de 44 %. Cette augmentation a été principalement attribuée à l'augmentation de la concentration des nanoparticules, à leur agglomération, ainsi qu'à l'intensification des contraintes de cisaillement.

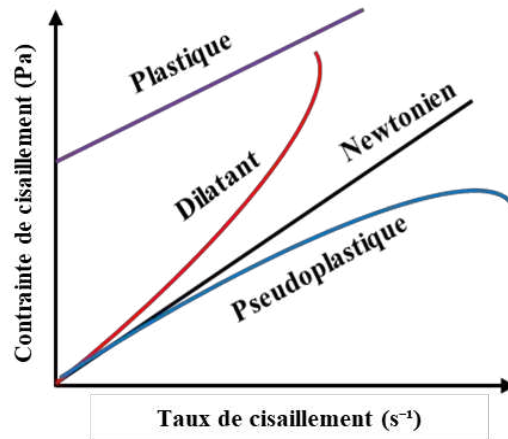


Figure I. 6. Comportements rhéologiques des fluides.

D'autre part, Das et al. [143] ont examiné l'amélioration du transfert thermique des nanofluides de graphène dans des caloducs. Ils ont constaté qu'à une concentration massique de 0,10 %, la viscosité du nanofluide était 175 % plus élevée que celle de l'eau distillée à 293,15 K. Cependant, ils ont également observé une réduction de la viscosité avec l'élévation de la température, allant jusqu'à 25 % pour cette concentration, comme l'illustre la Figure I.7.

Des recherches ont également été menées sur les nanofluides à base d'oxyde de graphène (GO). Ranjbarzadeh et al. [144] ont étudié des nanofluides aqueux contenant du GO à des concentrations comprises entre 0,025 % et 0,1 %, intégrant des groupes fonctionnels hydroxyle (–OH) et carboxyle (–COOH). À la concentration maximale, ils ont observé une augmentation de 78 % de la viscosité dynamique, induisant une élévation de 16 % du facteur de frottement par rapport à l'eau pure. Nazari et al. [145] ont quant à eux examiné des nanofluides aqueux sans tensioactifs, contenant de faibles concentrations d'oxyde de graphène (GO) (0,25–1,5 g/L), dans le but d'évaluer leur potentiel pour le transfert thermique dans des caloducs pulsés. À 298 K, la viscosité relative mesurée pour ces nanofluides variait entre 1,041 à 0,25 g/L et 1,248 à 1,5 g/L.

Esfahani et al. [69] ont étudié des dispersions d'oxyde de graphène (GO) dans de l'eau distillée à deux concentrations (0,01 % et 0,1 % en masse) et à des températures de 298 et 313 K. Les résultats indiquent qu'à 0,01 % en masse, la viscosité est comparable à celle de l'eau, tandis qu'à 0,1 %, elle est supérieure de 60 % à 298 K. De plus, les nanofluides à 0,01 % présentent un comportement rhéologique newtonien, tandis qu'à 0,1 %, ils adoptent un comportement pseudoplastique non-newtonien à des taux de cisaillement inférieurs à 20 s^{-1} .

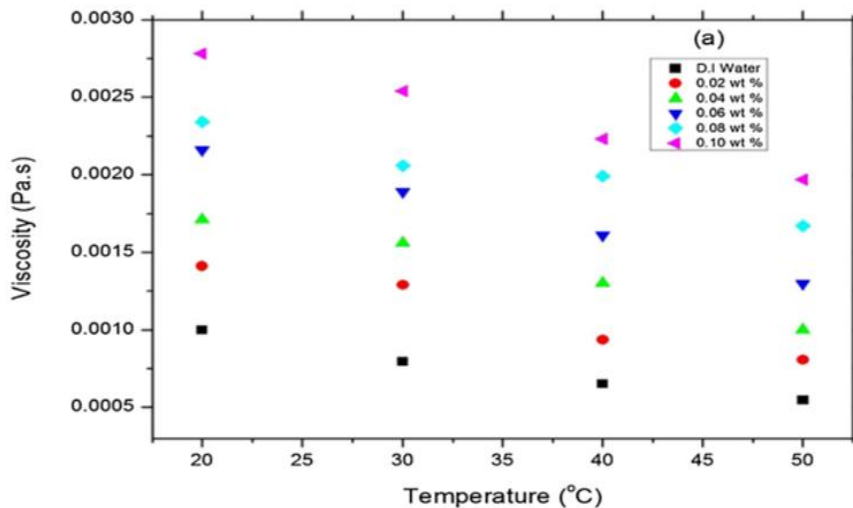


Figure I.7. Effet de la température et de la concentration en graphène sur la viscosité des nanofluides [143].

Moghaddam et al. [140] ont analysé l'influence de plusieurs paramètres sur les propriétés rhéologiques du glycérol et de nanofluides multicouches de graphène. Ils ont observé une augmentation significative de la viscosité en fonction de la fraction massique de solides, variant entre 0,0025 et 0,0200. Ils ont constaté qu'à 2 % en masse, la viscosité du glycérol augmentait de 401,49 % à $6,32 \text{ s}^{-1}$ et 293,15 K. Dey et al. [10] ont montré que l'ajout de 0,395 % de nanofeuillets de graphène à un mélange eau distillée–éthylène glycol induit un comportement non-newtonien avec amincissement par cisaillement, et double la viscosité par rapport au fluide de base. Kazemi et al. [141] ont évalué l'impact de l'ajout de silice et de graphène sur la viscosité de l'eau, en testant des fractions volumiques de 0,05 %, 0,1 %, 0,25 %, 0,5 % et 1 %. Ils ont montré que les nanofluides eau/graphène présentent un comportement pseudoplastique non-newtonien. Par ailleurs, Ahammed et al. [146] ont étudié l'influence de la fraction volumique (0,05–0,15 %) et de la température (283,15–363,15 K) sur la viscosité de nanofluides contenant des nanofeuillets de graphène dispersés dans l'eau. Ils ont constaté une diminution de la viscosité avec l'élévation de la température, et une augmentation

avec la fraction volumique. En particulier, une hausse moyenne de 47 % de la viscosité a été observée à 323,15 K pour une fraction volumique de 0,15 %.

Amiri et al. [150] ont étudié des nanofluides de graphène dans l'eau déionisée et ont observé une augmentation de 29,4 % de la viscosité à 0,045 % de concentration volumique. De manière similaire, Sarsam et al. [39] ont mesuré la viscosité de nanofluides à base de graphène dans de l'eau distillée à l'aide d'un rhéomètre rotatif Anton Paar, pour des taux de cisaillement compris entre 20 et 200 s⁻¹, et ont observé une augmentation de 15,29 % à 0,045 % en volume. Yarmand et al. [149] ont également signalé une augmentation de 24 % de la viscosité pour des nanofluides similaires, mesurée à un taux de cisaillement de 500 s⁻¹ pour des concentrations comprises entre 0,0091 % et 0,045 %.

D'autres études, telles que celle de Sadeghinezhad et al. [64] ont montré que les nanofluides à base de nanoplaquettes de graphène (GNP-H₂O) présentent une viscosité en diminution de 9 % à 38 % lorsque la température est portée de 288,15 à 328,15 K. Esfahani et al. [194] ont observé une augmentation notable de 130 % de la viscosité pour des nanofluides à base de graphène.

Par ailleurs, Iranmanesh et al. [82], ont mis en évidence des augmentations significatives de la viscosité liées à l'ajout de graphène dans les nanofluides. Goodarzi et al. [91] ont rapporté une augmentation plus modérée de 3,78 % pour une concentration de 0,06 % en volume. De leur côté, Vallejo et al. [147] ont étudié le comportement rhéologique de nanoplaquette de graphène fonctionnalisées dispersées dans de l'eau, du propylène glycol et des mélanges eau-propylène glycol, et ont noté une augmentation maximale de la viscosité allant jusqu'à 38 % pour les nanofluides à base d'eau.

Borode et al. [101] ont mené une étude approfondie sur les facteurs influençant la viscosité absolue et relative des nanofluides à base de graphène, en examinant divers taux de cisaillement et une plage de températures allant de 298,15 à 333,15 K. Ils ont observé que la viscosité relative varie entre 1,01 et 1,465 en fonction de la concentration, de la température et du cisaillement appliqué. Une diminution de la viscosité a été systématiquement observée à mesure que le taux de cisaillement et la température augmentaient, traduisant un comportement typique de fluides à écoulement dépendant du cisaillement.

Ainsi, les références supplémentaires des études détaillées dans le Tableau I.6 viennent renforcer les conclusions de cette section et permettent de compléter les connaissances sur les propriétés rhéologiques des nanofluides à base de graphène.

Tableau I.6. Principaux résultats d'évaluation de la viscosité dynamique de nanofluides à base de graphène.

Chercheur	Nanofluids	Concentration de particules	Température (K)	Résultats clé
Vallejo et al. [147]	Nanoplaquette de graphène/ (Propylène glycol (PG) : Eau)	0,25 -0,5 - 0,75 -1 wt%	303,15	Pour 1 % wt, la viscosité de nanofluide augmente de 38 % dans l'eau, 23 % dans PG: Eau (30:70) et 21 % dans PG: Eau (50:50).
Park et al. [115]	(Graphène/graphène oxydé) / Eau distiller	0,001-0,01 wt%	298,15	À 0,01 % vol, la viscosité du nanofluide de graphène M-15 augmente de 15,65 %, soit 1,2 fois plus que celle du M-5.%.

Chapitre I. Généralités et synthèse bibliographique

Wenshi et al. [148]	Feuille de graphène/ Huile de silicone	0,01- 0,03, 0,05- 0,07 %	293,15- 333,15	La viscosité des nanofluides diminue avec la température, atteignant 49,95 % et 48,11 % pour 0,01 % et 0,05 %.
Sami et al. [87]	Nanoplaquette de graphène/ Eau	0,1 wt%	298 ,15- 328,15	Les valeurs moyennes de viscosité sont bien supérieures à celles de l'eau distillée, avec des augmentations respectives de 116,9 % ; 83,6 % ; 63,7 % ; 76,5 % ; 59,7 % ; 79,3 % et 108,9 % à différentes températures (298,15 ; 303,15, 308,15 ; 313,15, 318,15 ; 323,15 et 328,15 K).
Yarmand et al. [149]	Nanoplaquette de graphène/ Eau distillée	0,1 %wt	293,15- 313,15	La viscosité de nanofluide augmente de 33 % à 0,1 % wt à 313,15 K par apport à l'eau distillée et de 1,33 fois à 0,1 %wt à 313,15 K.
Amiri et al. [150]	Boites quantiques de graphène/ Eau distillée	0,01-0,05-0,1 % wt	298,15- 323 ,15	A 0,001 et 0,002 % wt : comportement newtonien à tous les taux de cisaillement. La viscosité de nanofluide est supérieure à celle de l'eau distillée, avec des augmentations de (1,00 et 2,11 % à 298,15 K), (1,10 et 2,20 % à 303,15 K), (1,84 et 3,54 % à 313,15 K), et (1,54 et 3,58 % à 323 ,15 K).
Sedaghat et al. [128]	Boites quantiques de graphène/ (Eau-éthylène glycol (60 :40)	0,05-0,1%, 0,2-0,3-0,4-0,5 % vol	283,15- 313,15K	À 0,5 % vol, la viscosité de nanofluide augmente fortement : 119,3 % (eau), 152 % (éthylène glycol) et 128 % (mélange). L'augmentation est faible à faibles concentrations (0,05–0,2 % vol), mais devient significative dès 0,4 % vol.
Mehrali et al. [146]	Nanoplaquette de graphène/ Eau distiller	0,25-0,50-0,75 -1,0 wt%	293,15– 333,15	La viscosité de nanofluide baisse de 4 à 44 % à haute température par rapport à l'eau distillée à un taux de cisaillement de 500 s ⁻¹ .
Cabaleiro et al. [151]	Oxide de graphène/ Eau déionisée	0,0005–0,1 vol%	293,15- 303,15	Pour les deux nanofluide GO/rGO :

Chapitre I. Généralités et synthèse bibliographique

	Oxide de graphène réduit/ Eau d'ionisée			Un comportement newtonien $\leq 0,01\%$ vol. nanoparticules et rhéofluidifiant ($>0,01\%$ vol, GO/rGO). Pour les nanofluides non newtoniens, l'augmentation maximale de viscosité atteint 100–130 % pour le GO et 70–80 % pour le rGO.
Zanjani et al. [152]	Oxyde de graphène réduit/ Eau distiller	0,005–0,02 vol%	298,15–308,15	La viscosité croît avec la concentration et décroît avec la température, atteignant un pic de 4,9 % à 298,15 K pour 0,02 % vol.
Dey et al. [10]	Graphène / (Eau distillée–éthylène glycol (30 :70))	0,041 et 0,395%	303,15	La viscosité de nanofluide présente un comportement non newtonien avec un effet d'amincissement sous cisaillement. À 0,395 % vol, la viscosité augmente d'environ 100 % par rapport au fluide de base.
Wanga el al. [153]	Nanoplaquette de graphène (GNP) / Eau	0,2-0,4-0,6-0,8-1 wt%	278,15-298,15	Aucune différence significative de viscosité après 2 ans, confirmant la stabilité des nanofluides GNP. La viscosité double celle de l'eau à 1 % de GNP et varie avec la concentration et la température.
Liu et al. [103]	Graphène/ (Liquide ionique [HMIM]BF ₄)	0,03-0,06 wt%	303,15-488,15	Une baisse de viscosité de 4,6 % à 13,1 % est observée pour 0,06 % wt, entre la température ambiante et environ 473 K.
Iranmanesh et al. [106]	Nanoplaquette de graphène/ Eau distillé	0,05-0,1 wt%	293,15-333,15	La viscosité augmente avec la concentration et diminue avec la température.
Agarwal et al. [71]	Nanoplaquette de graphène/ Kérosène	0,005-0,2 wt%	293,15	A 0,2 % wt la viscosité augmente de 8 %.
Chai et al. [107]	Nanofeuillets de graphène/ Huile hydrogénée	25–100 ppm	303,15	A la plus haute concentration de nanoparticules, la viscosité et la contrainte de cisaillement augmentent jusqu'à 33 % à 303,15 K.

Cakmak et al. [108]	Nanofeuillets de graphène/ Eau déionisée	0,05–0,1 wt%		À 0,1 %.wt, la viscosité augmente de 11,97 %.
Selvam et al. [67]	Nanoplaquette de graphène/ (Eau + éthylène glycol (30 :70))	0,1–0,5 vol%	303,15–323,15	La viscosité augmente avec la concentration et diminue avec la température.
Kanti et al. [161]	Graphène/ Liquide ionique ([EMIM][DCA], [EMIM][TFSI])	0,5–1 wt%	298,15	La viscosité (μ) augmente avec la concentration en nanofluides jusqu'à 1 % wt, de 151 % et 269 % par rapport à [EMIM][DCA] et [EMIM][TFSI] respectivement, à 500 s ⁻¹ μ diminue avec l'élévation de T pour les liquides ioniques. À 0,5 % de graphène, la viscosité reste stable ; elle augmente linéairement à des concentrations plus élevées sous l'effet de la température.
Hamze et al. [121]	Graphène à quelques couches /Fluid commercial	0,05–0,5 wt%	283,15–323,15	La viscosité augmente avec la concentration et diminue avec la température.
Lin et al. [120]	Nanofeuillets de graphène/ Eau	0,01–0,5 vol%	298,15–343,15	La viscosité (μ) augmente avec la concentration et diminue avec la température.
Selvam et al. [66]	Nanoplaquette de graphène/ (Eau + éthylène glycol (30 :70))	0,1–0,5 vol%	303,15–323,15	Le rapport de viscosité (μ_{nf}/μ_{bf}) des nanofluides passe de 1,06 à 1,16 à 0,1 % vol et de 1,13 à 1,39 à 0,5 % vol.

I.3.3.2.1 Modèles de viscosité pour les nanofluides à base de graphène

De nombreux modèles théoriques et empiriques ont été élaborés pour corréler ou prédire l'évolution de la viscosité des nanofluides sous différentes conditions [136]. La plupart des modèles existants concernent des nanofluides contenant des nanoparticules sphériques, tandis que quelques-uns abordent les nanoparticules de forme allongée. Dans cette section, nous nous concentrons uniquement sur les modèles relatifs aux nanofluides à base de graphène.

L'équation d'Andrade [154] (Eq I.2) a été utilisée pour établir la corrélation entre la viscosité des nanofluides et la température. Cette équation est définie comme suit :

$$\mu = E. e^{\frac{F}{T}} \tag{Eq I.2}$$

Où E et F sont des paramètres ajustables, et T est la température absolue (K).

Wang et al. [94] ont proposé une relation permettant d'estimer la viscosité apparente des nanofluides à base de graphène en fonction de la fraction massique des nanoparticules (φ_m) et de la température du fluide (T) (Eq I.3). Cette relation est valide pour $0,2 < \varphi_m < 1$ wt% et $278,15 < T < 298,15$ K, et est exprimée par :

$$\mu = 0,004 \cdot (1 - \varphi_m)^{-77.5} \cdot e^{\frac{1652}{T}} \quad \text{Eq I.3}$$

En parallèle, l'équation de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) [148,149] (Eq I.4), est fréquemment utilisée pour décrire la dépendance de la viscosité à la température :

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot e^{\frac{A \cdot T_0}{T - T_0}} \quad \text{Eq I.4}$$

Où $\mu(T)$ est la viscosité dynamique à la température T (en Kelvin) et μ_0 , A et T_0 sont des paramètres ajustables obtenus par régression sur des données expérimentales.

Récemment, Vallejo et al. [142] (Eq I.5) ont proposé un modèle pour prédire la viscosité dynamique des nanofluides à base de graphène, prenant en compte à la fois la fraction volumique de graphène (φ) et la température (T) du fluide. Cette relation s'écrit comme suit :

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot e^{\frac{A \cdot T_0}{T - T_0}} + B \cdot e^{\frac{C}{T}} \cdot \varphi - D \cdot \varphi^2 \quad \text{Eq I.5}$$

Où les paramètres μ_0 , A et T_0 conservent la même signification que dans le modèle VFT (Eq I.4), tandis que B, C et D sont des coefficients ajustables permettant de modéliser l'influence de la concentration volumique en nanoparticules et de la température sur la viscosité. Ces paramètres sont déterminés par ajustement sur des données expérimentales.

Enfin, le modèle de Maron et Pierce [150] (Eq I.6) est également utilisé pour décrire la viscosité des nanofluides, notamment ceux contenant des nanotubes de carbone [17,94,151]. Ce modèle présente l'avantage de ne pas nécessiter de données sur la viscosité intrinsèque, qui dépend de la forme des nanoparticules. Il a été appliqué par Gal et al. [92] pour prédire l'amélioration de la viscosité des nanofluides à base d'oxyde de graphène et d'oxyde de graphène réduit dans l'eau, en considérant φ_m comme un paramètre ajustable. Il est formulé par :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-2} \quad \text{Eq I.6}$$

Où φ est la fraction volumique des nanoparticules et φ_m est la fraction volumique maximale d'empilement.

I.3.3.3 Capacité calorifique

La capacité calorifique spécifique (exprimée en J/g·K) représente l'énergie nécessaire pour élever la température d'un gramme d'une substance d'un degré Kelvin. Ce paramètre joue un rôle fondamental dans l'évaluation des performances thermiques des nanofluides, notamment lorsqu'ils sont utilisés comme fluides caloporteurs. Une capacité calorifique élevée permet un transfert thermique plus efficace à débit constant, réduisant ainsi la puissance nécessaire pour le pompage.

Cependant, l'introduction de nanoparticules dans un fluide de base entraîne généralement une diminution de la capacité calorifique du mélange. Cela s'explique par le fait que les nanoparticules, de nature solide, possèdent une chaleur spécifique plus faible que celle des fluides de base. Par exemple, l'eau (4,18 J/g·K)

et l'éthylène glycol (2,35 J/g·K) présentent des valeurs nettement supérieures à celles du graphène, qui varie entre 0,643 et 2,10 J/g·K [53,108].

Des travaux expérimentaux confirment cette tendance. Zhang et al. [109] ont observé une réduction progressive de la capacité calorifique d'un nanofluide eau-graphène : de 3,915 J/g·K pour l'eau pure à 293,15 K, elle diminue à 3,875, 3,834 et 3,768 J/g·K pour des concentrations en masse de 0,2 %, 0,4 % et 0,8 %, soit une baisse maximale de 3,75 %.

Pour estimer la capacité calorifique spécifique des nanofluides, plusieurs modèles ont été proposés. Le modèle de Pak et Cho [155], basé sur un simple rapport de mélange, s'exprime comme suit :

$$C_{p,nf} = \varphi \cdot C_{p,np} + (1 - \varphi) \cdot C_{p,bf} \quad \text{Eq I.7}$$

Où $C_{p,bf}$, $C_{p,np}$ et φ représentent respectivement la capacité calorifique du fluide de base, la capacité calorifique des nanoparticules, et la concentration volumique des nanoparticules.

En 2010, Zhou et al. [22] ont introduit l'Eq I.8 pour évaluer la capacitance thermique spécifique de nanofluides, en s'appuyant sur le modèle d'équilibre thermique.

$$(\rho \cdot C_p)_{nf} = \varphi \cdot (\rho \cdot C_p)_{np} + (1 - \varphi) \cdot (\rho \cdot C_p)_{bf} \quad \text{Eq I.8}$$

L'influence de la température et de la concentration a été largement étudiée. Selvam et al. [156] ont noté une augmentation de la capacité calorifique spécifique avec la température, mais une baisse avec l'augmentation de la concentration de nanoparticules. Des observations similaires ont été faites par Huminic et al. [157]. En revanche, Calvino et al. [158] ont signalé peu de variation à faible concentration (0,05 % en masse). Vasudevan et al. [159] ont confirmé une réduction de la capacité calorifique avec l'augmentation de la teneur en graphène réduit (rGO). D'autres recherches ont également étudié l'influence des nanoparticules sur la capacité calorifique spécifique des nanofluides à base de graphène [114], [146], [160]. Mehrali et al. [160], ont montré une réduction de 7,4–9,4 % de la capacité calorifique spécifique pour une concentration de 0,01 % en masse par rapport à 0,06 % en masse. Liu et al. [114] ont observé que la chaleur spécifique des ionanofluides de graphène variait entre 2,236 et 2,363 J g⁻¹ K⁻¹ en fonction de la concentration et de la température. Ahammed et al. [146] ont noté une diminution progressive du rapport de chaleur spécifique avec des concentrations croissantes, allant de 0,091 % à 0,271 % pour des concentrations en volume de 0,05 % à 0,15 % à 323,15 K.

Kanti et al. [161] ont étudiés des fluides ioniques dopés avec des nanoparticules de graphène (INF) dans une plage de température de 303,15 à 333,15 K. Les résultats montrent que la capacité calorifique spécifique des INF est généralement inférieure à celle des fluides ioniques purs, avec des variations dépendant de la température et de la concentration en nanoparticules. En particulier, la capacité calorifique des INF augmente avec la température mais diminue avec la concentration en graphène. Les nanoparticules de graphène, ayant une chaleur spécifique faible comparée aux fluides ioniques, améliorent la conductivité thermique des INF. À 303,15 K, la chaleur spécifique d'un INF contenant 0,5 % de graphène est réduite de 0,54 % par rapport aux fluides ioniques purs, et cette réduction atteint 1,1 % à 333,15 K, ce qui est corroboré par les travaux de Wang et al. [64], Zhang et al. [162].

I.3.3.4 Densité

La densité des nanofluides est essentielle pour évaluer des paramètres thermiques et hydrodynamiques tels que les nombres de Nusselt, Grashof, Reynolds, ainsi que la puissance de pompage, la perte de charge et les facteurs de frottement [23], [163]. Bien qu'elle puisse être mesurée par différentes techniques expérimentales, elle est souvent estimée à l'aide de la loi de mélange de Pak et Cho [155] qui met en

corrélation la densité du mélange avec la densité des nanoparticules et du fluide de base et la concentration par unité de volume (Eq. I. 9).

$$\rho_{nf} = \varphi \cdot \rho_{np} + (1 - \varphi) \cdot \rho_{bf} \quad \text{Eq. I. 9}$$

Où, φ est la concentration volumétrique des nanoparticules, ρ_{np} et ρ_{bf} sont respectivement la densité du nanofluide, des nanoparticules et du fluide de base.

En règle générale, la densité des nanofluides dépasse celle du fluide de base en raison de la densité plus élevée des nanoparticules. Toutefois, pour le graphène (Gr), il convient de distinguer la densité réelle (proche de celle du graphite, 2,00-2,50 g/cm³) de la densité apparente, beaucoup plus faible (0,2-0,4 g/cm³), en raison de sa structure poreuse [56,58].

Cette différence de densité influence directement la stabilité du nanofluide : une grande différence augmente la vitesse de sédimentation des nanoparticules, ce qui peut nuire à la performance thermique par perte de matière active [110–112].

Les nanofluides à base de graphène, cependant, bénéficient d'une meilleure stabilité en suspension grâce à une densité proche de celle des fluides de base. Cependant, des études telles que celles menées par Elsaid et al. [164], Huminic et al. [157], et Vasudevan et al. [159] montrent que la densité des nanofluides augmente avec l'ajout de nanoparticules de graphène.

Par exemple, Vasudevan et al. [159] ont rapporté une légère augmentation pour des concentrations en rGO variant de 0,2 % à 0,8 %, tandis que Huminic et al. [104] ont constaté une hausse de 23 % pour 0,2 % en masse de nanoparticules de graphène ajoutées à un fluide de base.

De plus, Cabaleiro et al. [165] ont étudié la densité des nanoplaquette de graphène dispersées dans un mélange d'éthylène glycol et d'eau. Ils ont observé une augmentation de la densité avec la concentration de nanoparticules, cette variation étant légèrement influencée par la température. Enfin, Selvam et al. [166] ont noté une augmentation de la densité des nanofluides de graphène avec la concentration en nanoparticules, atteignant un maximum à environ 4 % pour une concentration de 0,5 % en volume.

I.3.3.5 Tension de surface

La tension superficielle (TS) est une propriété fondamentale de la surface d'un liquide, résultant de l'attraction mutuelle entre ses molécules. Elle se manifeste par une force orientée perpendiculairement à la surface, dirigée vers l'intérieur du liquide. Cette caractéristique est le reflet des interactions intermoléculaires et a une influence majeure sur les propriétés du liquide. Elle joue un rôle clé dans la détermination de la forme des gouttelettes, des interactions interfaciales entre les liquides et les solides, ainsi que celles entre les liquides et les gaz. La tension superficielle peut être quantifiée en mesurant l'énergie du film liquide qui se forme à la surface

Les chercheurs ont démontré que la tension superficielle des fluides est cruciale pour le transfert de chaleur. Elle influence la formation des bulles lors de l'ébullition, et les études sur les nanofluides montrent qu'en la réduisant, on peut améliorer considérablement l'efficacité des échanges thermiques. [167]. La Figure I.8, présente une vue d'ensemble des différentes techniques de mesure de la tension superficielle couramment utilisées dans la recherche expérimentale, notamment la goutte pendante (figure I. 9.(a)), l'anneau de Du Noüy (figure I. 9.(b)), la plaque de Wilhelmy (figure I. 9.(c)), la pression de bulle maximale (figure I. 9.(d)), la remontée capillaire (figure 9.(e)), la méthode de la goutte tournante (figure I. 9.(f)), et la goutte posée (figure I. 9.(g)) [168], [169].

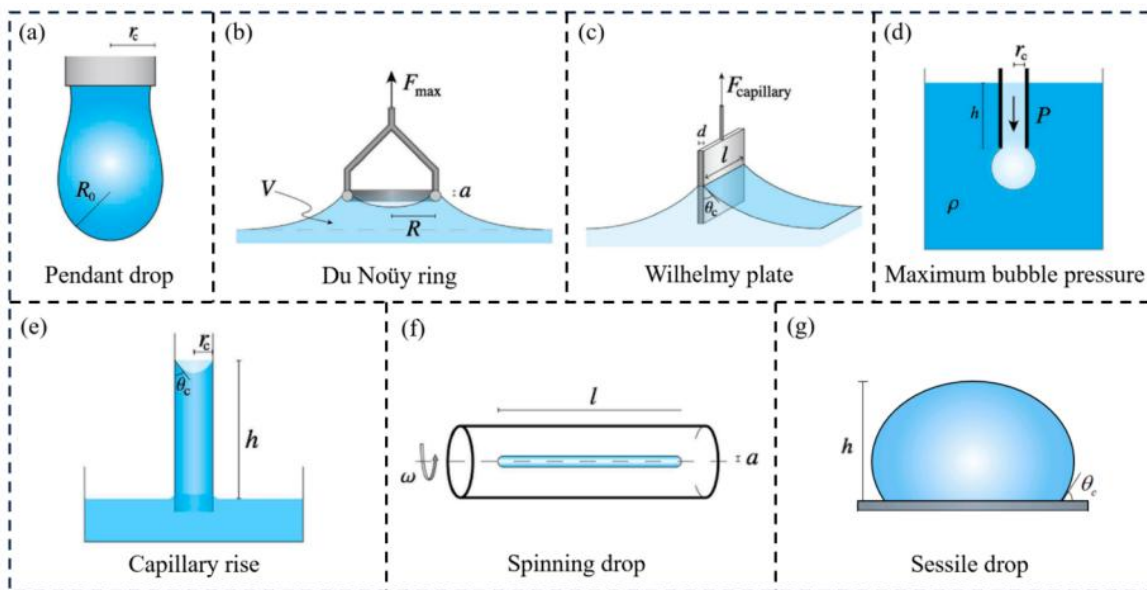


Figure I.8. Schémas des principales techniques de mesure du ST des nanofluides [168], [169]

Les travaux suivants ont exploré l'impact de divers facteurs sur la TS des nanofluides, notamment la taille des particules de graphène, la concentration en graphène, le type et la concentration des tensioactifs, ainsi que la température. Ils ont également mis en évidence l'effet de l'interaction entre les tensioactifs et les nanoparticules sur la TS [169]. Toutefois, des résultats contradictoires ont été rapportés, en particulier en ce qui concerne l'influence de la concentration en graphène. Liu et al. [170] ont mené une étude sur la tension superficielle des nanofluides contenant de l'oxyde de graphène. Les résultats ont démontré que l'incorporation de l'oxyde de graphène augmentait de manière significative la tension superficielle du fluide de base. Plus précisément, une augmentation de la concentration de l'oxyde de graphène de 0,02 % à 0,08 % en masse à entraîner une augmentation de la tension superficielle, passant de 79,1 mN/m à 80,7 mN/m. En revanche, une élévation de la température de 266,15 à 288,15 K a conduit à une diminution de la tension superficielle.

Dans une approche complémentaire, Kamatchi et al. [171] ont utilisé la dispersion ultrasonique pour préparer des nanofluides à base d'eau contenant de l'oxyde de graphène. À une concentration de 0,01 g/L de graphène, la distance interparticulaire à l'interface liquide-gaz était suffisamment grande pour que son influence sur la tension superficielle soit négligeable. Cependant, à mesure que la concentration de graphène augmentait, les particules s'accumulaient à l'interface sous l'effet des forces de van der Waals plus fortes. Cela entraînait une augmentation de l'énergie de surface, conduisant à une élévation de la tension superficielle.

Ahammed et al. [172] ont étudié l'influence de la concentration volumique et de la température sur la tension superficielle des nanofluides à base de graphène, dans une plage de températures allant de 283,15 à 363,15 K. À 323,15 K et avec une concentration volumique de 0,15 %, ils ont observé une diminution de 18,7 % de la tension superficielle du nanofluide par rapport à celle de l'eau déionisée.

Pour mieux comprendre l'effet du type de graphène sur la tension superficielle des nanofluides, Cabaleiro et al. [151] ont réalisé une étude sur l'impact du graphène et de sa fonctionnalisation. Les résultats ont montré que l'incorporation du graphène n'avait qu'une influence négligeable sur la tension superficielle, avec seulement une réduction de 3,0 % lorsque la concentration en graphène passait de 0,001 % à 0,05 % en

volume. De plus, le graphène et le graphène fonctionnalisé ont présenté des effets similaires sur la tension superficielle.

Hamze et al. [173] ont examiné la tension superficielle (TS) des nanofluides qui sont préparés en dispersant du graphène à quelques couches (FLG) dans un fluide caloporteur commercial, le Tyfocor® LS (40 :60 wt.% de propylène glycol/eau), à l'aide de trois surfactants non ioniques différents : Triton X-100, Pluronic® P-123 et la gomme arabique. Sur une plage de températures de 283,15 à 323,15 K. Les résultats montrent que la TS diminue globalement avec l'augmentation de la température (jusqu'à 12,6 % pour le fluide de base) et dépend fortement du type et de la concentration du surfactant. Par exemple, Triton X-100 entraîne une réduction de TS de 13,9 % à 283,15 K et de 5,5 % à 323,15 K, tandis que Pluronic® P-123 provoque une diminution allant de 14,8 % à 11,4 % sur la même plage de température. L'ajout de FLG a un impact variable : il est négligeable avec Pluronic® P-123 (la concentration étant supérieure à la CMC), il provoque une augmentation constante de la TS d'environ 21,5 % avec la gomme arabique, et entraîne une évolution complexe avec Triton X-100, incluant une hausse initiale de 4,9 % à faible teneur en FLG (0,05 wt.%) suivie d'une diminution aux concentrations plus élevées. Dans le cadre de l'étude de l'effet des tensioactifs sur la tension superficielle des nanofluides à base de graphène, Ilyas et al. [167] ont examiné la tension superficielle (TS) des nanofluides à base de graphène dans un système salin en utilisant le dodécylsulfate de sodium (SDS) comme tensioactif. Ils ont observé une diminution de 14,0 % de la TS de la saumure par rapport à celle de l'eau. Les résultats ont révélé des variations incohérentes dans l'évolution de la TS des nanofluides. Kujawska et al. [14] ont montré que l'ajout de concentrations réduites de SDS (0,01 g/l) entraîne une diminution de la tension superficielle des nanofluides composés d'oxyde de graphène en suspension dans l'eau.

Des recherches approfondies sur la tension superficielle (TS) des nanofluides suggèrent que les propriétés microscopiques des surfaces des nanoparticules sont à l'origine des différences observées. La TS des nanofluides est notamment influencée par l'hydrophilicité ou l'hydrophobicité des nanoparticules, ce qui modifie l'affinité du liquide pour ces particules [20], [146], [167], [174], [175]. Microscopiquement, les nanoparticules hydrophiles tendent à s'immerger dans le liquide et à interagir avec les molécules d'eau en surface, ce qui augmente la TS des nanofluides. Les liaisons chimiques formées par ces particules dans le liquide renforcent les forces cohésives intrinsèques, entraînant une attraction plus forte des molécules d'eau vers l'intérieur. Cette interaction rend le liquide plus apte à conserver sa forme, augmentant ainsi la TS. À l'inverse, les nanoparticules hydrophobes réduisent la TS des nanofluides. Elles s'adsorbent et s'agrègent à la surface du liquide, augmentant la distance entre les molécules de liquide et affaiblissant les forces d'attraction entre elles, ce qui diminue la TS. De plus, l'hydrophilicité ou l'hydrophobicité des surfaces des particules affecte leur dispersibilité dans le liquide, les nanoparticules hydrophiles étant mieux dispersées dans l'eau, ce qui exerce une influence plus marquée sur la TS.

I.3.3.6 Conductivité électrique

La recherche de matériaux présentant une haute conductivité électrique constitue un enjeu majeur pour de nombreuses applications avancées. Dans le domaine des nanofluides, bien que l'ajout de nanoparticules ait permis d'améliorer significativement la conductivité électrique, les mécanismes physiques sous-jacents restent encore partiellement compris. Deux phénomènes principaux sont généralement évoqués : l'effet de la couche double électrique et l'augmentation de la conductance par phénomènes de percolation. Par ailleurs, la conductivité électrique est également envisagée comme un indicateur potentiel de la stabilité des nanofluides, bien que cette approche nécessite encore des validations expérimentales supplémentaires [18].

Le graphène, constitué d'une monocouche d'atomes de carbone arrangés selon une structure hexagonale, se distingue par ses propriétés électroniques exceptionnelles. Grâce à la mobilité quasi-balistique de ses

électrons π délocalisés, il présente une résistivité extrêmement faible ($\sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$), inférieure à celle de l'argent, ce qui en fait le matériau massif le plus conducteur à température ambiante [18], [176]. Toutefois, malgré ces performances remarquables, le potentiel du graphène en matière d'amélioration de la conductivité électrique des nanofluides demeure encore sous-exploité.

Dans cette optique, plusieurs études de la conductivité électrique se sont attachées à évaluer l'impact de l'incorporation de nanofeuilles de graphène dans des fluides de base. Aravind et al. [177] ont étudié des nanofluides d'eau distillée et d'éthylène glycol, contenant des nanofeuilles de graphène (0,008–0,138 % vol.) entre 298,15 K et 323,15 K. Une augmentation de la conductivité électrique de 55 % pour l'eau distillée et de 190 % pour l'éthylène glycol a été observée.

Dans une approche similaire, Dey et al. [10] ont étudié des nanofluides de graphène fonctionnalisé (f-HEG) dispersé dans un mélange éthylène glycol/eau (70 :30). À 0,395 % vol. et 303,15 K, la conductivité électrique a augmenté de 8620 %, soulignant l'effet majeur du traitement chimique.

Pai ailleurs Ijam et al. [81] ont montré que l'incorporation de nanosheets d'oxyde de graphène (GONs) dans un mélange eau déionisée/éthylène glycol (60 :40) induit une augmentation non linéaire de la conductivité électrique en fonction de la concentration en GONs, tandis que l'influence de la température suit une tendance linéaire. À une concentration massique de 0,10 %, une amélioration remarquable de 1664 % a été observée à 298,15 K.

D'autres travaux confirment cette tendance. Baby et al. [66] ont ainsi mesuré une augmentation d'environ 1400 % de la conductivité électrique pour un nanofluide aqueux contenant 0,03 % vol. de graphène à 298,15 K. Hadadian et al. [178] étudié des nanofluides d'eau distillée contenant de l'oxyde de graphite stable (cristallites de 20 nm) et montré que la conductivité électrique augmentait avec la température et la fraction massique, atteignant un gain exceptionnel de 25 678 % pour seulement 0,0006 de fraction massique, supérieur à celui obtenu avec d'autres nanoparticules.

I.4 Nanofluides hybrides à base de graphène

Un nanofluide hybride est constitué de deux ou plusieurs types de nanoparticules, synthétisées et dispersées dans un fluide de base. L'amélioration du transfert de chaleur des nanofluides hybrides provient de l'effet synergique qu'ils offrent, par rapport aux nanofluides contenant une seule nanoparticule. Il est supposé que les nanofluides hybrides présentent de meilleures propriétés thermiques que le fluide de base et les nanofluides avec des nanoparticules uniques. Récemment, les chercheurs ont exploré divers nanofluides hybrides, composés de combinaisons telles que ZnO-Ag [179], MWCNT-SiO₂ [180], MWCNT-CuO [181], MWCNT-ZnO [182], MWCNT-Al₂O₃ [183], Al₂O₃-Cu [184], et Fe₃O₄-Ag [185]. Il a été observé que la conductivité thermique de ces nanofluides hybrides augmente avec la fraction volumique des nanoparticules. Ces résultats indiquent que l'incorporation de ces nanoparticules améliore les performances thermiques des systèmes [186], [187]. En complément des études numériques, plusieurs travaux empiriques ont été réalisés pour démontrer l'amélioration du transfert de chaleur [188]

Comme cela a été démontré précédemment, le graphène présente des propriétés thermophysiques remarquables, notamment une conductivité thermique extrêmement élevée, ce qui en fait un matériau particulièrement prometteur pour la formulation de nanofluides hybrides à haute efficacité. À ce titre, Yarmand et al. [149] ont synthétisé un nanocomposite hybride composé de nanoplaquettes de graphène et de platine (GNP-Pt) en utilisant une méthode chimique simple. Ils ont préparé des nanofluides en dispersant différentes concentrations pondérales de ce nanocomposite dans de l'eau distillée, en choisissant de faibles concentrations de nanoparticules pour minimiser la sédimentation. Les résultats expérimentaux ont montré que la conductivité thermique a été améliorée de 17,77 %, tandis que la viscosité a augmenté de

1,33 fois à une concentration de 0,1 % en masse et à une température de 313,15 K. kazemi et al. [141] ont examiné l'effet synergique des nanoparticules de SiO₂ et de TiO₂ combinées avec de l'oxyde de graphène (GO) lorsqu'elles sont dispersées dans de l'eau distillée, pour des concentrations allant de 0,05 % à 1,0 % en volume et des températures comprises entre 303,15 et 333,15 K. À 303,15 K et à une concentration de 1,0 % en volume, la viscosité du GO était supérieure de 32 %, 45,7 %, 111 %, et 127 % par rapport aux nanofluides GO-TiO₂, GO-SiO₂, TiO₂, et SiO₂, respectivement. Concernant la conductivité thermique, à 333,15 K et pour une concentration de 1,0 % en volume, le GO présentait une conductivité thermique supérieure de 9,8 %, 14,4 %, 29,6 %, et 35,9 % par rapport aux nanofluides GO-TiO₂, GO-SiO₂, TiO₂, et SiO₂, respectivement. Ces résultats suggèrent que les nanofluides hybrides offrent des avantages significatifs pour les applications thermiques lorsque la température de fonctionnement dépasse 318,15 K. Sundar et al. [121] ont synthétisé de nouvelles nanoparticules hybrides GO/Co₃O₄ et ont étudié leur performance dans divers fluides de base pour évaluer la conductivité thermique et la viscosité des nanofluides. Les résultats ont montré que les nanofluides à base d'eau présentent une conductivité thermique supérieure à celle des autres fluides, avec une amélioration de 19,14 % à une concentration de 0,2 % et à 333,15 K, contre 11,85 % pour les nanofluides à base d'éthylène glycol. De plus, la viscosité du nanofluide à base d'eau a augmenté de 1,70 fois, tandis que celle du nanofluide à base d'éthylène glycol a crû de 1,42 fois dans les mêmes conditions. Cette augmentation notable de la conductivité thermique des nanofluides à base d'eau est attribuée à la propriété thermique synergique des nanoparticules hybrides, bien que l'augmentation de la viscosité reste comparable à celle observée avec les nanofluides GO. Rostami et al. [189] ont évalué le rapport de conductivité thermique (TCR) du nanofluide hybride à base d'oxyde de graphène (GO) et oxyde de cuivre (CuO) dispersé dans un mélange de l'eau et l'éthylène glycol (EG) à l'aide de modélisation de réseau neuronal artificiel (Artificial Neural Network, ANN) et de méthode d'ajustement de courbe. Leur analyse a montré que ces méthodes permettent de prédire avec précision le TCR du nanofluide, avec une amélioration de 43,4 % du TCR de l'eau-EG à la fraction volumique et température maximale.

I.5 Nanofluide ferromagnétique

Un ferrofluide est une solution colloïdale stable contenant des nanoparticules magnétiques en suspension dans un fluide de base. Cependant, une différence notable réside dans la taille des nanoparticules. Les nanoparticules magnétiques ont généralement un diamètre moyen de 10 nm, avec une dispersion variant de 3 à 20 nm.

Sous l'influence d'un champ magnétique externe, les propriétés thermophysiques des ferrofluides, telles que la conductivité thermique, la viscosité et le contrôle du flux thermique, sont significativement améliorées. Cette amélioration résulte de l'interaction entre les nanoparticules et le champ magnétique, conférant au fluide une réponse directionnelle et magnétique. En l'absence de champ, les ferrofluides se comportent comme des nanofluides classiques. Cependant, l'application d'un champ magnétique provoque l'alignement des nanoparticules, ce qui permet un transfert de chaleur optimisé dans la direction du champ. Plusieurs études ont mis en évidence ces effets, Sha et al. [24,25] ont montré qu'à 313,15 K, un champ magnétique de 800 G augmentait le transfert thermique de 4,2 % en régime laminaire et de 8,1 % en régime turbulent. Sheikholeslami et al. [269] ont observé une amélioration du transfert de chaleur avec l'augmentation du nombre de Reynolds, bien que cela diminue avec le nombre de Hartmann. Esmaeili et al. [271] ont constaté une nette amélioration des performances thermiques sous champ magnétique. Bahiraei et al. [214] ont observé une augmentation de 40,8 % à 58,2 % du coefficient de transfert thermique des nanofluides Fe₃O₄ dans un canal rectangulaire sous champ magnétique. Sajjad et al. [272] ont rapporté des améliorations locales du transfert thermique de 23,4 % à 48,9 % selon la configuration magnétique.

D'autres travaux se sont penchés sur la conductivité thermique, tels que Liu et al. [190] ont étudié la conductivité thermique à des valeurs stabilisées appropriées pour différentes intensités de champ magnétique en utilisant des ferrofluides $\text{-Fe}_3\text{O}_4\text{- eau}$ et $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNT- eau}$. L'augmentation maximale de la conductivité thermique moyenne des ferrofluides $\text{eau-Fe}_3\text{O}_4$ et $\text{eau-Fe}_3\text{O}_4/\text{CNT}$ a été déterminée comme étant respectivement de 22,62 % et 24,25 % dans un champ magnétique avec une oscillation de 700 G. Xing et al. [27] ont étudié la performance du nanofluide magnétique $\text{MWCNT/Fe}_3\text{O}_4$ dans la gamme de rapport massique de 0,001 à 0,2 pour des applications de conversion d'énergie photo-thermique solaire. Ils ont constaté que l'efficacité de conversion photo-thermique augmentait jusqu'à 58 % avec l'effet de la conductivité thermique atteignant des valeurs élevées sous l'influence du champ magnétique. Cependant, la stabilité du nanofluide magnétique préparé a été déterminée par la méthode de sédimentation. L'effet ou le changement de viscosité, qui est l'une des propriétés fondamentales des fluides, n'a pas été pris en compte dans cette étude non plus. Toghraie et al. [191] ont réalisé des expériences sur la viscosité du ferrofluide $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{- eau}$ indépendamment de la conductivité thermique et de la stabilité. Ils ont étudié les effets des fractions volumétriques dopées de nanoparticules allant de 0,1 % à 3 % et des températures allant de 293,15C à 328,15 K. Les résultats ont montré que l'augmentation de la fraction volumétrique de l'additif nano entraîne une augmentation de la viscosité, tandis qu'une augmentation de la température conduit à une diminution de la viscosité.

Des recherches complémentaires ont approfondi les effets combinés de température et de concentration. Une étude expérimentale de la conductivité thermique d'un nanofluide composé d'un mélange d'éthylène glycol et d'eau avec des nanoparticules de Fe_3O_4 a été réalisée par Sundar et al. [192]. Les résultats ont montré que la conductivité thermique augmentait avec la concentration en nanoparticules et la température. À 2,0 % de nanoparticules, le nanofluide a présenté une augmentation de 46 % par rapport à d'autres fluides de base.

Karimi et al. [193] ont examiné la conductivité thermique d'un nanofluide magnétique ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{eau}$) avec et sans champ magnétique uniforme. La concentration en nanoparticules variait de 0 % à 4,8 %, et la conductivité thermique augmentait avec la concentration en particules et l'intensité du champ magnétique. De nouvelles corrélations ont été proposées pour prédire la conductivité thermique dans les deux cas, avec ou sans champ magnétique. Eshgarf et al. [194] ont étudié la viscosité et la conductivité thermique du nanofluide $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{eau}$ à des températures allant de 298,15 à 323,15 K et des fractions volumiques de 0,1, 0,2 et 0,3 %. Les résultats ont montré une augmentation maximale de la conductivité thermique de 17,3794 %, observée à une fraction volumique de 0,3 % et à une température de 323,15 K. En outre, la viscosité du nanofluide augmente systématiquement avec la fraction volumique, indépendamment de la température.

I.6 Le graphène et ses dérivés : Innovations dans les processus de transfert de chaleur

Les recherches sur les nanofluides à base de graphène révèlent des améliorations substantielles dans la gestion thermique et l'efficacité des systèmes de refroidissement, notamment dans les applications photovoltaïques et thermiques. Ces améliorations sont le résultat de l'utilisation de nanofluides qui optimisent le transfert de chaleur tout en réduisant les températures des systèmes concernés. Le tableau I.7 résume ces travaux.

Dans une étude réalisée avec un tube en acier inoxydable, Sadeghinezhad et al. [195] ont examiné le transfert de chaleur turbulent des nanofluides contenant des nanoplaquettes de graphène. Ils ont observé une augmentation du nombre de Nusselt variant de 3 à 83 %. De leur côté, Ranjbarzadeh et al. [196] ont mené des expérimentations sur des nanofluides $\text{eau/oxyde de graphène}$ pour améliorer le coefficient de transfert thermique, constatant une augmentation moyenne de 51,4 % du nombre de Nusselt ainsi qu'une hausse du

facteur de frottement. Ghozatloo et al. [127] ont étudié le comportement de transfert de chaleur par convection forcée de nanofluides de graphène dans un échangeur de chaleur de type calandre et tubes. Ils ont observé qu'une augmentation de la concentration en nanoparticules améliore la conductivité thermique ainsi que le coefficient de transfert de chaleur, avec une hausse de 23 % du nombre de Nusselt. Cette amélioration s'accompagne toutefois d'une augmentation du facteur de frottement, particulièrement notable à des températures élevées, atteignant 23,9 % dans le cas de l'eau. Arzani et al. [197] ont étudié un nouveau liquide de refroidissement à base de nanofluides GNPSDBS et GNP COOH, et ont constaté que les nanoparticules en suspension augmentaient les capacités de transfert de chaleur de 22 % à des nombres de Reynolds plus élevés.

Agarwal et al. [75] ont réalisé des expériences sur les performances thermiques d'un nanofluide composé de nanoplaquettes de graphène et de kérosène pour le refroidissement régénératif dans une chambre de poussée de fusée semi-cryogénique, révélant une amélioration de 49 % du transfert de chaleur. Esfahani et al. [198] ont constaté que les nanofluides d'oxyde de graphène, avec un coefficient de transfert thermique convectif supérieur de 0,01 % en masse, présentaient une relation minimale avec le nombre de Nusselt, le flux de chaleur et la vitesse. Arshad et al. [199] ont étudié les performances thermiques et hydrodynamiques des nanofluides de nanoplaquettes de graphène mélangées avec de l'eau distillée sur des puits de chaleur à fin intégral, observant que la température de base la plus basse et la plus grande amélioration du transfert de chaleur par convection se produisaient à 47,96 kW/m². Askari et al. [200] ont noté que l'ajout de 0,12 % d'oxyde de graphène à l'eau augmentait significativement le coefficient de transfert de chaleur par convection de 77 %, démontrant que l'oxyde de graphène dans l'eau peut améliorer l'efficacité du transfert de chaleur.

Yarmand et al. [8] ont examiné les nanofluides GNP-Ag/eau en se concentrant sur leur performance en transfert de chaleur et facteur de frottement, et ont proposé des corrélations empiriques améliorées, comme indiqué dans les Eq I.10 et Eq I.9.

$$5000 \leq Re \leq 17500 ; 0 \leq \varphi \leq 0,1\%$$

$$Nu_{Reg} = 0,0017066Re^{0.9253}Pr^{1.29001} \quad \text{Eq I.10}$$

$$f_{Reg} = 0,567322Re^{-0.285869}\varphi^{0.0271605} \quad \text{Eq I.9}$$

Askari et al. [201] ont synthétisé des nanoparticules de graphène revêtues de Fe₃O₄ pour améliorer le transfert de chaleur dans des nanofluides à base de kérosène, augmentant ainsi le coefficient de transfert de chaleur par convection de 66 % à un nombre de Reynolds de 4553.

Plusieurs recherches ont examiné l'impact de nanofluides à base de graphène sur les performances des panneaux solaires photovoltaïques [202], [203], [204], [205]. L'une de ces études a évalué comment le débit massique et la concentration du nanofluide de graphène (GNP dans l'eau) influencent l'efficacité d'un système hybride thermique solaire photovoltaïque (PV/T). Selon Venkatesh et al. [202], lorsque l'irradiation solaire était maximale et que le débit massique était de 0,075 kg/s, une augmentation de la concentration volumique de GNP de 0 à 0,3 % a permis de réduire la température du panneau de 60 °C à environ 43 °C. De plus, une augmentation du débit massique de 0,065 kg/s à 0,085 kg/s a également réduit la température maximale du panneau de 60 °C à 45 °C, avec une concentration de nanofluide fixée à 0,3 %. Par ailleurs, à la concentration maximale de 0,3 % de GNP, la puissance de sortie, la chaleur utile, le rendement électrique et le rendement PV/T ont tous augmenté avec le débit massique. Cela indique que la concentration du nanofluide influence sa conductivité thermique, ce qui affecte à son tour la température du panneau, la

production d'énergie et le rendement du système PV/T solaire. L'augmentation du débit massique améliore également le transfert de chaleur par convection, permettant une dissipation thermique plus efficace et réduisant ainsi la température du panneau. L'efficacité de refroidissement d'un nanofluide GNP a également été examinée dans des canaux microscopiques en contact avec la face arrière d'un panneau solaire photovoltaïque [205]. Selon cette étude, les résultats montrent que l'efficacité PV mesurée était moins variable avec le nanofluide GNP comparativement aux conditions sans refroidissement et au refroidissement par eau, indépendamment des débits de pompage. L'efficacité sans refroidissement a chuté de manière significative au bout de deux heures, tandis que dans le cas du refroidissement par nanofluide, la diminution de l'efficacité s'est produite sur une période plus étendue. Malgré une élévation de la température de surface, la baisse d'efficacité dans le cas du nanofluide GNP était mieux contrôlée, ce qui indique que les propriétés thermiques remarquables du nanofluide GNP permettent de maintenir une température de panneau plus stable pendant une période prolongée par rapport aux conditions sans refroidissement et au refroidissement par eau. Vakili et al. [206], [207] ont utilisé des nanofluides GNP/DI-eau dans un collecteur solaire volumétrique pour le chauffage de l'eau domestique, en variant les concentrations en masse et les débits massiques. Les résultats ont montré que l'efficacité du collecteur augmentait avec la concentration en masse du nanofluide. Les rendements maximaux observés étaient de 83,5 %, 89,7 % et 93,2 % pour des concentrations respectives de 0,0005 %, 0,001 % et 0,005 % en masse, à un débit massique de 0,015 kg/s [208]. Ces résultats indiquent que les GNPs/DI-eau possèdent une bonne capacité d'absorption et de conductivité thermique, ce qui les rend efficaces pour les systèmes solaires thermiques utilisés dans les applications résidentielles.

Tableau.I.7. Résumé des études sur le transfert de chaleur des nanofluides à base de graphène.

Travail publié	Nanofluide	Application	Résultats (performances thermiques)
Arshad et al. [199]	GNP-Eau	Panneaux solaires photovoltaïques	Température du panneau réduite de 333,15 K à 316,15K.
Alshiki et al. [203]	GNP	Panneaux solaires photovoltaïques	Le nanofluide GNP a atteint l'efficacité thermique la plus élevée par rapport au nanofluide hybride (GNP et Al ₂ O ₃) et à l'eau.
Rejeb et al. [209]	Graphène	Panneaux solaires photovoltaïques	Sous des conditions ensoleillées, la température maximale du capteur solaire photovoltaïque thermique à concentration a été inférieure de 0,6 °C à celle obtenue avec un système de refroidissement par eau.
Wahab et al. [204]	Graphène	Panneaux solaires photovoltaïques	La température de surface du panneau était inférieure de 35,8 % à celle du panneau conventionnel sans aucune technique de refroidissement.
Moh et al. [205]	GNP	Panneaux solaires photovoltaïques	L'efficacité photovoltaïque s'est maintenue pendant plus d'une heure, par rapport aux cas refroidis à l'eau et non refroidis, qui ont chuté de manière drastique au cours de la deuxième heure.

Chapitre I. Généralités et synthèse bibliographique

Alous et al. [210]	GNP	Panneaux solaires photovoltaïques	Le PV a enregistré la température la plus basse (321,45 K) et le rendement le plus élevé (14,4 %).
Ahammed et al. [161]	Graphène	Échangeur de chaleur à canaux multiples	La performance thermique et la capacité de refroidissement augmentent de 72 % par rapport au fluide de base. Le coefficient de transfert de chaleur par convection s'améliore de 88,62 % par rapport au fluide de base.
Sadeghinezhad et al. [195]	Nanoplaquettes de graphène (GNP)	Nanoplaquettes de graphène (GNP)	Étude numérique et expérimentale d'un écoulement turbulent ($Re = 5000-22,000$). Trois flux de chaleur différents (8231, 10 351 et 12 320 W/m ²). Le coefficient de transfert de chaleur par convection augmente de 13 à 160 %. La perte de charge augmente de 0,4 % à 14,6 %.
Ghozatloo et al. [127]	Nanofluides de graphène	Nanofluides de graphène	Écoulement laminaire ($Re = 1940$ et dans un flux de chaleur constant de 420,5 W). Les coefficients de transfert de chaleur locaux ont augmenté jusqu'à 27,2 %
Bahiraei et al. [211]	Nanoplaquettes de graphène (GNP)	Tube d'échangeur de chaleur	Le ruban torsadé a amélioré le facteur de performance thermique de 1,46.
Bahiraei et al. [212]	Graphène/Eau	Tube d'échangeur de chaleur	Le nombre de Nusselt augmente d'environ 40,4 %.
A. Hussien et al. [213]	MWCNTs/GNPs	Microtube circulaire à flux thermique constant	La performance thermique augmente de 58,2 %, avec une augmentation de 12,4 % de la perte de charge par rapport au fluide de base.
Bahiraei et al. [214]	Ag- Graphène	Dissipateur thermique à microcanaux	La performance thermique augmente de 17% par rapport au fluide de base.

Après avoir examiné les nanofluides à base de graphène, il est crucial d'étudier l'impact des champs magnétiques sur le transfert de chaleur et l'écoulement des nanofluides. Ceci peut s'étudier par l'expérience et par approches numériques, permettant d'optimiser les performances thermiques en prenant en compte ces paramètres.

I.7 Principes fondamentaux de la magnétohydrodynamique (MHD) appliquée à la convection et aux nanofluides

I.7.1 Principes généraux de la MHD

La magnétohydrodynamique (MHD) étudie les interactions entre le champ de vitesse et le champ magnétique en combinant l'hydrodynamique, régie par les équations de Navier-Stokes, et l'électromagnétisme, décrit par les équations de Maxwell. Cette discipline analyse le comportement des fluides conducteurs d'électricité, tels que certains liquides ou les plasmas, lorsqu'ils sont exposés à un champ électromagnétique. Les différences de vitesse des particules chargées, comme les électrons et les ions, induisent des courants électriques qui génèrent à leur tour un champ électromagnétique influençant la dynamique du fluide. Lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué, un fluide conducteur subit une force de Lorentz, modifiant ainsi son écoulement et les transferts thermiques associés. Le champ magnétique agit comme un frein visqueux, réduisant les vitesses locales et influençant les structures de convection.

Les effets MHD sont caractérisés par deux nombres sans dimension : le nombre de Hartmann (Ha), qui mesure le rapport entre la force magnétique et la force visqueuse, et le nombre de Stuart (N), qui compare la force magnétique à la force inertielle.

I.7.2 Contexte de la convection MHD

I.7.2.1 Convection naturelle, forcée et mixte

La convection naturelle résulte des mouvements d'un fluide causés par des variations locales de sa densité, généralement liées à des écarts de température ou de concentration. Ces différences de densité provoquent des variations de la poussée d'Archimède, entraînant le déplacement du fluide. À l'inverse, la convection forcée se produit lorsqu'une source externe, telle qu'une pompe, impose le mouvement du fluide, indépendamment d'un gradient de température. Enfin, la convection mixte combine les effets d'une source externe et d'un gradient thermique ou de concentration.

I.7.2.2 Influence sur le transfert de chaleur

Les nanofluides tirent parti de la conductivité thermique exceptionnelle des nanoparticules, et les champs magnétiques permettent un contrôle précis de leur mouvement et de leur alignement, favorisant ainsi le transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement. Cela trouve des applications dans le refroidissement électronique ou l'hyperthermie magnétique pour le traitement du cancer [215].

Plusieurs études mettent en évidence ces phénomènes. Ainsi, Servati et al. [216] ont analysé l'impact d'un champ magnétique vertical uniforme sur le comportement d'écoulement et le transfert thermique dans un canal partiellement rempli de matériau poreux, avec un couplage fluide-solide, en utilisant la méthode de Lattice Boltzmann (LBM). Un nanofluide Al_2O_3 -eau, dont les propriétés varient avec la température, circule dans le canal. Les résultats montrent qu'avec l'augmentation de la fraction de nanoparticules, la température et la vitesse moyennes à la sortie du canal augmentent, conduisant à une hausse significative du nombre moyen de Nusselt. Par ailleurs, une augmentation du nombre de Hartmann entraîne une légère hausse du nombre moyen de Nusselt, bien que la température et la vitesse moyennes de sortie soient légèrement réduites.

Alia et al. [217] ont étudié numériquement les effets de la radiation sur l'écoulement MHD en convection naturelle le long d'une plaque verticale, en tenant compte des effets du chauffage joule et de la génération de chaleur. Leurs simulations ont permis de détailler les profils de vitesse, les distributions de température,

les coefficients de frottement de surface et les taux de transfert de chaleur. Ils ont observé que la radiation, le chauffage joule et la génération de chaleur affectent significativement l'écoulement MHD en convection naturelle, modifiant ainsi le transfert thermique. Le paramètre magnétique, en combinaison avec les effets radiatifs, de chauffage joule et de génération de chaleur, élève la température du fluide tout en réduisant le taux de transfert de chaleur.

Aiboud-Saouli et al. [218] se sont intéressés à la production d'entropie dans un écoulement laminaire de liquide conducteur circulant entre deux plaques parallèles chauffées, sous l'effet d'un champ magnétique transverse. Leur étude montre que le taux de production d'entropie augmente en fonction des valeurs des nombres de Hartmann et de Brinkman, ainsi que du groupe sans dimension associé, en raison respectivement des effets du champ magnétique, de la conduction thermique transverse et du frottement interne du fluide.

Nakaharai et al. [219] ont mené des expériences pour évaluer l'impact d'un champ magnétique transverse sur le transfert de chaleur, à la fois local et moyen, dans un écoulement turbulent de fluide conducteur à nombre de Prandtl élevé. Ils ont analysé les mécanismes de modification du transfert thermique sous l'influence d'un champ magnétique, en s'appuyant sur les données disponibles de simulations numériques pour le champ turbulent. Les résultats indiquent que le champ magnétique transverse réduit les fluctuations de température et augmente le gradient thermique moyen près des parois dans la direction parallèle au champ magnétique, bien qu'il ne modifie pas le gradient moyen associé aux fluctuations perpendiculaires à ce champ.

Yokomine et al. [220] ont étudié les effets MHD sur des fluides comme le Flibe (solution aqueuse d'hydroxyde de potassium) et ont démontré que, sous l'influence d'un champ magnétique, l'hypothèse de traiter la température comme un scalaire passif dans les simulations numériques devient inadéquate.

I.7.3 Impacts des champs magnétiques sur le comportement des nanofluides conducteurs

L'application de la magnétohydrodynamique (MHD) aux nanofluides engendre une série de phénomènes complexes qui influencent fortement leur comportement thermofluide. Ces effets, résultant de l'interaction entre les champs magnétiques et les particules magnétiques en suspension, se traduisent par une amélioration des performances thermiques [221], un contrôle précis de l'écoulement [222], [223] et une adaptation des propriétés rhéologiques [224], [225]. Les principaux phénomènes observés incluent le mouvement et l'agrégation induits par champ magnétique, la stabilisation des suspensions colloïdales, le contrôle actif de l'écoulement, l'optimisation du transfert de masse et la modulation des propriétés rhéologiques.

I.7.3.1 Effets microstructuraux induits par le champ magnétique

I.7.3.1.1 Déplacement et agrégation des nanoparticules

Sous l'influence d'un champ magnétique externe, les nanoparticules magnétiques subissent des forces qui induisent leur déplacement, leur réorganisation spatiale, voire leur agrégation. L'intensité et l'orientation du champ, combinées aux interactions dipôle-dipôle et aux propriétés intrinsèques des particules (taille, susceptibilité magnétique), déterminent la dynamique d'agrégation [226], [227], [228]. Ce phénomène, lorsqu'il est maîtrisé, permet de moduler les configurations particulières pour des applications ciblées, telles que les matériaux à propriétés directionnelles, les capteurs ou les dispositifs à gradient fonctionnel [222], [226], [229].

I.7.3.1.2 Réactivité rhéologique aux champs magnétiques

L'introduction de nanoparticules magnétiques dans un fluide permet d'ajuster sa viscosité en réponse à un champ magnétique externe. Ce comportement, appelé magnétorhéologie, ouvre de nouvelles perspectives pour des applications telles que les systèmes de transport ciblé de médicaments, les diagnostics biomédicaux ou l'impression 3D. Des études récentes, comme celles menées par Baranwal et Deshmukh [230], se sont concentrées sur les fluides rhéologiques magnétiques (MRFT), constitués de particules ferromagnétiques de très petite taille. Sous l'effet d'un champ magnétique, ces particules s'alignent, augmentant la viscosité du fluide et modifiant son comportement rhéologique. Ce phénomène est analogue à l'organisation des globules rouges en chaînes sous un champ magnétique, permettant une circulation sanguine plus fluide. Par ailleurs, la réduction de la perte de pression en hydrodynamique magnétique (MHD), causée par la résistance électromagnétique, constitue un défi majeur en mécanique des fluides.

I.7.3.2 Influence sur la dynamique d'écoulement

Sous l'effet du couple magnétique exercé par le champ, les nanoparticules tendent à s'aligner le long des lignes de champ, formant des chaînes linéaires ou des structures ordonnées. Cet alignement induit une anisotropie marquée des propriétés thermiques, mécaniques et optiques du fluide, qui peut être exploitée pour renforcer le transfert thermique directionnel. Kabeel et al. [231] ont ainsi étudié la dynamique d'un métal liquide circulant dans un conduit rectangulaire sous l'influence d'un champ magnétique, comparant leurs simulations aux résultats expérimentaux. Après validation de leurs calculs en utilisant un dispositif magnétique identique en termes de type d'aimants, ils ont constaté que pour des nombres de Reynolds inférieurs à 2050, les modèles laminaires s'accordaient mieux aux observations que les modèles turbulents. Cependant, à des valeurs de Reynolds plus élevées, les modèles turbulents se rapprochaient davantage des données empiriques, bien qu'ils ne reproduisent pas entièrement le comportement dans toute la région étudiée. Ces résultats suggèrent que l'apparition de structures de vortex pourrait être associée à une transition entre les régimes laminaire et turbulent avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

Aoyagi et al. [222] ont exploré une méthode de réduction des pertes de pression en magnétohydrodynamique (MHD) en employant un canal multicouche avec trois surfaces. Par des approches expérimentales et numériques, ils ont examiné le comportement d'un alliage Bi-Sn dans un canal annulaire ouvert soumis à un champ magnétique allant jusqu'à 5 T, pour évaluer l'efficacité de cette technique dans la réduction des pertes de pression.

Dans une autre étude, Chen et al. [232] ont étudié l'effet de la force de Lorentz sur l'écoulement et le coefficient de portance d'un hydrofoil soumis à cette force électromagnétique, via des analyses expérimentales et numériques. Leur étude a mis en évidence que, sans la force de Lorentz, l'écoulement et la portance évoluent de manière périodique. En revanche, sous l'effet de la force de Lorentz dirigée dans le sens du flux, le point de séparation de l'écoulement se déplace vers l'arrière, stabilisant le champ d'écoulement. Bien que cette force de Lorentz augmente la pression de surface, diminuant ainsi la portance, elle a pour effet global de renforcer la portance sur la face de succion de l'hydrofoil, un effet qui croît avec l'intensité du champ magnétique. De plus, une force de Lorentz localisée appliquée à l'arrière de l'hydrofoil se révèle plus efficace pour prévenir la séparation de l'écoulement qu'une application à l'avant.

Les applications des champs magnétiques et électriques dans les fluides conducteurs entourant des objets isolants sont variées, incluant les domaines industriels, biomédicaux et microfluidiques. Haverkort et Peeters [233] ont utilisé des simulations pour étudier l'écoulement MHD autour d'une sphère isolante soumise à des champs magnétiques et électriques croisés et perpendiculaires au flux, analysant l'impact de ces champs sur le coefficient de traînée. De même, Makinde et al. [234] ont exploré l'écoulement MHD

axisymétrique d'un fluide conducteur newtonien incompressible dans un milieu poreux entre deux cylindres concentriques soumis à un champ magnétique radial. Leurs résultats montrent qu'une augmentation du gradient de pression axial amplifie la vitesse axiale du fluide, avec des applications potentielles dans le contrôle des champs magnétiques dans les systèmes de filtration à membrane, le forage pour l'énergie géothermique, les générateurs MHD et les études hydromagnétiques en géophysique.

Samulyak et al. [235] ont développé un algorithme et un logiciel numérique pour simuler les écoulements MHD à surface libre dans des conditions de faibles nombres de Reynolds magnétiques, applicables à la modélisation des liquides conducteurs et des plasmas faiblement ionisés. Dans les configurations d'écoulement à travers des canaux convergents et divergents, cruciales pour certaines applications industrielles, Sadeghy et al. [225] ont examiné l'effet des champs magnétiques sur la réduction de la séparation hydrodynamique dans les fluides viscoélastiques de type Jeffrey-Hamel. Ils ont conclu que le nombre de Reynolds, le nombre de Weissenberg, l'angle demi-canal et le nombre magnétique influencent fortement les profils de vitesse. Les champs magnétiques ont tendance à accélérer les fluides près des parois dans les canaux convergents, leur permettant de dépasser la vitesse de la ligne médiane, et à limiter la séparation dans les canaux divergents. Ils ont également observé que cet effet de réduction de la séparation devient plus prononcé avec l'augmentation de l'élasticité du fluide.

I.7.4 Domaines d'application et avancées actuelles

Yan et Ling-zhi [229] ont conçu un dispositif expérimental pour une pompe MHD fonctionnant en courant alternatif, intégrant un aimant rotatif à quatre pôles et un canal annulaire. Lorsque l'aimant est en rotation, il génère un champ magnétique allant jusqu'à 0,9 T, imitant un champ magnétique alternatif. Ce mouvement induit une force électromagnétique sur le fluide conducteur, entraînant son écoulement dans la direction de rotation. Des expériences ont permis d'analyser la performance de la pompe, révélant que le débit et la pression augmentent en fonction de l'intensité du champ magnétique, de la conductivité du fluide et de la fréquence du champ.

D'autres recherches ont mis en évidence des changements structurels notables dans l'eau liquide sous l'effet d'un champ magnétique, ce qui a des applications potentielles dans le traitement de l'eau et la biotechnologie. Chang et Weng [236] ont étudié ces effets en appliquant un champ magnétique dont l'intensité variait de 1 à 10 T, observant une légère augmentation des liaisons hydrogène dans l'eau, ce qui suggère que les clusters d'eau pourraient être modulés par un champ magnétique externe. Leur analyse de la fonction de distribution radiale a montré une amélioration de la stabilité de la structure de l'eau et une capacité accrue à former des liaisons hydrogène en présence d'un champ magnétique. Ils ont également noté que le coefficient d'auto-diffusions des molécules d'eau diminuait sous l'influence de ce champ.

Oder [237] a développé une méthode innovante pour décomposer des émulsions, qu'elles soient eau-dans-huile ou huile-dans-eau, en utilisant un champ magnétique. En intégrant un additif magnétique dans la phase interne de l'émulsion, et en employant des électroaimants ou des aimants permanents, il a facilité la coagulation de la phase interne, ce qui améliore la décomposition des émulsions. Les tests ont démontré l'efficacité de cette méthode, avec des applications potentielles dans le dessalement et la déshydratation du pétrole brut pour la séparation et la récupération d'huile à partir d'eau de mer polluée par le pétrole, reposant sur la force électromagnétique dans un système d'écoulement MHD. Leur installation comprenait un aimant supraconducteur de 10 T, une cellule de séparation MHD (canal MHD) dotée d'électrodes, un réservoir pour le mélange de particules, un réservoir de séparation et des tuyaux de connexion. Ils ont obtenu un rapport de séparation élevé, supérieur à 0,9, lorsque le champ magnétique était de 10 T.

Au cours des dernières années, l'utilisation et le développement technologique des nanomatériaux ont connu une croissance rapide, tant dans le secteur industriel qu'académique. Les propriétés physiques de ces nanomatériaux se manifestent dans des domaines tels que le transfert de chaleur, l'électricité, le magnétisme et la mécanique. Toutefois, certains problèmes majeurs liés aux suspensions, tels que la sédimentation, le colmatage, l'encrassement, l'érosion et la perte de pression importante, ont limité l'utilisation courante des suspensions de nanoparticules en tant que fluides de transfert de chaleur, rendant leur application problématique dans certaines situations. Chang et al. [228] ont étudié l'effet d'un champ magnétique supplémentaire sur la stabilité du nanofluide de CuO. Ils ont découvert qu'une exposition prolongée à un champ magnétique intense favorisait la sédimentation due à l'agrégation des nanoparticules. En revanche, la fréquence de perméabilité n'avait qu'un impact relativement faible sur la stabilité du nanofluide de CuO.

Dans le secteur pétrolier, la réduction de la viscosité du pétrole brut est essentielle pour le transport en mer via des pipelines en eaux profondes. Avec l'augmentation prévue de la production de pétrole brut lourd, il devient urgent de développer des technologies fiables pour atténuer cette viscosité. La méthode par champ magnétique se présente comme sûre et facile à appliquer, tout comme celle utilisant des champs électriques. Tao et Xu [13] ont élaboré une méthode qui utilise des impulsions de champ électrique ou magnétique pour diminuer la viscosité des huiles brutes. En particulier, ils ont constaté qu'une impulsion de champ magnétique pouvait réduire efficacement la viscosité des huiles brutes contenant des paraffines et des asphaltes pendant plusieurs heures. Une impulsion de champ électrique peut avoir un effet similaire. Cette méthode ne modifie pas la température du pétrole brut, mais elle permet d'agréger temporairement les particules de paraffine ou d'asphaltène en plus grandes particules. Cette agrégation modifie les propriétés rhéologiques du pétrole brut et contribue à la réduction de sa viscosité.

Il est bien connu que certaines propriétés des matériaux, notamment la température, tendent à augmenter lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique et diminuent lorsque celui-ci est supprimé. Cela est principalement attribué à l'influence du champ magnétique sur l'entropie et la chaleur des matériaux, phénomène connu sous le nom d'effet magnéto-calorique. Sami et Aucoin [238] ont examiné l'impact d'un champ magnétique sur de nouveaux mélanges de réfrigérants alternatifs tels que R-410A, R-507, R-407C et R-404A sous diverses conditions. Les tests ont montré qu'une augmentation de l'intensité du champ magnétique entraînait une légère hausse de la pression de tête du compresseur et de la température de décharge, tout en réduisant le bouillonnement du réfrigérant liquide dans le compresseur. Ce comportement est bénéfique pour la protection du compresseur. L'influence du champ magnétique varie en fonction de la composition du mélange et de son point d'ébullition, et son utilisation semble également améliorer le coefficient de performance (COP) du système ainsi que les capacités thermiques du condenseur et de l'évaporateur.

Le système de refroidissement utilisant l'eau de mer est essentiel pour les navires et les usines situées près de la mer, ainsi que pour les opérations dans les champs pétrolifères et les usines de dessalement. De plus, certains systèmes de refroidissement d'équipements électriques et magnétiques rotatifs sont également affectés par l'influence des champs magnétiques. Le cuivre, en raison de sa haute conductivité thermique et de ses propriétés anticorrosion et antifouling, est couramment utilisé dans les échangeurs de chaleur, les conducteurs thermiques et l'ingénierie marine. Cependant, de nombreux cas de corrosion du cuivre ont été rapportés récemment dans les systèmes de refroidissement des machines électriques, notamment des corrosions par piqûres dans les tuyaux en cuivre. Peng et al. [239] ont étudié les caractéristiques de corrosion du cuivre dans un environnement soumis à un champ magnétique, en utilisant la méthode de perte de masse, des tests électrochimiques, ainsi que la microscopie électronique à balayage (SEM) et l'analyse énergétique. Ils ont découvert que le champ magnétique influence le processus de corrosion du cuivre : au début, le taux de corrosion par écoulement diminue, mais il évolue vers une phase de corrosion plus douce à la fin. Ce

processus de corrosion dans l'eau de mer magnétisée se manifeste sous forme de piqûres, avec des surfaces d'échantillons plus endommagées dans l'eau de mer magnétisée comparativement à celles observées dans une solution de NaCl à 3,5 % ou dans l'eau de mer classique.

La complexité des phénomènes de convection magnétohydrodynamique dans les nanofluides rend difficile l'obtention de solutions analytiques. C'est pourquoi la section suivante est consacrée aux techniques de modélisation et de résolution numérique.

I.8 Technique de résolution

Les systèmes physiques complexes sont décrits par des équations aux dérivées partielles, résolues par des méthodes analytiques ou numériques. Dans les géométries compliquées, des méthodes numériques et de discrétisation sont utilisées, transformant les équations différentielles en équations algébriques pour être simulées à différentes échelles.

Le processus de la dynamique des fluides numérique (CFD) se déroule en trois phases principales :

I.8.1 Modélisation et préparation

Création de la géométrie et maillage : La première étape consiste à définir la géométrie du domaine à étudier, suivie de la création d'un maillage qui divise cette géométrie en petites cellules ou éléments. Ce maillage peut être structuré (régulier) ou non structuré (irrégulier), selon la complexité de la forme étudiée.

Établissement des conditions aux limites : Les conditions aux limites sont essentielles pour guider la simulation, car elles spécifient le comportement du fluide aux frontières du domaine. Cela peut impliquer des conditions de Dirichlet, qui imposent des valeurs fixes, ou des conditions de Neumann, qui définissent des flux constants.

I.8.2 Résolution des équations

Équations de Navier-Stokes : Les équations de Navier-Stokes, qui décrivent le mouvement des fluides, sont au cœur de la CFD. Leur résolution peut s'avérer complexe, en particulier dans des configurations géométriques compliquées ou en présence d'écoulements turbulents.

Approches numériques : Pour résoudre ces équations, plusieurs méthodes numériques peuvent être appliquées. Cela inclut des techniques comme les différences finies, les volumes finis et les éléments finis, qui transforment les équations différentielles en un système d'équations algébriques. Des solveurs numériques sont ensuite utilisés pour obtenir des solutions approximatives.

I.8.3 Post-traitement des données

Analyse et visualisation : Après avoir obtenu les résultats des simulations, il est crucial de procéder à leur analyse et à leur visualisation. Cela se fait généralement à l'aide de logiciels spécialisés qui permettent de représenter graphiquement les champs de vitesse, de pression et d'autres paramètres importants. Les utilisateurs peuvent générer des graphiques, des flux vectoriels ou des cartes de contours pour mieux appréhender le comportement du fluide dans le système.

Validation et vérification : La validation des résultats par rapport à des données expérimentales ou à des solutions analytiques est essentielle pour garantir leur précision. De plus, il est important de vérifier le modèle et les méthodes utilisées pour s'assurer que les résultats obtenus sont fiables.

Ces trois étapes forment une approche systématique pour mener des simulations en dynamique des fluides computationnelle, permettant d'analyser des phénomènes complexes grâce à des outils numériques.

Les quatre grandes familles de CFD (dynamique des fluides computationnelle) sont généralement classées selon les méthodes de résolution utilisées et les types d'écoulements qu'elles traitent. Voici un aperçu de ces familles :

Méthode des différences finies (FDM) : La FDM, une des plus anciennes méthodes de simulation numérique, est encore utilisée pour certaines applications comme la propagation d'ondes électromagnétiques ou la mécanique des fluides compressibles. Elle consiste à diviser le champ d'étude en un nombre spécifié de nœuds et à présenter la fonction recherchée dans chacun des nœuds du domaine par un développement limité en séries de Taylor, où, dans chaque nœud.

Méthode des volumes finis (FVM) : Elle transforme un problème continu en un problème discret dont la solution est approximativement la même que celle du problème continu aux points de discrétisation. Dans cette méthode, le domaine d'étude est subdivisé en volumes élémentaires, chacun entourant un nœud principal P. Elle utilise une formulation intégrale basée sur la forme forte des équations à résoudre.

Méthode des éléments finis (FEM) : Le milieu continu est idéalisé par la subdivision en un nombre fini d'éléments dont le comportement est représenté par un nombre fini de paramètres. La résolution du problème global, obtenue par assemblage des éléments, suit les règles qui régissent les structures discrètes. Cette opération consiste à diviser un domaine continu en sous-domaines. La FEM facilite la modélisation de formes géométriques complexes et irrégulières.

Méthode de Lattice Boltzmann (LBM) : Tire son origine de l'équation de Boltzmann, qui modélise le comportement dynamique d'un groupe de particules. Cette équation se présente sous la forme d'une fonction de distribution, qui caractérise la densité des particules en fonction de leur position et de leur vitesse. Contrairement aux approches traditionnelles de la dynamique des fluides computationnelle (CFD), qui se basent sur des représentations continues comme les volumes finis ou les éléments finis, la LBM divise l'espace en un réseau discret et le temps en intervalles définis. Les particules évoluent dans ce réseau selon des directions spécifiques prédéterminées.

I.9 Revue bibliographique

Après avoir exposé les concepts fondamentaux relatifs aux nanofluides — en particulier ceux à base de graphène, les ferrofluides, ainsi que les principes de la magnétohydrodynamique appliquée à la convection — nous présentons à présent une revue des travaux récents portant sur la convection MHD dans différents types de nanofluides, l'accent est mis sur les nanofluides à base de graphène, les nanofluides ferromagnétiques, ainsi que les nanofluides hybrides contenant du graphène. Les principaux résultats issus de ces études sont synthétisés dans le Tableau I.8.

Les recherches menées par Oztop et al. [240] ont montré que l'ajout de nanoparticules métalliques (Cu, Al) dans des fluides de base comme l'eau permet d'augmenter significativement la conductivité thermique, facilitant ainsi un meilleur transfert de chaleur, notamment dans les systèmes de refroidissement industriels. Ce phénomène devient particulièrement pertinent dans les systèmes de convection forcée et naturelle sous l'influence d'un champ magnétique, où les forces de Lorentz peuvent interagir avec les charges électriques du fluide pour modifier son comportement, et donc le transfert thermique. Arani et al. [241] ont exploré les effets d'un déflecteur chauffé en forme d'arc placé à l'intérieur d'une cavité carrée. Les parois horizontales de cette cavité étaient isolées, tandis que les parois verticales étaient chauffées de façon isotherme à une température inférieure à celle du déflecteur. L'étude portait sur l'utilisation de nanoparticules de cuivre (Cu)

et d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). Les résultats ont révélé que les nanoparticules de cuivre amélioraient plus significativement le transfert thermique que celles d' Al_2O_3 , en raison de la conductivité thermique supérieure du cuivre.

Bien que de nombreuses études aient exploré l'effet d'un champ magnétique sur des cavités de géométries variées, les recherches portant spécifiquement sur les nanofluides à base de graphène et sur les nanofluides hybrides, combinant le graphène avec d'autres nanoparticules, demeurent encore limitées. En revanche, l'étude des nanofluides ferromagnétiques dans des cavités soumises à un champ magnétique, telles que celles abordées dans le Tableau I.8, est largement explorée. Cependant, l'intégration du graphène dans des nanofluides hybrides dans des configurations MHD reste encore insuffisamment exploitée, malgré son potentiel d'amélioration des performances thermiques et magnétiques.

I.9.1 Convection MHD avec des nanofluides à base de graphène

Dans ce contexte, Hilali-Jaghdam [242] a montré que l'ajout de nanoparticules de graphène dans une cavité soumise à un champ magnétique permettait de réduire significativement la température moyenne du système, tout en augmentant l'efficacité thermique. Cependant, l'intensité du champ magnétique joue un rôle crucial dans les profils de vitesse et de température, pouvant soit favoriser, soit inhiber le transfert thermique, selon les conditions expérimentales.

Aich et al. [242] ont étudié une configuration tridimensionnelle avec un obstacle central en forme d'arbre dans une cavité cubique remplie de nanofluide à base de graphène-eau. L'application d'un champ magnétique horizontal ($Ha = 100$) a réduit la vitesse maximale de 82 %, tandis que le graphène induisait une augmentation de la dissipation d'entropie, passant de 74,44 % ($Ha = 0$) à 108,86 % ($Ha = 50$). Cette complexité traduit l'interaction entre les effets thermiques et hydrodynamiques dans les nanofluides graphéniques.

Sandeep et al. [243] ont analysé l'écoulement d'un film mince de nanofluide à base de graphène sur une surface extensible, en considérant un champ magnétique aligné, une source thermique non uniforme et le rayonnement. Ils ont conclu que la combinaison graphène-éthylène glycol surpassait celle avec l'eau, en raison de meilleures propriétés de stabilisation thermique et de conductivité accrue.

Pattamatta et al. [243] ont observé que le champ magnétique pouvait nuire au transfert thermique, réduisant celui-ci de 6,6 % en moyenne dans une cavité chauffée de manière différentielle, alors qu'en absence de champ, les gains pouvaient atteindre 13 %. Ces résultats soulignent l'effet ambivalent du champ magnétique sur les performances thermiques selon l'intensité et le type de fluide.

Par ailleurs, une étude menée par Jabbari [244] a examiné l'écoulement de nanofluides à base de graphène dans des canaux à parois élastiques. Son travail a révélé que la concentration en graphène influence non seulement la conductivité thermique, mais aussi la stabilité du fluide dans un système MHD. Bien que le graphène contribue à une meilleure dissipation thermique, le champ magnétique tend à ralentir l'écoulement du fluide, ce qui complexifie les dynamiques d'écoulement. Ces résultats suggèrent qu'un ajustement précis des paramètres opératoires, tels que l'intensité du champ magnétique et la concentration en graphène, est nécessaire pour optimiser les performances du système.

Janvamard et al. [245] ont mis en évidence l'impact significatif des paramètres physiques sur le transfert de chaleur dans un nanofluide hydromagnétique à base d'eau et d'oxyde de graphène. L'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et du paramètre magnétique a conduit à une diminution des profils de vitesse sans dimension, suggérant un ralentissement du flux. En revanche, une augmentation du nombre de Biot a entraîné une réduction des profils de température sans dimension et des gradients de température,

ce qui indique une diminution du transfert de chaleur au niveau des parois. De plus, l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules a amélioré le transfert thermique, en augmentant les profils de température sans dimension et la convection dans le canal. Ces résultats mettent en lumière le potentiel des nanofluides hybrides pour améliorer l'efficacité thermique, et suggèrent qu'une optimisation des paramètres pourrait permettre d'améliorer les performances des systèmes de transfert de chaleur.

Suma et al. [246] ont étudié les caractéristiques de transfert de chaleur des nanofluides à base d'eau et de graphène dans une cavité à couvercle mobile, se concentrant sur la convection mixte MHD avec un cylindre creux chauffé. Les résultats montrent que l'augmentation du nombre de Richardson (Ri) de 0,1 à 10 augmente le taux de transfert de chaleur de 41,66 %, tandis que la température moyenne diminue. Avec l'augmentation du nombre de Hartmann (Ha) de 0 à 100, le taux de transfert de chaleur diminue de 37,50 %. L'augmentation de la fraction volumique solide (δ) de 0,1 % à 5 % améliore le taux de transfert de chaleur de 22,50 %. De plus, lorsque le diamètre du cylindre (D) passe de 0,09 à 0,20, le transfert de chaleur augmente de 23,79 %, tandis que la température moyenne baisse. Enfin, le taux de transfert de chaleur est optimal à une inclinaison du champ magnétique de 80° , mais diminue au-delà de cet angle.

I.9.2 Convection MHD avec des nanofluides hybride à base de graphène

Les nanofluides hybrides, combinant le graphène avec d'autres nanoparticules (par exemple, CuO , Fe_3O_4 , Al_2O_3), suscitent un intérêt croissant pour les applications MHD, en raison de la synergie entre les propriétés thermiques du graphène et les caractéristiques magnétiques ou stabilisatrices des autres matériaux. À ce propos, Rajenderan et al. [247] ont montré que l'utilisation d'un nanofluide hybride GO–Ag améliore significativement le transfert thermique dans une enceinte carrée avec fentes thermiques. Les effets combinés du nombre de Hartmann, de Reynolds et de Richardson ont démontré l'importance du couplage des effets convectifs et magnétiques pour optimiser les performances thermiques. Telque l'augmentation du nombre de Hartmann réduit le mouvement du fluide et l'intensité des vortex, rendant la distribution de la chaleur plus uniforme. Les variations du nombre de Reynolds ont un impact important sur le transfert de chaleur, avec une amélioration notable du transfert convectif à des Reynolds plus élevés. Les nombres de Richardson sont également cruciaux, des valeurs plus élevées favorisant une convection mixte et libre, ce qui améliore le transfert thermique. Enfin, l'introduction d'une source de chaleur améliore le mouvement du fluide et la répartition thermique, tandis que l'ajout d'un puits de chaleur permet une gestion efficace des gradients de température.

Raju et al. [248] ont montré que les nanofluides hybrides à base de graphène, Al_2O_3 et H_2O présentent des propriétés thermiques distinctes par rapport aux configurations classiques. Bien que leur transfert de chaleur soit inférieur à celui des nanofluides graphène/eau ou Al_2O_3 /eau, ils offrent un avantage en termes de réduction de la friction au mur. Cette caractéristique est bénéfique pour les applications où la résistance à l'écoulement doit être minimisée. En termes de distribution de température, bien que le nanofluide hybride dépasse les fluides newtoniens, il reste moins efficace que les nanofluides à base de graphène. Malgré un transfert thermique moins performant, ses faibles niveaux de friction en font une option intéressante pour des applications thermiques nécessitant une gestion optimale de la dissipation thermique.

Jagadeeshwar et al. [221] ont explorés les effets de nanofluides hybrides constitués de graphène et d'oxyde de cuivre (CuO) dans des configurations MHD. Cette recherche a montré que l'ajout de graphène non seulement améliore le transfert thermique, mais contribue également à la stabilité du fluide en raison des synergies entre les différentes nanoparticules. Bien que le champ magnétique modifie l'écoulement du fluide, l'effet stabilisateur du graphène permet de mieux gérer les fluctuations de température et d'améliorer ainsi l'efficacité thermique globale du système.

Sadeghinezhad et al. [249] ont étudié l'effet d'un champ magnétique sur les caractéristiques de transfert de chaleur d'un nanofluide hybride à base de graphène réduit (rGO) - Fe_3O_4 sous écoulement laminaire forcé. Les mesures de conductivité thermique de l'échantillon à 0,5 % en masse ont été effectuées à l'aide d'un KD2 Pro. Les résultats des mesures ont montré que l'amélioration maximale de la conductivité thermique était de 11 % à 313,15K. Askari et al. [23] ont étudié les propriétés de transfert de chaleur du nanofluide hybride Fe_3O_4 /Graphène. Ils ont préparé des échantillons avec 0,1 %, 0,2 % et 1 % en masse avec un rapport de mélange de (79 : 21). Les mesures de conductivité thermique ont été effectuées à l'aide d'un appareil KD2 Pro. L'amélioration maximale de la conductivité thermique a été obtenue à hauteur de 32 % à 313,15 K pour l'échantillon à 1 % en masse. Ganeshan et al. [273] ont présenté une étude sur la conductivité thermique et les comportements rhéologiques des nanofluides hybrides à base de graphène oxyde (GO) décoré de Fe_3O_4 . Les échantillons avec différentes concentrations volumiques dans la plage de 0,8 % à 3,3 % ont été préparés pour les mesures. Une sonde à fil chaud a été utilisée pour les mesures de conductivité thermique. Les résultats ont indiqué que l'amélioration maximale de la conductivité thermique était d'environ 11 % pour l'échantillon à 3,3 % en volume.

Abderrahmane et al. [250] ont étudié quantitativement la convection naturelle d'un nanofluide à base de graphène/eau dans une géométrie complexe comportant diverses configurations de baffles. Les équations gouvernantes du système ont été résolues à l'aide de la méthode des éléments finis de Galerkin (GFEM). Pour la valeur la plus élevée du nombre de Rayleigh (Ra) étudiée, l'augmentation de la fraction volumétrique (φ) de 0 à 0,8 a conduit à une amélioration de 25 % du nombre moyen de Nusselt (Nu_{avg}), tandis que l'augmentation du nombre de Darcy (Da) de 10–2 à 10–5 et du nombre de Hartmann (Ha) de 0 à 100 a réduit Nu_{avg} respectivement de 57 % et 48 %. Cette amélioration des valeurs de Nu_{avg} peut être attribuée à l'accélération du mouvement du fluide à l'intérieur du compartiment.

Les résultats expérimentaux obtenus dans l'étude de Omiddezyani et al. [251] mettent en évidence l'impact significatif de l'application de champs magnétiques, tant constants qu'alternés, sur l'amélioration du transfert de chaleur des nanofluides hybrides à base de CoFe_2O_4 /GO. En l'absence de champ magnétique, l'utilisation d'un ferrofluide avec une concentration de $\varphi = 0,6$ % a permis d'améliorer le transfert de chaleur convectif de 15,2 % par rapport à l'eau déionisée à un nombre de Reynolds de 571. Cependant, l'application d'un champ magnétique constant a entraîné une augmentation de cette amélioration jusqu'à 19,7 %, et l'effet le plus marqué a été observé avec un champ magnétique alternatif, où l'augmentation du transfert de chaleur a atteint 31 %. Ces résultats soulignent non seulement l'importance du choix du type de champ magnétique, mais également l'efficacité des nanofluides hybrides contenant des nanoparticules de graphène, qui offrent un potentiel considérable pour optimiser les performances thermiques dans des applications de transfert de chaleur.

Alsangur et al. [252] ont étudié la conductivité thermique des nanofluides hybrides magnétiques Fe_3O_4 /CNT – eau et Fe_3O_4 /graphène – eau sous l'influence d'un champ magnétique. Les résultats montrent une amélioration significative de la conductivité thermique des deux nanofluides, avec des augmentations notables en fonction de la concentration massique des nanoparticules et du champ magnétique appliqué. L'application du champ magnétique, particulièrement dans la direction parallèle, entraîne des gains substantiels, atteignant jusqu'à 51 % pour le nanofluide Fe_3O_4 /graphène – eau. De plus, l'augmentation de la concentration en nanoparticules améliore davantage la conductivité thermique, notamment pour le Fe_3O_4 /graphène – eau, dont les performances sont jusqu'à trois fois supérieures à celles du Fe_3O_4 /CNT – eau. Ces résultats soulignent le potentiel des nanofluides hybrides à base de graphène et de CNT pour améliorer l'efficacité thermique, ouvrant ainsi la voie à des applications prometteuses dans la gestion thermique, notamment dans des systèmes influencés par un champ magnétique.

Les résultats de l'étude menée par Aminuddin et al. [253] révèlent une amélioration significative des propriétés thermiques et dynamiques d'un nanofluide hybride composé d'oxyde de graphène (GO) et de dioxyde de fer (Fe_2O_3) dispersé dans de l'éthylène glycol (EG). L'optimisation des paramètres du champ magnétique et de la vitesse de glissement a permis d'augmenter la vitesse du fluide de 9,7 % à 54,3 %. En

outre, l'augmentation des effets de la radiation thermique, du nombre d'Eckert et de la concentration en GO a entraîné une élévation de la température du fluide de 76,6 % à 215 %. La friction de surface a également été accrue de 13,7 % à 66,5 %. Enfin, l'amélioration du transfert thermique a atteint des niveaux impressionnants, avec des augmentations pouvant aller jusqu'à 147 %. Ces résultats soulignent le potentiel des nanofluides hybrides pour optimiser l'efficacité des systèmes thermiques, notamment dans des applications industrielles telles que les systèmes solaires.

I.10 Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'examiner les principaux aspects des nanofluides à base de graphène, notamment leurs synthèses, leurs caractérisations et leurs propriétés thermophysiques. L'analyse de la littérature révèle une variabilité notable des résultats, influencée par des paramètres tels que la fraction volumique des nanoparticules, leurs dimensions, la température, les méthodes de stabilisation et le fluide de base, soulignant ainsi la complexité du comportement des nanofluides et la nécessité d'une évaluation rigoureuse de leurs propriétés avant leur application pratique.

Bien que des améliorations significatives aient été observées dans les propriétés thermiques, rhéologiques et hydrodynamiques des nanofluides, l'absence de modèles théoriques robustes constitue un frein à leur exploitation optimale. De plus, l'analyse des effets des champs magnétiques sur la dynamique d'écoulement et le transfert thermique dans des cavités remplies de nanofluides met en évidence le besoin de recherches supplémentaires pour mieux comprendre et modéliser ces phénomènes, en particulier en ce qui concerne l'impact des géométries des cavités et des champs magnétiques.

Le chapitre suivant s'intéressera au profil thermophysique de nanofluides industriels à base de graphène et d'eau, ainsi qu'à celui des nanofluides hybrides à base de graphène-Fe₃O₄ et d'eau, en détaillant les résultats expérimentaux obtenus pour ces deux types de nanofluides.

Tableau I.8. Résumé des études sur la simulation de la convection magnétohydrodynamique naturelle et mixte des nanofluides

Référence	Type d'étude	Nanofluide	Géométrie	Nature de convection	Performances Thermiques
Ali et al. [254]	Numérique	CuO/Eau	Hexagonal incliné	Naturelle	L'amélioration du transfert de chaleur dépend fortement du paramètre de flottabilité, de la concentration volumique des nanoparticules et du nombre de Hartmann (Ha), avec une amélioration maximale atteignant 266,15 %.
Ashorynejad et al. [223]	Numérique	Cu, Al ₂ O ₃ /Eau	Carré	Naturelle	Le nombre de Nusselt moyen augmente avec toute augmentation de la concentration volumique des nanoparticules, quels que soient les cas de nombres de Rayleigh et de Hartmann.
Al-Rashed et al. [255]	Numérique	CNT/Eau	Carré	Naturelle	L'angle optimal de la force magnétique appliquée à la cavité pour atteindre le taux maximal de transfert de chaleur a été déterminé pour différentes concentrations et nombres de Rayleigh.
Kolsi et al. [256]	Numérique	CNT/Eau	Carré	Naturelle	En ajoutant des nanoparticules, le transfert de chaleur augmente de manière linéaire. Lorsque l'ailette est à un angle de 180°, le transfert de chaleur est maximisé.
Salari et al. [257]	Numérique	MWCNTs/Eau	Triangle	Naturelle	Avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, le transfert de chaleur augmente et la génération d'entropie diminue.
Rahimi et al. [258]	Numérique	CuO/Eau	Carré	Naturelle	L'ajout de nanoparticules augmente le transfert de chaleur et diminue la génération d'entropie.
Mohammadhossein et al. [259]	Numérique	Fe ₃ O ₄ /kerosene	Carré	Naturelle	Lorsque le nombre de Hartmann augmente, le nombre moyen de Nusselt diminue de manière significative. Cela peut s'expliquer par le fait que des champs magnétiques plus forts réduisent l'effet de la force de flottabilité, même si l'augmentation de la fraction volumique des solides améliore le transfert de chaleur et accroît le nombre de Nusselt.

Chapitre I. Généralités et synthèse bibliographique

Shi et al. [260]	Expérimentale	Fe ₃ O ₄ -CNT/ Eau	Rectangle	Naturelle	L'efficacité de la convection naturelle avec Fe ₃ O ₄ -CNT augmente lorsque la puissance de chauffage passe de 3,528 W à 14,364 W et de 10 % à 15 %. Les résultats montrent que l'augmentation du champ magnétique améliore le transfert de chaleur et le débit.
Kargarsharifabad [208]	Expérimentale	Cu/Eau	Carré	Naturelle	La performance de transfert de chaleur pour l'enceinte remplie de nanofluide était supérieure à celle remplie d'eau pure.
Hu et al. [261]	Numérique/ Expérimentale	Al ₂ O ₃ /Eau	Carré	Naturelle	Les résultats numériques présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux Il est observé que, pour de faibles fractions de nanoparticules, le transfert de chaleur du nanofluide dépend davantage de la conductivité thermique que de la viscosité.
Garbadeen et al. [262]	Expérimentale	MWCNT/Eau	Carré	Naturelle	Une amélioration maximale de la performance de transfert de chaleur de 45% à une concentration volumique de 0,1%
Zhou et al. [263]	Numérique	Al ₂ O ₃ /Eau	Carré	Mixte	Le nombre de Nusselt (Nu) augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules pour des nombres de Rayleigh (Ra) de 10 ⁴ et 10 ⁵ . Cependant, pour Ra = 10 ⁶ , une valeur optimale de la fraction volumique peut être trouvée, à laquelle le nombre de Nusselt est maximisé.
Mumraiz et al. [264]	Numérique	Al ₂ O ₃ + Cu/Eau	Feuille d'étirement	Mixte	L'augmentation des valeurs de Ha, Br et Re intensifie la génération d'entropie.
Hossain et al. [265]	Numérique	Al ₂ O ₃ /Eau	Enceinte ondulée	Mixte	La génération totale d'entropie (Es) diminue avec l'augmentation du nombre de Hartmann (Ha), mais (Es) augmente avec l'augmentation de la fraction volumique de nanoparticules (φ) et du nombre de Reynolds (Re).
El-Shorbagy et al. [266]	Numérique	Al ₂ O ₃ , CuO/Eau	Microéchangeur	Mixte	Les résultats ont indiqué que la dispersion d'une fraction volumique de 3 % de nanoparticules hybrides (NPs) dans de l'eau a amélioré le transfert de chaleur de 2,78 % et la génération d'entropie de 6,59 %. Comparée aux

					nanoparticules d' Al_2O_3 , la dispersion de nanoparticules de CuO a montré un effet plus important sur l'amélioration du transfert de chaleur.
Abdelhak et al. [267]	Numérique	Al_2O_3 , Ag/Eau	Carré	Mixte	L'application d'un champ magnétique peut ajuster efficacement le taux de transfert de chaleur. L'étude a révélé que la génération d'entropie s'améliore, à l'exception du troisième cas. La troisième cavité produit le plus d'entropie avec un nombre de Rayleigh plus élevé, un nombre moyen de Nusselt plus important et une production d'entropie accrue.
Sheikholeslami et al. [268]	Numérique	Ag/eau Cu/Ethylène glycol	Microéchangeur	Mixte	La couche limite de vitesse diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds et la diminution du nombre de Hartmann. Le nanofluide à base de cuivre et d'éthylène entraîne une augmentation maximale de la vitesse.
Sheikholeslami et al. [269]	Numérique	-	Microéchangeur	Mixte	Le nombre de Nusselt a une relation directe avec le nombre de Reynolds et une relation inverse avec les paramètres de rotation, magnétiques, thermo phorétiques, browniens et le nombre de Schmidt.
Sheikholeslami et al [101]	Numérique	Al_2O_3 , CuO /Eau	Microéchangeur	Mixte	Le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds et de la fraction volumique de nanoparticules, tandis qu'il diminue avec l'augmentation des paramètres d'Eckert, magnétiques et de rotation.

I.11 Références

- [1] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae et N. Hishinuma, « Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of γ -Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles) », *Netsu Bussei*, pp. 227–233, 1993, doi: 10.2963/jjtp.7.227.
- [2] S. U. S. Choi et J. Eastman, « Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles », *Int. Mech. Eng. Congr. Exhib.*, Argonne Natl. Lab., pp. 99–105, 1995.
- [3] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan et A. C. Ferrari, « Graphene photonics and optoelectronics », *Nat. Photonics*, vol. 4, no 9, pp. 611–622, 2010, doi: 10.1038/nphoton.2010.186.
- [4] T. Juntunen, H. Jussila, M. Ruoho, S. Liu, G. Hu, T. Albrow-Owen, L. W. T. Ng, R. C. T. Howe, T. Hasan, Z. Sun et I. Tittonen, « Inkjet printed large-area flexible few-layer graphene thermoelectrics », *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, 1800480, 2018, doi: 10.1002/adfm.201800480.
- [5] S. A. Hodge, D. T. L. Galhena, J. Benson, S. Li, D. Smith et M. Kemp, « Trajectory of graphene-based aerospace applications », in *Trajectory of Graphene-Based Aerospace Applications*, 2020.
- [6] Y. Wang, X. Chen, Y. Zhong, F. Zhu et K. P. Loh, « Large area, continuous, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, no 6, 063302, août 2009, doi: 10.1063/1.3204698.
- [7] J. A. Ranga Babu, K. K. Kumar et S. S. Rao, « State-of-art review on hybrid nanofluids », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 551–565, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.040.
- [8] H. Yarmand, S. Gharekhani, G. Ahmadi, S. F. S. Shirazi, S. Baradaran, E. Montazer, M. N. M. Zubir, M. S. Alehashem, S. N. Kazi et M. Dahari, « Graphene nanoplatelets–silver hybrid nanofluids for enhanced heat transfer », *Energy Conversion and Management*, pp. 419–428, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.05.023.
- [9] A. Banisharif, P. Estellé, A. Rashidi, S. Van Vaerenbergh et M. Aghajani, « Heat transfer properties of metal, metal oxides, and carbon water-based nanofluids in the ethanol condensation process », *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 126720, 2021, doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.126720.
- [10] T. K. Dey et M. Kole, « Investigation of thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity of graphene-based nanofluids », *J. Appl. Phys.*, 2013, doi: 10.1063/1.4793581.
- [11] D. Bohne, S. Fischer et E. Obermeier, « Thermal conductivity, density, viscosity, and Prandtl numbers of ethylene glycol–water mixture », *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, pp. 739–742, 1984, doi: 10.1002/bbpc.19840880813.
- [12] L. S. Sundar, K. Shusmitha, M. K. Singh et A. C. M. Sousa, « Electrical conductivity enhancement of nanodiamond–nickel (ND–Ni) nanocomposite based magnetic nanofluids », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 1–7, 2014, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.003.
- [13] R. Tao et X. Xu, « Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field », *Energy & Fuels*, pp. 2046–2051, 2006, doi: 10.1021/ef060072x.
- [14] A. Kujawska, R. Mulka, S. Hamze, G. Żyła, B. Zajaczkowski, M. H. Buschmann et P. Estellé, « The effect of boiling in a thermosyphon on surface tension and contact angle of silica and graphene oxide nanofluids », *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.127082.
- [15] A. M. Alklaibi, K. V. V. Chandra Mouli et L. S. Sundar, « Experimental investigation of heat transfer and effectiveness of employing water and ethylene glycol mixture-based Fe₃O₄ nanofluid in a shell and helical coil heat exchanger », *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 40, 101739, 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2023.101739.

- [16] S. Simpson, A. Schelfhout, C. Golden et S. Vafaei, « Nanofluid thermal conductivity and effective parameters », *Appl. Sci.*, 87, 2018, doi: 10.3390/app9010087.
- [17] M. Pavía, K. Alajami, P. Estellé, A. Desforges et B. Vigolo, « A critical review on thermal conductivity enhancement of graphene-based nanofluids », *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 294, 102452, août 2021, doi: 10.1016/j.cis.2021.102452.
- [18] A. A. Minea, « A review on electrical conductivity of nanoparticle-enhanced fluids », *Nanomaterials*, 1592, 2019, doi: 10.3390/nano9111592.
- [19] W. Chamsa-ard, S. Brundavanam, C. C. Fung, D. Fawcett et G. Poinern, « Nanofluid types, their synthesis, properties and incorporation in direct solar thermal collectors: A review », *Nanomaterials*, 131, 2017, doi: 10.3390/nano7060131.
- [20] N. Nayebpashae et S. M. M. Hadavi, « Thermal conductivity and surface tension of graphene–Al₂O₃/ethylene glycol–water hybrid nanofluid at sub-zero temperatures: an experimental study », *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 13039–13057, 2022, doi: 10.1007/s10973-022-11587-y.
- [21] Y. Li, W. Zhao et Y. Gong, « Experimental investigation on the surface tension and contact angle of Al₂O₃-oil and SiO₂-oil nanofluids », *Int. J. Nanomanufacturing*, pp. 80–91, 2019, doi: 10.1504/IJNM.2019.097241
- [22] L.-P. Zhou, B.-X. Wang, X.-F. Peng, X.-Z. Du et Y.-P. Yang, « On the specific heat capacity of CuO nanofluid », *Adv. Mech. Eng.*, 2010, doi: 10.1155/2010/172085.
- [23] « Multiphysics of multifunctional nanofluids based on different oxides nanoparticles and glycerol fluid », *Particuology*, pp. 46–62, 2023, doi: 10.1016/j.partic.2022.07.008.
- [24] X. Feng, X. Huang et X. Wang, « Thermal conductivity and secondary porosity of single anatase TiO₂ nanowire », *Nanotechnology*, 185701, 2012, doi: 10.1088/0957-4484/23/18/185701.
- [25] M. S. Mohamad, H. Zainuddin, S. A. Ghani et I. S. Chairul, « AC breakdown voltage and viscosity of palm fatty acid ester (PFAE) oil-based nanofluids », *J. Electr. Eng. Technol.*, pp. 2333–2341, 2017, doi: 10.5370/JEET.2017.12.6.2333
- [26] A. Yildiz, S. B. Lisesivdin, M. Kasap et D. Mardare, « Electrical properties of TiO₂ thin films », *J. Non-Cryst. Solids*, pp. 4944–4947, 2008, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2008.07.009.
- [27] M. Xing, C. Jia, H. Chen, R. Wang, R. Wang et L. Wang, « Enhanced solar photo-thermal conversion performance by Fe₃O₄ decorated MWCNTs ferrofluid », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2022, doi: 10.1016/j.solmat.2022.111787.
- [28] A. A. Balandin, « Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials », *Nat. Mater.*, pp. 569–581, 2011, doi: 10.1038/NMAT3064.
- [29] N. T. Tam, N. V. Phuong, P. H. Khoi, P. N. Minh, M. Afrand, P. V. Trinh, B. H. Thang, G. Żyła et P. Estellé, « Carbon nanomaterial-based nanofluids for direct thermal solar absorption », *Nanomaterials*, no 10, 1199, 2020, doi: 10.3390/nano10061199.
- [30] D. P. Hansora et S. Mishra, *Graphene Nanomaterials: Fabrication, Properties, and Applications*, Jenny Stanford Publishing, New York, 2017, doi: 10.1201/9781315364551.
- [31] Y. Zhu, S. Murali, W. Cai, X. Li, J. W. Suk, J. R. Potts et R. S. Ruoff, « Ultrahigh electron mobility in suspended graphene », *Adv. Mater.*, pp. 3906–3924, 2010, doi: 10.1002/adma.201001068.
- [32] J. Moser, A. Barreiro et A. Bachtold, « Current-induced cleaning of graphene », *Appl. Phys. Lett.*, 2007, doi: 10.1063/1.2789673.

- [33] J. Shim, D.-H. Kang, Y. Kim, H. Kum, W. Kong, S.-H. Bae, I. Almansouri, K. Lee, J.-H. Park et J. Kim, « Recent progress in van der Waals (vdW) heterojunction-based electronic and optoelectronic devices », *Carbon*, pp. 78–89, 2018, doi: 10.1016/j.carbon.2018.02.104.
- [34] A. C. Ferrari, F. Bonaccorso, V. Fal'ko, K. S. Novoselov, S. Roche, P. Bøggild, S. Borini, F. H. L. Koppens, V. Palermo, N. Pugno, J. A. Garrido, R. Sordan, A. Bianco, L. Ballerini, M. Prato, E. Lidorikis, J. Kivioja, C. Marinelli, T. Ryhänen, A. Morpurgo, J. N. Coleman, V. Nicolosi, L. Colombo, A. Fert, M. Garcia-Hernandez, A. Bachtold, G. F. Schneider, F. Guinea, C. Dekker, M. Barbone, Z. Sun, C. Galiotis, A. N. Grigorenko, G. Konstantatos, A. Kis, M. Katsnelson, L. Vandersypen, A. Loiseau, V. Morandi, D. Neumaier, E. Treossi, V. Pellegrini, M. Polini, A. Tredicucci, G. M. Williams, B. H. Hong, J.-H. Ahn, J. M. Kim, H. Zirath, B. J. van Wees, H. van der Zant, L. Occhipinti, A. Di Matteo, I. A. Kinloch, T. Seyller, E. Quesnel, X. Feng, K. Teo, N. Rupesinghe, P. Hakonen, S. R. T. Neil, Q. Tannock, T. Löfwander et J. Kinaret, « Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems », *Nanoscale*, pp. 4598–4810, 2015, doi: 10.1039/C4NR01600A.
- [35] A. Singh, A. Singh, A. Sharma et S. Arya, « Graphene and its derivatives: Synthesis and application in the electrochemical detection of analytes in sweat », *Biosensors*, 2022, doi: 10.3390/bios12100910.
- [36] H. Yu, B. Zhang, C. Bulin, R. Li et R. Xing, « High-efficient synthesis of graphene oxide based on improved Hummers method », *Sci. Rep.*, 36143, 2016, doi: 10.1038/srep36143.
- [37] A. Adetayo et D. Runsewe, « Synthesis and fabrication of graphene and graphene oxide: A review », *Open J. Composite Mater.*, pp. 207–229, 2019, doi: 10.4236/ojcm.2019.92012.
- [38] T. Liang, C. Luan, H. Chen et M. Xu, « Exploring oxygen in graphene chemical vapor deposition synthesis », *Nanoscale*, pp. 3719–3735, 2017, doi: 10.1039/C7NR00188F.
- [39] S. Pei et H.-M. Cheng, « The reduction of graphene oxide », *Carbon*, pp. 3210–3228, 2012, doi: 10.1016/j.carbon.2011.11.010.
- [40] M. C. Miao, Z. C. Liang et Y.-H. Xie, « Chemical vapor deposition of graphene », in *Physics and Applications of Graphene – Experiments*, S. Mikhailov, Ed., 2011, pp. 37–54, doi: 10.5772/15543.
- [41] M. Inagaki, F. Kang, M. Toyoda et H. Konno, *Advanced Materials Science and Engineering of Carbon*, p. 1018, 2014, doi: 10.1557/mrs.2014.271.
- [42] M. Raji, N. Zari, A. E. K. Qaiss et R. Bouhfid, « Chemical preparation and functionalization techniques of graphene and graphene oxide », Moroccan Foundation for Advanced Science, Innovation and Research (MAScIR), in *Graphene and Derivatives*, doi: 10.1016/B978-0-12-814548-7.00001-5.
- [43] X. Chen, B. Wu et Y. Liu, « Direct preparation of high-quality graphene on dielectric substrates », *Chem. Soc. Rev.*, pp. 2057–2074, 2016, doi: 10.1039/C5CS00542F.
- [44] A. J. van Bommel, J. E. Crombeen et A. van Tooren, « LEED and Auger electron observations of the SiC(0001) surface », *Surf. Sci.*, pp. 463–472, 1975, doi: 10.1016/0039-6028(75)90419-7.
- [45] C. Berger, Z. Song, T. Li, X. Li, A. Y. Ogbazghi, R. Feng, Z. Dai, A. N. Marchenkov, E. H. Conrad, P. N. First et W. A. de Heer, « Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics », *J. Phys. Chem. B*, pp. 19912–19916, 2004, doi: 10.1021/jp040650f.
- [46] Z.-Y. Juang, C.-Y. Wu, C.-W. Lo, W.-Y. Chen, C.-F. Huang, J.-C. Hwang, F.-R. Chen, K.-C. Leou et C.-H. Tsai, « Synthesis of graphene on silicon carbide substrates at low temperature », *Carbon*, vol. 47, pp. 2026–2031, 2012, doi: 10.1016/j.carbon.2009.03.051.
- [47] V. Singh, D. Joung, L. Zhai, S. Das, S. I. Khondaker et S. Seal, « Graphene based materials: Past, present and future », *Prog. Mater. Sci.*, pp. 1178–1271, 2011, doi: 10.1016/j.pmatsci.2011.03.003.
- [48] C. Soldano, A. Mahmood et E. Dujardin, « Production, properties and potential of graphene », *Carbon*, pp. 2127–2150, 2010, doi: 10.1016/j.carbon.2010.01.058.

- [49] Aafreen, P. Verma et H. Saeed, « Recent advances in the synthesis of graphene and its derivative materials », in *Chemistry of Graphene – Synthesis, Reactivity, Applications and Toxicities*, 2023, doi: 10.5772/intechopen.114280.
- [50] B. C. Brodie, « Sur le poids atomique du graphite », *Ann. Chim. Phys.*, pp. 466–472, 1860.
- [51] W. S. Hummers Jr et R. E. Offeman, « Preparation of graphitic oxide », *J. Am. Chem. Soc.*, p. 1339, 1958, doi: 10.1021/ja01539a017.
- [52] L. Staudenmaier, « Verfahren zur Darstellung der Graphitsäure », *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, pp. 1481–1487, 1898, doi: 10.1002/cber.18980310237.
- [53] M. J. Allen, V. C. Tung et R. B. Kaner, « Honeycomb carbon: A review of graphene », *Chem. Rev.*, pp. 132–145, 2010, doi: 10.1021/cr900070d.
- [54] S. Park, J. An, I. Jung, R. D. Piner, S. J. An, X. Li, A. Velamakanni et R. S. Ruoff, « Colloidal suspensions of highly reduced graphene oxide in a wide variety of organic solvents », *Nano Lett.*, pp. 1593–1597, 2009, doi: 10.1021/nl803798y.
- [55] A. A. Green et M. C. Hersam, « Emerging methods for producing monodisperse graphene dispersions », *J. Phys. Chem. Lett.*, pp. 544–549, 2010, doi: 10.1021/jz900235f.
- [56] A. A. Green et M. C. Hersam, « Solution phase production of graphene with controlled thickness via density differentiation », *Nano Lett.*, pp. 4031–4036, 2009, doi: 10.1021/nl902200b.
- [57] J. I. Paredes, S. Villar-Rodil, A. Martínez-Alonso et J. M. D. Tascón, « Graphene oxide dispersions in organic solvents », *Langmuir*, pp. 10560–10564, 2008, doi: 10.1021/la801744a.
- [58] X. Yan, X. Cui, B. Li et L.-S. Li, « Large, solution-processable graphene quantum dots as light absorbers for photovoltaics », *Nano Lett.*, pp. 1869–1873, 2010, doi: 10.1021/nl101060h.
- [59] Q.-F. Zheng, Y. Guo, Y. Liang et Q. Shen, « Graphene nanoribbons from electrostatic-force-controlled electric unzipping of single- and multi-walled carbon nanotubes », *ACS Appl. Nano Mater.*, pp. 4708–4716, 2020, doi: 10.1021/acsanm.0c00710.
- [60] Y. Zhang, C.-G. Zhou, X.-H. Yan, H.-L. Gao, K.-Z. Gao et Y. Cao, « Synthesis of Nafion-reduced graphene oxide/polyaniline as novel positive electrode additives for high performance lead–acid batteries », *Electrochim. Acta*, 143045, 2023, doi: 10.1016/j.electacta.2023.143045.
- [61] A. Arshad, M. Jabbar, Y. Yan et D. Reay, « A review on graphene based nanofluids: Preparation, characterization and applications », *J. Mol. Liq.*, pp. 444–484, 2019, doi: 10.1016/j.molliq.2019.01.153.
- [62] Z. Hajjar, A. M. Rashidi et A. Ghozatloo, « Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 128–131, 2014, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.018.
- [63] R. Sadri, M. Hosseini, S. N. Kazi, S. Bagheri, A. H. Abdelrazek, G. Ahmadi, N. Zubir, R. Ahmad et N. I. Z. Abidin, « A facile, bio-based, novel approach for synthesis of covalently functionalized graphene nanoplatelet nano-coolants toward improved thermo-physical and heat transfer properties », *J. Colloid Interface Sci.*, 2018, doi: 10.1016/j.jcis.2017.07.052.
- [64] F. Wang, L. Han, Z. Zhang, X. Fang, J. Shi et W. Ma, « Surfactant-free ionic liquid-based nanofluids with remarkable thermal conductivity enhancement at very low loading of graphene », *Nanoscale Res. Lett.*, 2012, doi: 10.1186/1556-276X-7-314.
- [65] T. T. Baby et R. Sundara, « Synthesis and transport properties of metal oxide decorated graphene dispersed nanofluids », *J. Phys. Chem. C*, pp. 8527–8533, 2011, doi: 10.1021/jp200273g.
- [66] T. T. Baby et S. Ramaprabhu, « Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nanofluids », *J. Appl. Phys.*, 2010, doi: 10.1063/1.3516289.

- [67] L. Jia, Y. Chen, S. Lei, S. Mo, X. Luo et X. Shao, « External electromagnetic field-aided freezing of CMC-modified graphene/water nanofluid », *Appl. Energy*, pp. 1670–1677, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.067.
- [68] Z. Cai, M. Tian et G. Zhang, « Experimental study on the flow and heat transfer of graphene-based lubricants in a horizontal tube », *Processes*, 2020, doi: 10.3390/pr8121675.
- [69] M. R. Esfahani et E. M. Languri, « Exergy analysis of a shell-and-tube heat exchanger using graphene oxide nanofluids », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, pp. 100–106, 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.12.004
- [70] A. M. Mirsaiedi et F. Yousef, « Viscosity, thermal conductivity and density of carbon quantum dots nanofluids: an experimental investigation and development of new correlation function and ANN modeling », *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2019, doi: 10.1007/s10973-019-09138-z.
- [71] L. Yang, W. Ji, Z. Zhang et X. Jin, « Thermal conductivity enhancement of water by adding graphene nanosheets: Consideration of particle loading and temperature effects », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 109, 104353, 2019, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104353.
- [72] W. Yu, H. Xie, X. Wang et X. Wang, « Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets », *Phys. Lett. A*, pp. 1323–1328, 2011, doi: 10.1016/j.physleta.2011.01.040.
- [73] S. S. Shazali, S. Rozali, A. Amiri, M. N. M. Zubir, M. F. M. Sabri et M. Z. Zabri, « Evaluation on stability and thermophysical performances of covalently functionalized graphene nanoplatelets with xylitol and citric acid », *Mater. Chem. Phys.*, pp. 363–371, 2018, doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.03.040.
- [74] S. Hamze, N. Berrada, D. Cabaleiro, A. Desforges, J. Ghanbaja, J. Gleize, D. Bégin, F. Michaux, T. Maré, B. Vigolo et P. Estellé, « Few-layer graphene-based nanofluids with enhanced thermal conductivity », *Nanomaterials*, vol. 10, no 7, p. 1258, 2020, doi: 10.3390/nano10071258.
- [75] D. K. Agarwal, A. Vaidyanathan et S. S. Kumar, « Experimental investigation on thermal performance of kerosene–graphene nanofluid », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2016, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2015.10.028.
- [76] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, J. Titus, J. R. Bose et S. Wongwises, « Measurement of thermal conductivity of graphene–water nanofluid at below and above ambient temperatures », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 66–74, 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.11.002.
- [77] A. Ghosatloo, A. Rashidi et M. Shariaty-Niassar, « Mehrali », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2014, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.11.018.
- [78] A. Ghosatloo, M. Shariaty-Niasar et A. M. Rashidi, « Preparation of nanofluids from functionalized graphene by new alkaline method and study on the thermal conductivity and stability », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 89–94, 2013, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.12.007.
- [79] E. K. Goharshadi, Z. Niyazi, M. Shafae, M. B. Moghaddam, R. Ludwig et M. Namayandeh-Jorabchi, « Transport properties of graphene quantum dots in glycerol and distilled water », *J. Mol. Liq.*, 2017, doi: 10.1016/j.molliq.2017.06.089.
- [80] W. Yu, H. Xie et D. Bao, « Enhanced thermal conductivities of nanofluids containing graphene oxide nanosheets », *Nanotechnology*, 2010, doi: 10.1088/0957-4484/21/5/055705.
- [81] A. Ijam, R. Saidur, P. Ganesan et A. M. Golsheikh, « Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide–deionized water/ethylene glycol based nanofluid », *Int. J. Heat Mass Transf.*, pp. 92–103, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.060.
- [82] S. Iranmanesh, M. Mehrali, E. Sadeghinezhad, B. C. Ang, H. C. Ong et A. Esmaeilzadeh, « Evaluation of viscosity and thermal conductivity of graphene nanoplatelets nanofluids through a combined

experimental-statistical approach using response surface methodology », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.10.004.

[83] J. P. Vallejo, E. Álvarez-Regueiro, D. Cabaleiro, J. Fernández-Seara, J. Fernández et L. Lugo, « Functionalized graphene nanoplatelet nanofluids based on a commercial industrial antifreeze for the thermal performance enhancement of wind turbines », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 152, pp. 113–125, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.046.

[84] H. Zhang, S. Wang, Y. Lin, M. Feng et Q. Wu, « Stability, thermal conductivity, and rheological properties of controlled reduced graphene oxide dispersed nanofluids », *Appl. Therm. Eng.*, pp. 132–139, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.064.

[85] A. Ahmadi, D. D. Ganji et F. Jafarkazemi, « Analysis of utilizing graphene nanoplatelets to enhance thermal performance of flat plate solar collectors », *Energy Conversion and Management*, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.07.061.

[86] T. Missana et A. Adell, « On the applicability of DLVO theory to the prediction of clay colloids stability », *J. Colloid Interface Sci.*, pp. 150–156, 2000, doi: 10.1006/jcis.2000.7003.

[87] W. S. Sarsam, A. Amiri, S. N. Kazi et A. Badarudin, « Stability and thermophysical properties of non-covalently functionalized graphene nanoplatelets nanofluids », *Energy Conversion and Management*, pp. 101–111, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.082.

[88] H. Radnia, A. Rashidi, A. R. Solaimany Nazar, M. M. Eskandari et M. Jalilian, « A novel nanofluid based on sulfonated graphene for enhanced oil recovery », *J. Mol. Liq.*, pp. 795–806, 2018, doi: 10.1016/j.molliq.2018.09.070.

[89] X. Li, D. Zhu et X. Wang, « Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions », *J. Colloid Interface Sci.*, pp. 456–463, 2007, doi: 10.1016/j.jcis.2007.02.067.

[90] X. Wei et L. Wang, « Synthesis and thermal conductivity of microfluidic copper nanofluids », *Particuology*, pp. 262–271, 2010, doi: 10.1016/j.partic.2010.03.001.

[91] A. Teissier, « Synthèse de matériaux à base de pentoxyde de niobium et de nanotubes de carbone pour la limitation optique dans l'infrarouge », Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 2009.

[92] S. Gal, D. Cabaleiro, W. Hassen, L. Rault, H. Ba et P. Estellé, « Surface tension of graphene/Fe₃O₄ water-based hybrid nanofluids », *J. Mol. Liq.*, 126630, 2025, doi: 10.1016/j.molliq.2024.126630.

[93] S. Gal, D. Cabaleiro, W. Hassen, A. Nasri, Y. Lafue, C. Pham-Huu, H. Ba et P. Estellé, « Thermophysical profile of industrial graphene water-based nanofluids », *Nanomaterials*, 14(17), 1401, 2024, doi: 10.3390/nano14171401.

[94] E. Natarajan et R. Sathish, « Role of nanofluids in solar water heater », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2009, doi: 10.1007/s00170-008-1876-8.

[95] X. Wang et Y. Cao, « Characterizations of absorption, scattering, and transmission of typical nanoparticles and their suspensions », *J. Ind. Eng. Chem.*, pp. 324–332, 2020, doi: 10.1016/j.jiec.2019.10.030.

[96] S. Chakraborty et P. K. Panigrahi, « Stability of nanofluid: A review », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 174, 115259, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115259.

[97] A. Hutin, « Size analysis of dispersions in liquid phase », *The Little Corner of Science: ϕ - χ* , 2022, doi: 10.5281/zenodo.6484683.

[98] M. A. Marcos, D. Cabaleiro, M. J. G. Guimarey, M. J. P. Comuñas, L. Fedele, J. Fernández et L. Lugo, « PEG 400-based phase change materials nano-enhanced with functionalized graphene nanoplatelets », *Nanomaterials*, p. 18, 2017, doi: 10.3390/nano8010016.

- [99] A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao et C. N. Lau, « Superior thermal conductivity of single-layer graphene », *Nano Lett.*, pp. 767–975, 2008, doi: 10.1021/nl0731872.
- [100] X. Xu, L. F. C. Pereira, Y. Wang, J. Wu, K. Zhang, X. Zhao, S. Bae, C. T. Bui, R. Xie, J. T. L. Thong, B. H. Hong, K. P. Loh, D. Donadio, B. Li et B. Özyilmaz, « Length-dependent thermal conductivity in suspended single-layer graphene », *Nat. Commun.*, 3689, 2014, doi: 10.1038/ncomms4689.
- [101] A. O. Borode, N. A. Ahmed, P. A. Olubambi, M. Sharifpur et J. P. Meyer, « Effect of various surfactants on the viscosity, thermal and electrical conductivity of graphene nanoplatelets nanofluid », *Int. J. Thermophys.*, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1007/s10765-021-02914-w.
- [102] L. Chen, Y. Hernandez, X. Feng et K. Müllen, « From nanographene and graphene nanoribbons to graphene sheets: Chemical synthesis », *Angew. Chem. Int. Ed.*, pp. 7640–7654, 2012, doi: 10.1002/anie.201201084.
- [103] A. A. Balandin, S. Ghosh, D. L. Nika et E. P. Pokatilov, « Thermal conduction in suspended graphene layers », *J. Nanosci. Nanotechnol.*, pp. 474–486, 2010, doi: 10.1080/1536383X.2010.487785.
- [104] J. Chen et C. Yang, « Effects of grain dimensions and edge states on the thermal conductivity of graphene ribbons », *Diamond Relat. Mater.*, 107919, 2020, doi: 10.1016/j.diamond.2020.107919.
- [105] W. Tian, W. Li, W. Yu et X. Liu, « A review on lattice defects in graphene: Types, generation, effects and regulation », *Micromachines*, 163, 2017, doi: 10.3390/mi8050163.
- [106] W. Cai, A. L. Moore, Y. Zhu, X. Li, S. Chen, L. Shi et R. S. Ruoff, « Thermal transport in suspended and supported monolayer graphene grown by chemical vapor deposition », *Nano Lett.*, pp. 1529–1970, 2010, doi: 10.1021/nl9041966.
- [107] S.-K. Chien, Y.-T. Yang et C.-K. Chen, « Influence of hydrogen functionalization on thermal conductivity of graphene: Nonequilibrium molecular dynamics simulations », *Appl. Phys. Lett.*, 033107, 2011, doi: 10.1063/1.3543622.
- [108] N. K. Cakmak, « The impact of surfactants on the stability and thermal conductivity of graphene oxide de-ionized water nanofluids », *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 1895–1902, 2020, doi: 10.1007/s10973-019-09096-6.
- [109] C. Zhang, X.-L. Hao, C.-X. Wang, N. Wei et T. Rabczuk, « Thermal conductivity of graphene nanoribbons under shear deformation: A molecular dynamics simulation », *Sci. Rep.*, 41398, 2017, doi: 10.1038/srep41398.
- [110] H. Zhu, C. Zhang, Y. Tang, J. Wang, B. Ren et Y. Yin, « Preparation and thermal conductivity of suspensions of graphite nanoparticles », *Carbon*, pp. 226–228, 2007, doi: 10.1016/j.carbon.2006.07.005.
- [111] S. Askari, A. Rashidi et H. Koolivand, « Experimental investigation on the thermal performance of ultra-stable kerosene-based MWCNTs and graphene nanofluids », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 104334, 2019, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104334.
- [112] L. Chen, J. Liu, X. Fang et Z. Zhang, « Reduced graphene oxide dispersed nanofluids with improved photo-thermal conversion performance for direct absorption solar collectors », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, pp. 125–133, 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2017.01.024.
- [113] R. Agromayor, D. Cabaleiro, A. A. Pardiñas, J. P. Vallejo, J. Fernández-Seara et L. Lugo, « Heat transfer performance of functionalized graphene nanoplatelet aqueous nanofluids », *Materials*, 455, 2016, doi: 10.3390/ma9060455.
- [114] J. Liu, F. Wang, L. Zhang, X. Fang et Z. Zhang, « Thermodynamic properties and thermal stability of ionic liquid-based nanofluids containing graphene as advanced heat transfer fluids for medium-to-high-temperature applications », *Renew. Energy*, pp. 519–523, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.10.002.

- [115] S. S. Park et N. J. Kim, « Influence of the oxidation treatment and the average particle diameter of graphene for thermal conductivity enhancement », *J. Ind. Eng. Chem.*, pp. 1911–1915, 2014, doi: 10.1016/j.jiec.2013.09.011.
- [116] M. Mehrali, E. Sadeghinezhad, S. T. Latibari, S. N. Kazi, M. Mehrali, M. N. M. Zubir et H. S. C. Metselaar, « Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets », *Nanoscale Res. Lett.*, 9, 15, 2014, doi: 10.1186/1556-276X-9-15.
- [117] K. Chu, W. Li et F. Tang, « Flatness-dependent thermal conductivity of graphene-based composites », *Phys. Lett. A*, vol. 377, no 12, pp. 910–914, 2013, doi: 10.1016/j.physleta.2013.02.009.
- [118] W. Yu, H. Xie et W. Chen, « Experimental investigation on thermal conductivity of nanofluids containing graphene oxide nanosheets », *J. Appl. Phys.*, 094317, 2010, doi: 10.1063/1.3372733.
- [119] T. T. Baby et S. Ramaprabhu, « Enhanced convective heat transfer using graphene dispersed nanofluids », *Nanoscale Res. Lett.*, 6, 289, 2011, doi: 10.1186/1556-276X-6-289.
- [120] H. Lin, Q. Jian, X. Bai, D. Li, Z. Huang, W. Huang, S. Feng et Z. Cheng, « Recent advances in thermal conductivity and thermal applications of graphene and its derivatives nanofluids », *Appl. Therm. Eng.*, 119176, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119176.
- [121] L. S. Sundar, M. K. Singh, M. C. Ferro et A. C. M. Sousa, « Experimental investigation of the thermal transport properties of graphene oxide/Co₃O₄ hybrid nanofluids », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.03.001.
- [122] Y. Gao, H. Wang, A. P. Sasmito et A. S. Mujumdar, « Measurement and modeling of thermal conductivity of graphene nanoplatelet water and ethylene glycol base nanofluids », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 123, pp. 97–109, août 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.089.
- [123] C. Selvam, D. M. Lal et S. Harish, « Thermal conductivity enhancement of ethylene glycol and water with graphene nanoplatelets », *Thermochim. Acta*, vol. 642, pp. 32–38, 2016, doi: 10.1016/j.tca.2016.09.002.
- [124] S. S. J. Aravind et S. Ramaprabhu, « Graphene wrapped multiwalled carbon nanotubes dispersed nanofluids for heat transfer applications », *J. Appl. Phys.*, 124304, 2012, doi: 10.1063/1.4769353.
- [125] A. Naddaf et S. Z. Heris, « Experimental study on thermal conductivity and electrical conductivity of diesel oil-based nanofluids of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 116–122, 2018, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.05.005.
- [126] D. P. Barai, B. A. Bhanvase et V. K. Saharan, « Reduced graphene oxide–Fe₃O₄ nanocomposite based nanofluids: Study on ultrasonic assisted synthesis, thermal conductivity, rheology, and convective heat transfer », *Ind. Eng. Chem. Res.*, pp. 8349–8369, 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.8b05733.
- [127] A. Ghozatloo, A. Rashidi et M. Shariaty-Niassar, « Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, pp. 136–141, 2014, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.11.018.
- [128] F. Sedaghat et F. Yousef, « Synthesizes, characterization, measurements and modeling thermal conductivity and viscosity of graphene quantum dots nanofluids », *J. Mol. Liq.*, pp. 299–308, 2019, doi: 10.1016/j.molliq.2019.01.073.
- [129] Y. Wang, H. A. I. Al-Saaidi, M. Kong et J. L. Alvarado, « Thermophysical performance of graphene based aqueous nanofluids », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 119, pp. 408–417, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.019.
- [130] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, Oxford, UK, 1873.
- [131] R. L. Hamilton et O. K. Crosser, « Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems », *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 1, no 3, pp. 187–191, août 1962, doi: 10.1021/i160003a005.
- [132] C.-W. Nan, « Physics of inhomogeneous inorganic materials », *Prog. Mater. Sci.*, vol. 37, no 1, pp. 1–116, 1993, doi: 10.1016/0079-6425(93)90004-5.

- [133] K. M. F. Shahil et A. A. Balandin, « Graphene–multilayer graphene nanocomposites as highly efficient thermal interface materials », *Nano Lett.*, pp. 527–1114, 2012, doi: 10.1021/nl203906r.
- [134] X. Shen, Z. Wang, Y. Wu, X. Liu, Y.-B. He et J.-K. Kim, « Multilayer graphene enables higher efficiency in improving thermal conductivities of graphene/epoxy composites », *Nano Lett.*, pp. 3409–3968, 2016, doi: 10.1021/acs.nanolett.6b00722.
- [135] S. Zhai, P. Zhang, Y. Xian, P. Yuan et D. Yang, « Modelling and analysis of effective thermal conductivity for polymer composites with sheet-like nanoparticles », *J. Mater. Sci.*, pp. 356–369, 2019, doi: 10.1007/s10853-018-2816-0.
- [136] S. Hamze, D. Cabaleiro et P. Estellé, « Graphene-based nanofluids: A comprehensive review about rheological behavior and dynamic viscosity », *J. Mol. Liq.*, pp. 1–30, 2021, doi: 10.1016/j.molliq.2020.115207.
- [137] X. Li, Y. Chen, S. Mo, L. Jia et X. Shao, « Effect of surface modification on the stability and thermal conductivity of water-based SiO₂-coated graphene nanofluid », *Thermochim. Acta*, pp. 6–10, 2014, doi: 10.1016/j.tca.2014.09.006.
- [138] N. N. Abdulla et H. A. Ibrahim, « Experimental measurements of viscosity and thermal conductivity of single layer graphene based DI-water nanofluid », *J. Eng.*, 23(4), pp. 142–161, 2017, doi: 10.31026/j.eng.2017.04.09.
- [139] R. Gómez-Villarejo, T. Aguilar, S. Hamze, P. Estellé et J. Navas, « Experimental analysis of water-based nanofluids using boron nitride nanotubes with improved thermal properties », *J. Mol. Liq.*, 2019, doi: 10.1016/j.molliq.2018.12.093.
- [140] M. B. Moghaddam, E. K. Goharshadi, M. H. Entezari et P. Nancarrow, « Preparation, characterization, and rheological properties of graphene–glycerol nanofluids », *Chem. Eng. J.*, pp. 365–372, 2013, doi: 10.1016/j.cej.2013.07.006.
- [141] I. Kazemi, M. Sefid et M. Afrand, « A novel comparative experimental study on rheological behavior of mono & hybrid nanofluids concerned graphene and silica nanopowders: Characterization, stability and viscosity measurements », *Powder Technol.*, pp. 216–229, 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2020.02.010.
- [142] J. P. Vallejo, S. Gómez-Barreiro, D. Cabaleiro, C. Gracia-Fernández, J. Fernández-Seara et L. Lugo, « Flow behaviour of suspensions of functionalized graphene nanoplatelets in propylene glycol–water mixtures », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 150–157, 2018, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.12.001.
- [143] S. Das, A. Giri, S. Samanta et S. Kanagaraj, « Role of graphene nanofluids on heat transfer enhancement in thermosyphon », *J. Sci.: Adv. Mater. Devices*, pp. 163–169, 2019, doi: 10.1016/j.jsamd.2019.01.005.
- [144] R. Ranjbarzadeh, A. Karimipour, M. Afrand, A. Homayoon, M. Isfahani et A. Shirneshan, « Empirical analysis of heat transfer and friction factor of water/graphene oxide nanofluid flow in turbulent regime through an isothermal pipe », *Appl. Therm. Eng.*, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.189.
- [145] M. A. Nazari, R. Ghasempour, M. H. Ahmadi, G. Heydarian et M. B. Shafii, « Experimental investigation of graphene oxide nanofluid on heat transfer enhancement of pulsating heat pipe », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 90–94, 2018, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.12.006.
- [146] N. Ahammed, L. G. Asirvatham et S. Wongwises, « Effect of volume concentration and temperature on viscosity and surface tension of graphene–water nanofluid for heat transfer applications », *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 1399–1409, 2016, doi: 10.1007/s10973-015-5034-x.
- [147] J. P. Vallejo, G. Żyła, J. Fernández-Seara et L. Lugo, « Rheological behaviour of functionalized graphene nanoplatelet nanofluids based on water and propylene glycol: water mixtures », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 43–53, 2018, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.10.001.

- [148] W. Ma, F. Yang, J. Shi, F. Wang, Z. Zhang et S. Wang, « Silicone based nanofluids containing functionalized graphene nanosheets », *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, pp. 120–126, 2013, doi: 10.1016/j.colsurfa.2013.04.031.
- [149] H. Yarmand, S. Gharekhani, S. F. S. Shirazi, M. Goodarzi, A. Amiri, W. S. Sarsam, M. S. Alehashem, M. Dahari et S. N. Kazi, « Study of synthesis, stability and thermo-physical properties of graphene nanoplatelet/platinum hybrid nanofluid », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 15–21, 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.07.010.
- [150] A. Amiri, M. Shanbedi et H. Dashti, « Thermophysical and rheological properties of water-based graphene quantum dots nanofluids », *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1016/j.jtice.2017.04.005.
- [151] D. Cabaleiro, P. Estellé, H. Navas, A. Desforges et B. Vigolo, « Dynamic viscosity and surface tension of stable graphene oxide and reduced graphene oxide aqueous nanofluids », *J. Nanofluids*, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1166/jon.2018.1539.
- [152] H. Akhavan-Zanjani, M. Saffar-Avval, M. Mansourkiaei, F. Sharif et M. Ahadi, « Experimental investigation of laminar forced convective heat transfer of graphene–water nanofluid inside a circular tube », *Int. J. Therm. Sci.*, pp. 316–323, 2016, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.10.003.
- [153] Y. Wang, H. A. I. Al-Saaidi, M. Kong et J. L. Alvarado, « Thermophysical performance of graphene based aqueous nanofluids », *Int. J. Heat Mass Transf.*, pp. 408–417, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.019.
- [154] R. Lakshmi et S. K. Athithan, « An empirical model for the viscosity buildup of hydroxy terminated polybutadiene based solid propellant slurry », *Polym. Compos.*, pp. 346–356, 1999, doi: 10.1002/pc.10361.
- [155] B. C. Pak et Y. I. Cho, « Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles », *Exp. Heat Transf.*, pp. 151–170, 1998, doi: 10.1080/08916159808946559.
- [156] C. Selvam, D. Mohan Lal et S. Harish, « Thermal conductivity and specific heat capacity of water–ethylene glycol mixture-based nanofluids with graphene nanoplatelets », *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 947–955, 2017, doi: 10.1007/s10973-017-6276-6.
- [157] G. Huminic et A. Huminic, « Thermophysical properties of NH₃/ionic liquid + carbon nanomaterial solutions », *Nanomaterials*, 11(10), 2612, 2021, doi: 10.3390/nano11102612.
- [158] U. Calviño, J. P. Vallejo, M. H. Buschmann, J. Fernández-Seara et L. Lugo, « Analysis of heat transfer characteristics of a GnP aqueous nanofluid through a double-tube heat exchanger », *Nanomaterials*, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/nano11040844.
- [159] D. Vasudevan, D. Senthilkumar et S. Surendhiran, « Performance and characterization studies of reduced graphene oxides aqua nanofluids for a pool boiling surface », *Int. J. Thermophys.*, 2020, doi: 10.1007/s10765-020-02651-6.
- [160] M. Mehrali, E. Sadeghinezhad, S. T. Latibari, M. Mehrali, H. Togun, M. N. M. Zubir, S. N. Kazi et H. S. C. Metselaar, « Preparation, characterization, viscosity, and thermal conductivity of nitrogen-doped graphene aqueous nanofluids », *J. Mater. Sci.*, pp. 7156–7171, 2014, doi: 10.1007/s10853-014-8424-8.
- [161] P. Kanti, A. A. Minea, K. V. Sharma et M. Revanasiddappa, « Improved thermophysical properties of graphene ionanofluid as heat transfer fluids for thermal applications », *J. Ionic Liquids*, 2(2), 100038, 2022, doi: 10.1016/j.jil.2022.100038.
- [162] F.-F. Zhang, F.-F. Zheng, X.-H. Wu, Y.-L. Yin et G. Chen, « Variations of thermophysical properties and heat transfer performance of nanoparticle-enhanced ionic liquids », *R. Soc. Open Sci.*, 2019, doi: 10.1098/rsos.182040.
- [163] R. Sharma, P. Chauhan, A. K. Sharma, A. Katiyar, H. K. Singh, M. L. Rinawa et P. M. Kumar, « Characterization of ZnO/nanofluid for improving heat transfer in thermal systems », *Mater. Today: Proc.*, vol. 62, pp. 1904–1908, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.107.

- [164] K. Elsaïda, M. A. Abdelkareem, H. M. Maghrabie, E. T. Sayed, T. Wilberforce, A. Baroutaji et A. G. Olabi, « Thermophysical properties of graphene-based nanofluids », *Int. J. Thermofluids*, 10, 100073, 2021, doi: 10.1016/j.ijft.2021.100073.
- [165] D. Cabaleiro, L. Colla, S. Barison, L. Lugo, L. Fedele et S. Bobbo, « Heat transfer capability of (ethylene glycol + water)-based nanofluids containing graphene nanoplatelets: Design and thermophysical profile », *Nanoscale Res. Lett.*, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1186/s11671-016-1806-x.
- [166] C. Selvam, T. Balaji, D. Mohan Lal et S. Harish, « Convective heat transfer coefficient and pressure drop of water–ethylene glycol mixture with graphene nanoplatelets », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2016, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.08.013.
- [167] S. U. Ilyas, S. Ridha et F. A. A. Kareem, « Dispersion stability and surface tension of SDS-stabilized saline nanofluids with graphene nanoplatelets », *Colloids Surf. A*, 2020, doi: 10.1016/j.colsurfa.2020.124584.
- [168] J. Traciak, J. Fal et G. Żyła, « 3D printed measuring device for the determination of the surface tension of nanofluids », *Appl. Surf. Sci.*, 2021, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.149878.
- [169] P. Estellé, D. Cabaleiro, G. Żyła, L. Lugo et S. M. S. Murshed, « Current trends in surface tension and wetting behavior of nanofluids », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 931–944, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.006.
- [170] Y. Liu, B. Chen, D. Wang, N. Jiang, J. Tan, J. Fu, B. Wu, Y. Hu et Z. Guo, « Surface tension of supercooled graphene oxide nanofluids measured with acoustic levitation », *J. Therm. Anal. Calorim.*, 144, pp. 1369–1377, 2020, doi: 10.1007/s10973-020-09659-y.
- [171] R. Kamatchi, S. Venkatachalapathy et B. A. Srinivas, « Synthesis, stability, transport properties, and surface wettability of reduced graphene oxide/water nanofluids », *Int. J. Therm. Sci.*, pp. 17–25, 2015, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.06.011.
- [172] N. Ahammed, L. G. Asirvatham et S. Wongwises, « Effect of volume concentration and temperature on viscosity and surface tension of graphene–water nanofluid for heat transfer applications », *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 1399–1409, 2015, doi: 10.1007/s10973-015-5034-x.
- [173] S. Hamze, D. Cabaleiro, D. Bégin, A. Desforges, T. Maré, B. Vigolo, L. Lugo et P. Estellé, « Volumetric properties and surface tension of few-layer graphene nanofluids based on a commercial heat transfer fluid », *Energies*, vol. 13, no 13, p. 3462, 2020, doi: 10.3390/en13133462.
- [174] M. Azadi, F. Hormozi, M. Sanaei-Moghadam et S. Y. Sarkandy, « The effect of SiO₂ nanoparticles and surfactant on the wetting properties of an enzyme-based nanofluid as a liquid binder in the enzyme granulation process », *Powder Technol.*, 2023, doi: 10.1016/j.powtec.2023.118671.
- [175] G. Lu, Y.-Y. Duan et X.-D. Wang, « Surface tension, viscosity, and rheology of water-based nanofluids: A microscopic interpretation on the molecular level », *J. Nanoparticle Res.*, 2014, doi: 10.1007/s11051-014-2564-2.
- [176] Q. Wu, Y. Xu, Z. Yao, A. Liu et G. Shi, « Supercapacitors based on flexible graphene/polyaniline nanofiber composite films », *ACS Nano*, pp. 1963–1970, 2010, doi: 10.1021/nn1000035.
- [177] S. S. J. Aravind et S. Ramaprabhu, « Surfactant free graphene nanosheets based nanofluids by in-situ reduction of alkaline graphite oxide suspensions », *J. Appl. Phys.*, 124326, 2011, doi: 10.1063/1.3671613.
- [178] M. Hadadian, E. K. Goharshadi et A. Youssef, « Electrical conductivity, thermal conductivity, and rheological properties of graphene oxide-based nanofluids », *J. Nanoparticle Res.*, pp. 1–17, 2014, doi: 10.1007/s11051-014-2788-1.
- [179] B. Ruhani, D. Toghraie, M. Hekmatifar et M. Hadian, « Statistical investigation for developing a new model for rheological behavior of ZnO–Ag (50%–50%)/water hybrid Newtonian nanofluid using experimental data », *Physica A*, pp. 741–751, 2019, doi: 10.1016/j.physa.2019.03.118.

- [180] M. H. Esfe, M. Afrand, W.-M. Yan, H. Yarmand, D. Toghraie et M. Dahari, « Effects of temperature and concentration on rheological behavior of MWCNTs/SiO₂(20–80)-SAE40 hybrid nano-lubricant », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 133–138, 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.015.
- [181] M. Zadkhast, D. Toghraie et A. Karimipour, « Developing a new correlation to estimate the thermal conductivity of MWCNT–CuO/water hybrid nanofluid via an experimental investigation », *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2017, doi: 10.1007/s10973-017-6213-8.
- [182] M. H. Esfe, M. Afrand, S. H. Rostamian et D. Toghraie, « Examination of rheological behavior of MWCNTs/ZnO–SAE40 hybrid nano-lubricants under various temperatures and solid volume fractions », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, pp. 384–390, 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.07.011.
- [183] A. Afshari, M. Akbari, D. Toghraie et M. E. Yazdi, « Experimental investigation of rheological behavior of the hybrid nanofluid of MWCNT–alumina/water (80%)–ethylene-glycol (20%) », *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 1001–1015, 2018, doi: 10.1007/s10973-018-7009-1.
- [184] A. Parsian et M. Akbari, « New experimental correlation for the thermal conductivity of ethylene glycol containing Al₂O₃–Cu hybrid nanoparticles », *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 1605–1613, 2017, doi: 10.1007/s10973-017-6694-5.
- [185] M. Afrand, D. Toghraie et B. Ruhani, « Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe₃O₄–Ag/EG hybrid nanofluid: An experimental study », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, pp. 38–44, 2016, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.04.007.
- [186] S. S. Harandi, A. Karimipour, M. Afrand, M. Akbari et A. D’Orazio, « An experimental study on thermal conductivity of F-MWCNTs–Fe₃O₄/EG hybrid nanofluid: Effects of temperature and concentration », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 171–177, 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.029.
- [187] J. Sarkar, P. Ghosh et A. Adil, « A review on hybrid nanofluids: Recent research, development and applications », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 164–177, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.023.
- [188] C. Qi, T. Luo, M. Liu, F. Fan et Y. Yan, « Experimental study on the flow and heat transfer characteristics of nanofluids in double-tube heat exchangers based on thermal efficiency assessment », *Energy Conversion and Management*, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111877.
- [189] S. Rostami, A. A. Nadooshan et A. Raisi, « An experimental study on the thermal conductivity of new antifreeze containing copper oxide and graphene oxide nano-additives », *Powder Technol.*, pp. 658–667, 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2019.01.055.
- [190] W. I. Liu, J. Alsarraf, A. Shahsavari, M. Rostamzadeh, M. Afrand et T. K. Nguyen, « Impact of oscillating magnetic field on the thermal conductivity of water–Fe₃O₄ and water–Fe₃O₄/CNT ferro-fluids: Experimental study », *J. Magn. Magn. Mater.*, pp. 258–265, 2019, doi: 10.1016/j.jmmm.2019.04.042.
- [191] D. Toghraie, S. M. Alempour et M. Afrand, « Experimental determination of viscosity of water based magnetite nanofluid for application in heating and cooling systems », *J. Magn. Magn. Mater.*, pp. 243–248, 2016, doi: 10.1016/j.jmmm.2016.05.092.
- [192] L. S. Sundar, M. K. Singh et A. C. M. Sousa, « Thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based Fe₃O₄ nanofluid », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 17–24, 2013, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.08.026.
- [193] A. Karimi, S. S. S. Afghahi, H. Shariatmadar et M. Ashjaee, « Experimental investigation on thermal conductivity of MFe₂O₄ (M = Fe and Co) magnetic nanofluids under influence of magnetic field », *Thermochim. Acta*, pp. 59–67, 2014, doi: 10.1016/j.tca.2014.10.022.
- [194] H. Eshgarf, A. A. Nadooshan, A. Raisi et M. Afrand, « Experimental examination of the properties of Fe₃O₄/water nanofluid, and an estimation of a correlation using an artificial neural network », *J. Mol. Liq.*, 121150, 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2022.121150.
- [195] E. Sadeghinezhad, H. Togun, M. Mehrali, P. S. Nejad, S. T. Latibari, T. Abdulrazzaq, S. N. Kazi et H. S. C. Metselaar, « An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for

graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions », *Int. J. Heat Mass Transf.*, pp. 41–51, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.006.

[196] R. Ranjbarzadeh, A. H. M. Isfahani, M. Afrand, A. Karimipour et M. Hojaji, « An experimental study on heat transfer and pressure drop of water/graphene oxide nanofluid in a copper tube under air cross-flow: Applicable as a heat exchanger », *Appl. Therm. Eng.*, pp. 69–79, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.110.

[197] H. K. Arzani, A. Amiri, S. N. Kazi, B. T. Chew et A. Badarudin, « Experimental and numerical investigation of thermophysical properties, heat transfer and pressure drop of covalent and noncovalent functionalized graphene nanoplatelet-based water nanofluids in an annular heat exchanger », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 267–275, 2015, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.09.007.

[198] M. R. Esfahani, M. R. Nunna, E. M. Languri, K. Nawaz et G. Cunningham, « Experimental study on heat transfer and pressure drop of in-house synthesized graphene oxide nanofluids », *Heat Transf. Eng.*, pp. 1722–1735, 2019, doi: 10.1080/01457632.2018.1497001.

[199] W. Arshad et H. Ali, « Graphene nanoplatelets nanofluids thermal and hydrodynamic performance on integral fin heat sink », *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.127.

[200] S. Askari, H. Koolivand, M. Pourkhalil, R. Lotfi et A. Rashidi, « Investigation of Fe₃O₄/graphene nanohybrid heat transfer properties: Experimental approach », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 30–39, 2017, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.06.012.

[201] S. Askari, R. Lotfi, A. M. Rashidi, H. Koolivand et M. Koolivand-Salooki, « Rheological and thermophysical properties of ultrastable kerosene-based Fe₃O₄/graphene nanofluids for energy conservation », *Energy Conversion and Management*, pp. 134–144, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.09.037.

[202] T. Venkatesh, S. Manikandan, C. Selvam et S. Harish, « Performance enhancement of hybrid solar PV/T system with graphene based nanofluids », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 27, 105794, 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105794.

[203] O. Alshikhi et M. Kayfeci, « Experimental investigation of using graphene nanoplatelets and hybrid nanofluid as coolant in photovoltaic thermal systems », *Thermal Sci.*, pp. 195–208, 2022, doi: 10.2298/TSCI200524348A.

[204] A. Wahab, M. A. Z. Khan et A. Hassan, « Impact of graphene nanofluid and phase change material on hybrid photovoltaic thermal system: Exergy analysis », *J. Clean. Prod.*, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123370.

[205] T. S. Y. Moh, T. W. Ting et A. H. Y. Lau, « Graphene nanoparticles (GNP) nanofluids as key cooling media on a flat solar panel through micro-sized channels », *Energy Rep.*, pp. 282–286, 2019, doi: 10.1016/j.egyr.2019.11.075.

[206] M. Vakili, S. Hosseinalipour, S. Delfani, S. Khosrojerdi et M. Karami, « Experimental investigation of graphene nanoplatelets nanofluid-based volumetric solar collector for domestic hot water systems », *Sol. Energy*, pp. 119–130, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.02.034.

[207] M. Vakili, S. Hosseinalipour, S. Delfani et S. Khosrojerdi, « Photothermal properties of graphene nanoplatelets nanofluid for low-temperature direct absorption solar collectors », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, pp. 187–191, 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.01.038.

[208] H. Kargarsharifabad, « Experimental and numerical study of natural convection of Cu–water nanofluid in a cubic enclosure under constant and alternating magnetic fields », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 104957, 2020, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104957.

[209] O. Rejeb, S. Shittu, G. Li, C. Ghenai, X. Zhao, C. Ménézo, A. Jemni, M. H. Jomaa et M. Bettaye, « Comparative investigation of concentrated photovoltaic thermal-thermoelectric with nanofluid cooling », *Energy Conversion and Management*, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.113968.

- [210] S. Alous, M. Kayfeci et A. Uysal, « Experimental investigations of using MWCNTs and graphene nanoplatelets water-based nanofluids as coolants in PVT systems », *Appl. Therm. Eng.*, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114265.
- [211] M. Bahiraei, N. Mazaheri et H. Moayedi, « Entropy generation and exergy destruction for flow of a biologically functionalized graphene nanoplatelets nanofluid within tube enhanced with a novel rotary coaxial cross double-twisted tape », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2020, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104546.
- [212] M. Bahiraei, Z. Rahimi et F. Nazari, « A combined multi-criterion optimization to determine optimum geometrical parameters for flow of an ecofriendly graphene-based nanofluid inside tube enhanced with twisted conical strip inserts », *Powder Technol.*, pp. 336–349, 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2020.08.044.
- [213] A. A. Hussien, M. Z. Abdullah, N. Md Yusop, M. A. Al-Nimr, M. A. Atieh et M. Mehrali, « Experiment on forced convective heat transfer enhancement using MWCNTs/GNPs hybrid nanofluid and mini-tube », *Int. J. Heat Mass Transf.*, pp. 1121–1131, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.120.
- [214] M. Bahiraei, M. Jamshidmofid et M. Goodarzi, « Efficacy of a hybrid nanofluid in a new microchannel heat sink equipped with both secondary channels and ribs », *J. Mol. Liq.*, pp. 88–98, 2019, doi: 10.1016/j.molliq.2018.10.003.
- [215] W. Yu et H. Xie, « A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications », *J. Nanomater.*, vol. 2012, 435873, 2012, doi: 10.1155/2012/435873.
- [216] A. A. Servati V, K. Javaherdeh et H. R. Ashorynejad, « Magnetic field effects on force convection flow of a nanofluid in a channel partially filled with porous media using Lattice Boltzmann Method », *Adv. Powder Technol.*, pp. 666–675, 2014, doi: 10.1016/j.appt.2013.10.012.
- [217] M. M. Alia, A. A. Mamun, M. A. Maleque et N. H. M. A. Azim, « Radiation effects on MHD free convection flow along vertical flat plate in presence of Joule heating and heat generation », *Procedia Eng.*, pp. 503–509, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.153.
- [218] S. Aïboud-Saouli, N. Settou, S. Saouli et N. Meza, « Second-law analysis of laminar fluid flow in a heated channel with hydromagnetic and viscous dissipation effects », *Appl. Energy*, pp. 279–289, 2007, doi: 10.1016/j.apenergy.2006.07.007.
- [219] H. Nakaharai, J. Takeuchi, T. Yokomine, T. Kunugi, S. Satake, N. B. Morley et M. A. Abdou, « The influence of a magnetic field on turbulent heat transfer of a high Prandtl number fluid », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, pp. 23–28, 2007, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2007.01.001.
- [220] T. Yokomine, J. Takeuchi, H. Nakaharai, S. Satake, T. Kunugi, N. B. Morley et M. A. Abdou, « Experimental investigation of turbulent heat transfer of high Prandtl number fluid flow under strong magnetic field », *Fusion Sci. Technol.*, pp. 625–629, 2007, doi: 10.13182/FST07-A1558.
- [221] P. Jagadeeshwar et P. D. R. Susmitha, « MHD and viscous dissipation effects due to graphene based nanofluid flow in concentric cylinders », in *8th Thermal and Fluids Engineering Conference*, pp. 1435–1444, 2023, doi: 10.1615/TFEC2023.fnd.046059.
- [222] M. Aoyagi, S. Ito, H. Hashizume et T. Muroga, « MHD pressure drop characteristics in a three-surface-multi-layered channel under a strong magnetic field », *Fusion Eng. Des.*, pp. 1181–1184, 2010, doi: 10.1016/j.fusengdes.2010.02.036.
- [223] H. R. Ashorynejad et A. Shahriari, « MHD natural convection of hybrid nanofluid in an open wavy cavity », *Results Phys.*, pp. 440–455, 2018, doi: 10.1016/j.rinp.2018.02.045.
- [224] R. Ellahi, « The effects of MHD and temperature dependent viscosity on the flow of a non-Newtonian nanofluid in a pipe: Analytical solution », *Appl. Math. Model.*, 37, pp. 1451–1467, 2013, doi: 10.1016/j.apm.2012.04.004.
- [225] K. Sadeghy, N. Khabazi et S.-M. Taghavi, « Magnetohydrodynamic (MHD) flows of viscoelastic fluids in converging/diverging channels », *Int. J. Eng. Sci.*, pp. 923–938, 2007, doi: 10.1016/j.ijengsci.2007.05.007.

- [226] P. Kreissl, C. Holm et R. Weeber, « Frequency-dependent magnetic susceptibility of magnetic nanoparticles in a polymer solution: A simulation study », *Soft Matter*, pp. 174–183, 2021, doi: 10.1039/D0SM01554G.
- [227] A. Z. Abbasi, L. Gutiérrez, L. L. del Mercato, F. Herranz, O. Chubykalo-Fesenko, S. Veintemillas-Verdaguer, W. J. Parak, M. P. Morales, J. M. González, A. Hernando et P. de la Presa, « Magnetic capsules for NMR imaging: Effect of magnetic nanoparticles spatial distribution and aggregation », *J. Phys. Chem. C*, pp. 6257–6264, 2011, doi: 10.1021/jp1118234.
- [228] H. Chang, T.-T. Tsung, C.-R. Lin, H.-M. Lin, C.-K. Lin, C.-H. Lo et H.-T. Su, « A study of magnetic field effect on nanofluid stability of CuO », *Mater. Trans.*, 45, pp. 1375–1378, 2004, doi: 10.2320/matertrans.45.1375.
- [229] Y. Peng, L.-Z. Zhao, S.-J. Song, C.-W. Sha, R. Li et Y.-Y. Xu, « Experimental study on alternating magnetic field magnetohydrodynamic pump », *J. Hydrodyn.*, pp. 591–595, 2008, doi: 10.1016/S1001-6058(08)60099-2.
- [230] D. Baranwal et T. S. Deshmukh, « MR-fluid technology and its application – A review », in *Proc. Int. Conf. (MR-Fluid Technology)*, pp. 563–569, 2012.
- [231] A. E. Kabeel, E. M. S. El-Said et S. A. Dafea, « A review of magnetic field effects on flow and heat transfer in liquids: Present status and future potential for studies and applications », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 830–837, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.029.
- [232] Y. Chen, B. Fan, Z. Chen et H. Li, « Flow pattern and lift evolution of hydrofoil with control of electro-magnetic forces », *Sci. China Ser. G: Phys. Mech. Astron.*, pp. 1364–1374, 2009, doi: 10.1007/s11433-009-0172-4.
- [233] J. W. Haverkort et T. W. J. Peeters, « Magnetohydrodynamics of insulating spheres », *Magnetohydrodynamics*, pp. 111–126, 2009.
- [234] O. D. Makinde, O. A. Bég et H. S. Takhar, « Magnetohydrodynamic viscous flow in a rotating porous medium cylindrical annulus with an applied radial magnetic field », *Appl. Math. Mech.*, pp. 68–81, 2009.
- [235] R. Samulyak, J. Du, J. Glimm et Z. Xu, « A numerical algorithm for MHD of free surface flows at low magnetic Reynolds numbers », *J. Comput. Phys.*, 226(2), pp. 1532–1549, 2007, doi: 10.1016/j.jcp.2007.06.005.
- [236] K.-T. Chang et C.-I. Weng, « The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation », *J. Appl. Phys.*, 2006, doi: 10.1063/1.2335971.
- [237] O. R. R. Oder, « Emulsions breaking with magnetic fields », in *Proc. 18th Annual Conf.*, American Filtration Society, Atlanta, 2005.
- [238] S. M. Sami et S. Aucoin, « Effect of magnetic field on the performance of new refrigerant mixtures », *Int. J. Energy Res.*, pp. 203–214, 2003, doi: 10.1002/er.868.
- [239] Z. Peng, G. Bin, J. Yong-Ping et C. Shu-Kang, « Corrosion characteristics of copper in magnetized seawater », *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, pp. 189–193, 2007.
- [240] A. Chattopadhyay, R. Malo, H. F. Öztöp, S. K. Pandit et K. D. Goswami, « Simulation of magneto mixed convective flow and thermal behavior of hybrid nanofluid in a partially heated wavy cavity », *J. Magn. Magn. Mater.*, 170713, 2023, doi: 10.1016/j.jmmm.2023.170713.
- [241] A. A. Abbasian Arani et E. Roohi, « Natural convection in a nanofluid-filled square cavity with an arc-shaped heated baffle », *Comput. Therm. Sci.*, pp. 159–168, 2012, doi: 10.1615/ComputThermalScien.2012004055.
- [242] W. Aich, I. Hilali-Jaghdam, A. Alshahrani, C. Maatki, B. M. Alshammari et L. Kolsi, « Control of three-dimensional natural convection of graphene–water nanofluids using symmetrical tree-shaped obstacle and external magnetic field », *Symmetry*, 16, 692, 2024, doi: 10.3390/sym16060692.

- [243] N. Sandeep, « Effect of aligned magnetic field on liquid thin film flow of magnetic-nanofluids embedded with graphene nanoparticles », *Adv. Powder Technol.*, pp. 865–875, 2017, doi: 10.1016/j.appt.2016.12.012.
- [244] D. Jabbari et M. Sahebi, « Semi-analytical solution of MHD free convective flow of a nanofluid over an exponentially stretching porous sheet in the presence of heat source/sink », *Results Phys.*, 107829, 2024, doi: 10.1016/j.rinp.2024.107829.
- [245] M. Javanmard, M. H. Taheri, M. Abbasi et S. M. Ebrahimi, « Heat transfer analysis of hydromagnetic water–graphene oxide nanofluid flow in the channel with asymmetric forced convection on walls », *Chem. Eng. Res. Des.*, pp. 816–824, 2018, doi: 10.1016/j.cherd.2018.06.041.
- [246] U. K. Suma, M. M. Billah, A. R. Khan et K. E. Hoque, « Magnetohydrodynamic mixed convective heat transfer augmentation in a rectangular lid-driven enclosure with a circular hollow cylinder utilizing nanofluids », *Int. J. Thermofluids*, 101014, 2025, doi: 10.1016/j.ijft.2024.101014.
- [247] E. Rajenderan et R. Prasad, « Numerical study of magneto convective Ag (silver)–graphene oxide (GO) hybrid nanofluid in a square enclosure with hot and cold slits and internal heat generation/absorption », *Sci. Rep.*, 14, 24868, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-76233-z.
- [248] C. S. K. Raju, S. M. Upadhyaya et D. Seth, « Thermal convective conditions on MHD radiated flow with suspended hybrid nanoparticles », *Microsyst. Technol.*, pp. 1933–1942, 2020, doi: 10.1007/s00542-020-04971-1.
- [249] E. Sadeghinezhad, M. Mehrali, A. R. Akhiani, S. T. Latibari, A. Dolatshahi-Pirouz, H. S. C. Metselaar et M. Mehrali, « Experimental study on heat transfer augmentation of graphene based ferrofluids in presence of magnetic field », *Appl. Therm. Eng.*, pp. 415–427, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.199.
- [250] A. Abderrahmane, O. Younis, A. Mourad, H. Laidoudi, M. Oreijah, K. Guedri et S. M. Tag, « The baffle shape effects on natural convection flow and entropy generation in a nanofluid-filled permeable container with a magnetic field », *Sci. Rep.*, 14, 2550, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-53001-7.
- [251] S. Omiddezyani, I. Khazaei, S. Gharehkhani, M. Ashjaee, F. Shemirani et V. Zandian, « Experimental investigation of convective heat transfer of ferro-nanofluid containing graphene in a circular tube under magnetic field », *Modares Mech. Eng.*, pp. 1929–1941, 2019, doi: 10.27594/1398.19.8.23.1.
- [252] R. Alsangur, S. Doganay, İ. Ates, A. Turgut, L. Cetin et M. Rebay, « Magnetic field dependent thermal conductivity investigation of water based Fe₃O₄/CNT and Fe₃O₄/graphene magnetic hybrid nanofluids using a Helmholtz coil system setup », *Diamond Relat. Mater.*, 110716, 2024, doi: 10.1016/j.diamond.2023.110716.
- [253] N. A. Aminuddin, N. A. A. M. Nasir, W. Jamshed, A. Ishak, I. Pop et M. R. Eid, « Impact of thermal radiation on MHD GO–Fe₂O₄/EG flow and heat transfer over a moving surface », *Symmetry*, 15, 584, 2023, doi: 10.3390/sym15030584.
- [254] M. M. Ali, M. A. Alim, R. Akhter et S. S. Ahmed, « MHD natural convection flow of CuO/water nanofluid in a differentially heated hexagonal enclosure with a tilted square block », *Int. J. Appl. Comput. Math.*, pp. 1047–1069, 2017, doi: 10.1007/s40819-017-0400-y.
- [255] A. A. A. Al-Rashed et al., « Three-dimensional investigation of the effects of external magnetic field inclination on laminar natural convection heat transfer in CNT–water nanofluid filled cavity », *J. Mol. Liq.*, 2018, doi: 10.1016/j.molliq.2018.01.006.
- [256] L. Kolsi, A. A. A. Alrashed, K. Al-Salem, H. F. Öztöpe et M. N. Borjini, « Control of natural convection via inclined plate of CNT–water nanofluid in an open sided cubical enclosure under magnetic field », *Int. J. Heat Mass Transf.*, pp. 1007–1018, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.069.
- [257] M. Salari, E. H. Malekshah, M. H. Malekshah, M. Alavi et R. Hajihashemi, « 3D numerical analysis of natural convection and entropy generation within tilted rectangular enclosures filled with stratified fluids of MWCNTs/water nanofluid and air », *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, pp. 624–638, 2017, doi: 10.1016/j.jtice.2017.08.041.

- [258] A. Rahimi, A. Kasaeipoor, A. Amiri, M. H. Doranehgard, E. H. Malekshah et L. Kolsi, « Lattice Boltzmann method based on dual-MRT model for three-dimensional natural convection and entropy generation in CuO–water nanofluid filled cuboid enclosure included with discrete active walls », *Comput. Math. Appl.*, pp. 1795–1813, 2018, doi: 10.1016/j.camwa.2017.11.037.
- [259] M. Hajjiyan, M. Shohel, M. Biglarbegian, A. H. A. Hussein et A. Chamkha, « Effect of magnetic field-dependent thermal conductivity on natural convection of magnetic nanofluid inside a square enclosure », *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*, pp. 1466–1489, 2019, doi: 10.1108/HFF-07-2018-0374.
- [260] L. Shi, Y. He, Y. Hu et X. Wang, « Controllable natural convection in a rectangular enclosure filled with Fe₃O₄@CNT nanofluids », *Int. J. Heat Mass Transf.*, pp. 399–409, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.104.
- [261] Y. Hu, Y. He, C. Qi, B. Jiang et H. I. Schlaberg, « Experimental and numerical study of natural convection in a square enclosure filled with nanofluid », *Int. J. Heat Mass Transf.*, pp. 380–392, 2014, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.001.
- [262] I. D. Garbadeen, M. Sharifpur, J. M. Slabber et J. P. Meyer, « Experimental study on natural convection of MWCNT–water nanofluids in a square enclosure », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.07.019.
- [263] W. Zhou, Y. Yan, Y. Xie et B. Liu, « Three-dimensional lattice Boltzmann simulation for mixed convection of nanofluids in the presence of magnetic field », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.11.012.
- [264] S. Mumraiz, A. Ali, M. Awais, M. Shutaywi et Z. Shah, « Entropy generation in electrical magnetohydrodynamic flow of Al₂O₃–Cu/H₂O hybrid nanofluid with non-uniform heat flux », *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2020, doi: 10.1007/s10973-020-09603-0.
- [265] A. Hossain, M. M. Molla, M. Kamrujjaman, M. Mohebujjaman et S. C. Saha, « MHD mixed convection of non-Newtonian Bingham nanofluid in a wavy enclosure with temperature-dependent thermophysical properties: A sensitivity analysis by response surface methodology », *Energies*, 16, 4408, 2023, doi: 10.3390/en16114408.
- [266] M. A. El-Shorbagy, E. A. Algehyne, M. Ibrahim, V. Ali et R. Kalbasi, « Effect of fin thickness on mixed convection of hybrid nanofluid exposed to magnetic field – Enhancement of heat sink efficiency », *Case Stud. Therm. Eng.*, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101037.
- [267] R. Abdelhak, F. Redouane, W. Jamshed, M. R. Eid, K. Guedri, M. I. U. Rehman et S. M. El Din, « Analysis of water conveying aluminum oxide/silver nanoparticles due to mixed convection through four square cavity’s variable hot (cold) walled », *Ain Shams Eng. J.*, 2023, doi: 10.1016/j.asej.2022.102072.
- [268] M. Sheikholeslami, M. Hatami et D. D. Ganji, « Analytical investigation of MHD nanofluid flow in a semi-porous channel », *Powder Technol.*, pp. 327–336, 2013, doi: 10.1016/j.powtec.2013.05.030.
- [269] M. Sheikholeslami et D. D. Ganji, « Three-dimensional heat and mass transfer in a rotating system using nanofluid », *Powder Technol.*, pp. 789–796, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2013.12.042.
- [270] M. Sheikholeslami, S. Abelman et D. D. Ganji, « Numerical simulation of MHD nanofluid flow and heat transfer considering viscous dissipation », *Int. J. Heat Mass Transf.*, pp. 212–222, 2014, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.004.
- [271] E. Esmaeili, R. G. Chaydareh et S. A. Rounaghi, « The influence of the alternating magnetic field on the convective heat transfer properties of Fe₃O₄-containing nanofluids through the Néel and Brownian mechanisms », *Appl. Therm. Eng.*, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.014.
- [272] S. A. Z. Sajjad, R. Khodabandeh, H. Safarzadeh, H. Aminfar, M. Ghanbarpour et M. Mohammadpourfard, « Experimental study of the subcooled flow boiling heat transfer of magnetic nanofluid in a vertical tube under magnetic field », *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 2805–2816, 2020, doi: 10.1007/s10973-019-09057-z.

[273] V. Ganeshan, L. Cindrella, S. Vinod, J. Philip et S. P. Damodaran, « Synthesis, characterization, thermal conductivity and rheological studies in magnetite-decorated graphene oxide nanofluids », *J. Nanofluids*, pp. 11–20, 2018, doi: 10.1166/jon.2018.1435.

Chapitre II **Caractérisations thermophysiques des nanofluides à base de graphène et de nanofluides hybrides graphène/ Fe_3O_4**

Chapitre II Caractérisations thermophysiques des nanofluides à base de graphène et de nanofluides hybrides graphène/ Fe_3O_4	77
II.1 Introduction	78
II.2 Profil thermophysique des nanofluides industriels à base de graphène-eau :	79
II.3 Caractérisation des nanofluides hybride à base de graphène et Fe_3O_4 et de leurs propriétés thermophysiques :	95
II.3.1 Tension de surface des nanofluides hybrides graphène/ Fe_3O_4 à base d'eau	95
II.4 Conductivité thermique des nanofluides hybrides.....	106
II.4.1 Effet de surfactant	106
II.4.2 Effet de la concentration de nanoparticules et de la température	106
II.5 Capacité calorifique.....	110
II.6 Caractérisation du comportement rheologique des nanofluide hybride	111
II.6.1 Effet du surfactant	111
II.6.2 Effet de la concentration de nanoparticules et de la température	112
II.7 Conductivité électrique.....	118
II.8 Conclusion.....	120
II.9 Références	122

II.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, une revue de la littérature a permis d'examiner l'état de l'art concernant la convection magnétohydrodynamique dans des cavités remplies de nanofluides, et de montrer également l'intérêt de l'usage de nanofluides à base de graphène et de nanofluides hybrides intégrant des nanoparticules ferromagnétiques Fe_3O_4 pour améliorer les transferts de chaleur dans les systèmes énergétiques. Pour proposer des simulations numériques réalistes et avancer dans le développement de nanofluides tournés vers des applications concrètes, il convient de démontrer la robustesse de ces nanosuspensions dans le cadre d'une production « industrielle », avec une stabilité maîtrisée et des propriétés thermophysiques intéressantes dont l'évaluation complète permet d'appréhender sereinement le travail numérique et la démonstration de la performance de ces nanofluides.

Ce chapitre présente une étude complète des propriétés structurales et thermophysiques de deux types de nanofluides élaborés de façon originale dans un contexte industriel par l'entreprise Blackleaf sur la base d'un procédé optimisé d'exfoliation de graphite en phase liquide, sous ultrason et par ajout de surfactant(s). Il s'agit d'une première famille de nanofluides à base de graphène, puis d'une deuxième famille de nanofluides hybrides combinant graphène et Fe_3O_4 . Dans cette combinaison originale, l'idée est ici d'exploiter les propriétés complémentaires des deux types de nanoparticules pouvant mener à des fluides fonctionnalisés adaptés à des applications spécifiques : le graphène pour ses performances thermiques élevées et l'oxyde de fer Fe_3O_4 pour ses propriétés magnétiques et sa stabilité accrue en suspension.

Ce chapitre est structuré autour de deux contributions principales, La première présente un article consacré à l'analyse détaillée de la stabilité, des caractéristiques thermophysiques et du comportement des nanofluides à base de graphène à quelques couches (FLG). La seconde partie, divisée en deux sections, comprend un article publié portant sur la synthèse et la caractérisation des nanofluides hybrides graphène/ Fe_3O_4 , en mettant l'accent sur leur stabilité, leur densité et leur tension superficielle. Cette partie est complétée par la caractérisation de leurs propriétés thermiques et rhéologiques. La comparaison de la conductivité électrique de ces deux familles de nanofluides est aussi présentée dans ce chapitre, qui s'achève enfin par une synthèse des principaux résultats et conclusions. Pour les deux familles de nanofluides, les données expérimentales des propriétés thermophysiques sont également comparées à différents modèles théoriques, et des relations empiriques sont également développées.

Thermophysical profile of industrial graphene water-based nanofluids; Soulayma Gal, David Cabaleiro, Walid Hassen; Anaghim Nasri, Yannick Lafue, Cuong Pham-Huu, Housseinou Ba, Patrice Estellé; *Nanomaterials*; Volume 1401, 14, 2024, 126630; doi: 10.3390/nano14171401.

Surface tension of graphene/ Fe_3O_4 water-based hybrid nanofluids; Soulayma Gal, David Cabaleiro, Walid Hassen, Ludivine Rault, Housseinou Ba, Patrice Estellé; *Journal of Molecular Liquids*, Volume 417, 1, 2025, 126630; doi: 10.1016/j.molliq.2024.126630.

II.2 Profil thermophysique des nanofluides industriels à base de graphène-eau :



Article

Thermophysical Profile of Industrial Graphene Water-Based Nanofluids

Soulayma Gal ^{1,2}, David Cabaleiro ³, Walid Hassen ², Anaghim Nasri ⁴, Yannick Lafue ⁴, Cuong Pham-Huu ⁵, Housseinou Ba ⁴ and Patrice Estellé ^{1,*}

¹ LGCGM, University Rennes, 35000 Rennes, France; soulayma.gal@univ-rennes.fr

² LMES, Université de Monastir, Monastir 5000, Tunisia; hassen.walid@gmail.com

³ CINBIO, Universidad de Vigo, 36310 Vigo, Spain; dacabaleiro@uvigo.gal

⁴ BLACKLEAF SAS, 67400 Illkirch-Graffenstaden, France; anasri@blackleaf.fr (A.N.); ylafue@blackleaf.fr (Y.L.); hba@blackleaf.fr (H.B.)

⁵ ICPPEES, Université de Strasbourg et Centre National de Recherche Scientifique, 67000 Strasbourg, France; cuong.pham-huu@unistra.fr

* Correspondence: patrice.estelle@univ-rennes.fr; Tel.: +33-0223234200

Abstract: The exceptional properties of high-grade graphene make it an ideal candidate for thermal dissipation and heat exchange in energy applications and nanofluid development. Here, we present a comprehensive study of few-layer graphene (FLG) nanofluids prepared in an industrial context. FLG nanofluids were synthesized through an ultrasound-assisted mechanical exfoliation process of graphite in water with a green solvent. This method produces FLG of high structural quality and stable nanofluids, as demonstrated by electron microscope, dynamic light scattering and zeta potential analyses. Thermal conductivity measurements of FLG-based nanofluids were conducted in the temperature range of 283.15 K to 313.15 K, with FLG concentrations ranging from 0.005 to 0.200% in wt. The thermal conductivity of FLG nanofluids is up to 20% higher than water. The modeling of nanofluid thermal conductivity reveals that this enhancement is supported by the influence of the thermal resistance at the FLG interface, and the content, average dimensions and flatness of FLG sheets; this latter varying with the FLG concentration in the nanofluid. Additionally, the density and heat capacity of FLG suspensions were measured and compared with theoretical models, and the rheological behavior of FLG nanofluids was evaluated. This behavior is mainly Newtonian, with a weak 5% viscosity increase.

Keywords: few-layer graphene; industrial nanofluids; thermophysical properties; concentration influence; theoretical predictions



Citation: Gal, S.; Cabaleiro, D.; Hassen, W.; Nasri, A.; Lafue, Y.; Pham-Huu, C.; Ba, H.; Estellé, P. Thermophysical Profile of Industrial Graphene Water-Based Nanofluids. *Nanomaterials* **2024**, *14*, 1401. <https://doi.org/10.3390/nano14171401>

Academic Editor: Mikhail Sheremet

Received: 31 July 2024

Revised: 21 August 2024

Accepted: 26 August 2024

Published: 28 August 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The transition to a climate-neutral society is a challenging and great opportunity within the energy sector. Efficient transfer and thermal energy storage for sustainable and economic development in order to cover energy production and use needs is one of the key challenges of this century. Enhancing the thermophysical features of usual heat transfer fluids (HTFs), particularly their thermal conductivity, is one of the common strategies for heat transfer process intensification. This can be achieved by the addition of solid particles to nanometer dimension(s), the resulting HTFs being now well-defined as nanofluids. Among the available nature of nanostructures, and compared to usual metal oxides and metal nanoparticles, carbon-based nanostructures have attracted high interest because they exhibit much higher thermal conductivities [1].

Among the carbon nanostructures, graphene stands out. It was discovered by Geim and Novoselov [2,3] and is composed of a single layer of carbon atoms arranged in a sp^2 configuration. Graphene exhibits unique two-dimensional characteristics, such as high thermal and electrical conductivity. Monolayer graphene is preferred due to its superior attributes compared to multilayer graphene, which can experience reduced thermal conductivity due

to interactions between the layers [4]. For this reason, most relevant graphene suspensions contain few-layer graphene (FLG) or graphene nanoplatelets (GNP). FLG generally refers to graphene stacks with 2 to about 5 layers, while graphene layers exceeding 5 and up to 10 (sometimes up to 30) are referred to as multilayer/thick graphene (MLG) [5]. Overall, FLG has remarkable properties, including extreme resistance, transparency, density and excellent electrical and heat conductivity. These properties have sparked extensive research and opened up promising possibilities for various applications [6], including nanofluid usage for heat transfer improvements [7,8].

Thus, graphene-based nanofluids have been extensively studied for their exceptional thermal properties, which exhibit significantly higher thermal conductivities than other nanomaterials, as highlighted in recent state-of-the-art studies [7,9]. Additionally, several studies further confirm the efficacy of graphene-based nanofluids as highly efficient heat transfer fluids (HTFs). Mehrali et al. studied the synthesis of highly water-soluble GNPs through covalent functionalization of GNP sheets with the diazonium salt (DS) of sodium 4-amino azobenzene-4-sulfonate [10]. The authors proved the efficient stability of this nanofluid, which showed maximum sedimentation of 16% after 480 h and stability until 840 h. By incorporating surface-modified GNP sheets into the base fluid, the nanofluid exhibited a thermal conductivity increase of up to 17%. Kumar et al. recently presented a new method for preparing environmentally friendly, non-corrosive and covalently functionalized graphene with gallic acid (GGNP) nanoplatelets as HTF in a liquid planar solar collector to enhance energy performance [11]. Long-term stable and dispersible GGNP water-based nanofluids were prepared at different concentrations of 0.025%, 0.05% and 0.1%. The maximum improvement in liquid planar solar collector efficiency was observed with a 0.1 wt.% GGNP concentration and a flow rate of 1.5 L/min, resulting in a 24.09% increase compared to distilled water. The energy performance analysis revealed that the energy efficiency decreases while the mass flow rate grows, while an increase in nanofluid concentration leads to an improvement in energy efficiency. Lal et al. [12] conducted a detailed study on the convective heat transport performance of f-GnP (functionalized graphene nanoplatelets)-based nanofluids dispersed in distilled water. Their findings demonstrate that functionalized GNP provides better heat transport performance than water as a base fluid. The 0.200% functionalized GNP remains stable for a long period. Additionally, the heat sink temperature decreases by 10 K and both the convective heat transfer coefficient and Nusselt number improve by 10%. The viscosity increases by 13.3% with the addition of GNP. Experimental work was conducted by Cai et al. [13] to investigate the heat transfer performance of a pulsed heat pipe (PHP) employing a hybrid operation mode. The chosen heat transfer fluid was a stable mixture of high-quality FLG multilayer graphene dispersed in a base of water and 40 vol.% ethanol. The study showed that the thermal performance of the PHP with FLG graphene nanofluids was the best (indicating a 25.16% enhancement compared to using water alone) and that Triton X-100 outperformed other surfactants. Recently, Alawi et al. [14] introduced a novel approach for synthesizing covalently functionalized FLG through thermal treatment. The study also investigated the temporal stability and thermophysical characteristics of water-based nanofluids with varying content of functionalized FLG, from 0.025% to 0.1 wt.%. In this last work, the highest nanoparticle concentration of 0.1 wt.% demonstrated an impressive 31% enhancement in thermal conductivity, particularly at 323.15 K.

While many relevant studies have been performed at the laboratory scale, the development of nanofluid technology now demands a particular focus on the industrial production of stable nanofluids, along with an examination of their thermophysical properties for their future usage in real application. As a contribution to this crucial step toward a wider usage of nanofluids, and for the first time in the literature, we report here the complete characterization of FLG nanofluids prepared by a company in an industrial context from mechanical exfoliation of graphite in water under ultrasound and using a green solvent. This method yields high-quality graphene nanoplatelets with a few layers. The structural and morphological aspects of the FLGs were investigated with characterization devices. The stability of

the resulting nanofluids was formally assessed using dynamic light scattering (DLS) and zeta potential measurements. Additionally, we measured and analyzed the thermal conductivity of FLG-based nanofluids, considering the influence of temperature (283.15–313.15 K) and graphene concentration (0.005, 0.010, 0.020, 0.050, 0.100, 0.200% in mass). Furthermore, the rheological nature, density and specific heat capacity of the nanofluids were also experimentally evaluated to provide comprehensive knowledge of their thermophysical features. The findings will contribute to the existing research of graphene-based nanofluids, particularly due to the industrial nature of these suspensions, and should have significant implications for future applications in the advanced thermal sector.

2. Materials and Methods

2.1. Nanofluids Preparation from Enhanced Liquid-Phase Exfoliation

Graphene nanofluids were produced by the Blackleaf Company (Illkirch-Graffenstaden, France) using a refined liquid-phase exfoliation approach under a patented process [15]. For the process, Imerys (Tokyo, Japan) supplied high-purity graphite was chosen as the primary feedstock. Simultaneously, karaya gum surfactant, from Thermo Scientific Chemicals (Waltham, MA, USA) was incorporated. This surfactant is recognized for its dual capabilities as an emulsifier and dispersion stabilizer. In accordance with the protocol, an exact weight of 1.0 g of graphite was intimately mixed with a 0.1 g allotment of the designated surfactant within a precision volumetric flask, accommodating 1000 mL of doubly-distilled water, ensuring a regulated environment. This carefully prepared mixture was subjected to ultrasonication using an 80-watt probe sonicator SFX550 Sonifier (Branson, MO, USA). During this phase, continuous mechanical stirring was applied for a consistent period of 2 h to guarantee complete graphite exfoliation. Following successful exfoliation, subsequent meticulous dilutions of the primary solutions were performed, ensuring suitability for the impending series of characterization evaluations. As a result, six different samples were prepared with graphene content ranging from 0.200 to 0.005% in mass.

2.2. Characterization Methods

The methods employed for characterizing the graphene sheets, stability and thermophysical characteristics of graphene-based nanofluids are outlined below.

Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses were conducted with JEOL 2600F (Chiba, Japan) equipment. An acceleration voltage of 15 kV was applied with the emission current maintained at a constant 10 mA. In order to prevent charging effects during electron microscopy examinations, the specimens were sputter-coated with a thin layer of gold.

Transmission Electron Microscopy (TEM) characterizations were performed using a JEOL 2100F (Japan) device. The microscope was equipped with a probe corrector tailored for spherical aberration corrections, ensuring a precise point-to-point resolution of 0.2 nm. The microscopy has been conducted at an acceleration voltage of 200 kV. To achieve optimal dispersion, the samples were subjected to mild ultrasonication in ethanol for a 5-min duration. Subsequently, aliquots of this dispersion were allocated onto holey carbon TEM grids, facilitating detailed morphological investigations.

Data from Raman Spectroscopy were collected using the Horiba LabRAM ARAMIS system (LabSpec 6 Spectroscopy Suite Software). Measurements were taken over a wavenumber domain ranging from 500 to 4000 cm^{-1} , using a 532 nm laser for excitation. To optimize spectral data collection, analytes were applied to pristine glass substrates through a spin-coating method. These substrates were then subjected to drying protocols, ensuring minimal interference during spectral acquisition. All of these characterizations were performed under ambient conditions.

The hydrodynamic size distribution and zeta potential of graphene nanofluids were investigated at 298.15 K using a Zetasizer Nano ZS device (Malvern Instruments Ltd., Malvern, UK) equipped with a Helium-Neon laser (4 mW, 632.8 nm). The size of dispersed particles was estimated by the Dynamic Light Scattering (DLS) principle with a scattered angle of 173°. Zeta potential evaluations were performed in single-use folded capillary cells using the electrophoretic light scattering technique with a detection angle of 13°. Before zeta potential

analyses, samples were diluted 100 times in Milli-Q water to ensure that the recorded signal fell within the sensitivity range. All measurements were taken in triplicate to ensure representative results. An uncertainty of 5% was considered for size determinations using this technique.

Densities, ρ , were obtained using an oscillating U-tube densimeter (DMA 501, Anton Paar, Graz, Austria). The experimental tests were conducted from 288.15 K to 313.15 K. The temperature was tightly controlled with an accuracy of ± 0.03 K (repeatability of ± 0.01 K) using a solid-state thermostat integrated into the measuring cell. Toluene was selected as the reference material to calibrate the instrument. The density values, ρ , obtained with this instrument have an estimated uncertainty of $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Isobaric heat capacities, C_p , were measured at temperatures ranging from 283.15 K to 353.15 K using a heat-flow-type differential scanning calorimeter, DSC-Q2000 (TA Instruments, New Castle, DE, USA), equipped with a refrigerated cooling unit, RSC90 (TA Instruments, USA). Experiments were conducted from a quasi-isothermal Temperature-Modulated Differential Scanning Calorimetry (TMDSC) method. Samples, weighing $(12 \pm 1 \text{ mg})$, were hermetically sealed in Tzero aluminum pans and placed in the DSC chamber under a nitrogen atmosphere (purge flux: $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$). After stabilizing the tested material at the desired temperature, the DSC heat flow was calibrated to zero. Then, the sample temperature was sinusoidally modulated with an amplitude of 0.5 K and a period of 80 s for about 30 min. C_p values were obtained from MDSC reversing heat capacity signal, which had been previously calibrated using water, toluene, ethylene glycol and sapphire. An experimental uncertainty of 3% was estimated for isobaric heat capacity and ± 0.3 K (with a repeatability of ± 0.1 K) for temperature measurements [16].

Thermal conductivity, k , of nanofluids were measured across temperatures ranging from 283.15 K to 313.15 K using the THW-L2 instrument (Thermtest Inc., Hanwell, NB, Canada). This instrument employs the transient short hot-wire technique, conforming to the ASTM D7896 standard, with 2% reproducibility. For the measurements, the wire probe was immersed vertically in a sample holder, which contained around 20 mL of the nanofluid, and then placed in a dry bath. This setup allowed for precise regulation and control of the nanofluid's temperature at ± 0.5 K. Once the nanofluid reached the desired temperature, a 135-mV power supply was applied to the sample with a measurement duration of 1.5 s to avoid any convection perturbation. This experimental methodology aligns with practices previously established in [8], with further details available in that reference. The probe was previously calibrated with DW, and an average absolute deviation of 1.8% was reported for DW in the studied temperature range. It is worth noting that each reported value of thermal conductivity represents the average of at least 10 replicated tests.

The dynamic viscosity, μ , and shear flow behavior of nanofluids were evaluated using a Malvern Kinexus Pro rheometer (Malvern Instruments) with a cone-plane fixture (diameter 60 mm; cone angle 1°) from 283.15 K to 313.15 K. This evaluation is performed as previously described in [17]. Briefly, once the sample had equilibrated for 5 min at the required temperature between the geometries, it was subjected to steady-state shearing by applying a logarithmic ramp in shear stress. An experimental maximum deviation of 4% was experimentally estimated with DW in the tested temperature range. Rheological tests were performed in triplicate.

3. Results and Discussion

3.1. Structural Properties of Graphene Sheets

The morphology of the synthesized FLG is comprehensively analyzed using SEM. Figure 1 distinctly shows two-dimensional graphene flake structures with a predominant lateral size centered around $5 \mu\text{m}$, as further detailed in Figure 1a–c. From the TEM analyses reported in Figure 1d, it becomes evident that the FLG lateral size is well-centered on 5 nm. Furthermore, these sheets are discernibly constituted by fewer than 10 graphene layers (see Figure 1e). Such observations affirm the heightened level of exfoliation and underscore the efficacy of the adopted exfoliation synthesis protocol. The high-resolution TEM (HRTEM) pictures further elucidate the crystalline nature of the FLG, portraying its well-graphitized surface and the absence of any structural defects, as evidenced by Figure 1f.

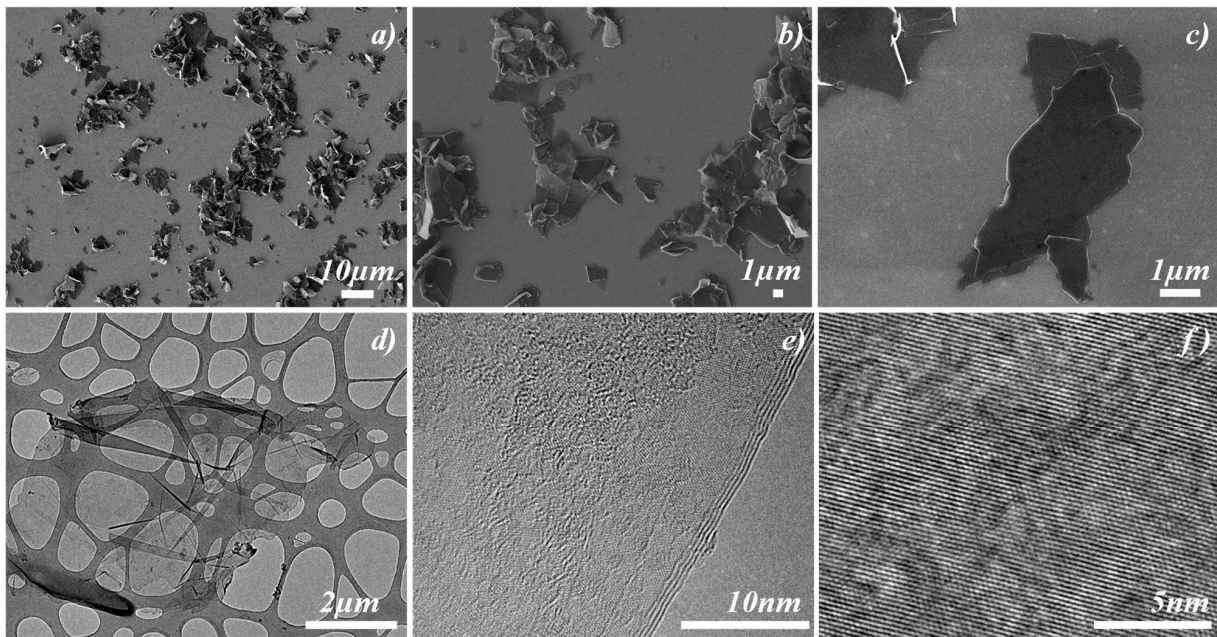


Figure 1. Morphological analysis of FLG sheets obtained via dip-sonication using karaya gum as an exfoliating agent. (a–c) SEM images; (d–f) high-resolution TEM (HRTEM) images.

To elucidate the structural characteristics and inherent quality of the synthesized graphene, we employed the Raman spectroscopy analytical process. The spectra derived from FLG distinctly highlight the canonical D and G bands, registering peak positions at 1345 cm^{-1} and 1590 cm^{-1} , respectively, as illustrated in Figure 2. As corroborated by prior studies [18,19], the D band is indicative of disordered sp^3 hybridized carbon, while the G band reflects the crystalline properties typical of graphitic sp^2 carbon configurations. The notably low I_D/I_G intensity ratio lends credence to the heightened graphitization quality of the newly exfoliated FLG. The emergence of the D band at 1376 cm^{-1} can be attributed to potential edge disturbances in the graphene sheets or possible defects on the basal plane, which might arise during the exfoliation. The reduced prominence of the D band across the analyzed samples underscores the efficacy of the adopted exfoliation methodology, adeptly minimizing the induction of structural anomalies [20]. The 2D Raman peak discerned around 2690 cm^{-1} , serving as a marker for the layering in graphene, highlights the dominance of structures with fewer than 10 graphene layers, particularly when benchmarked against bulk graphite, as portrayed in Figure 2a.

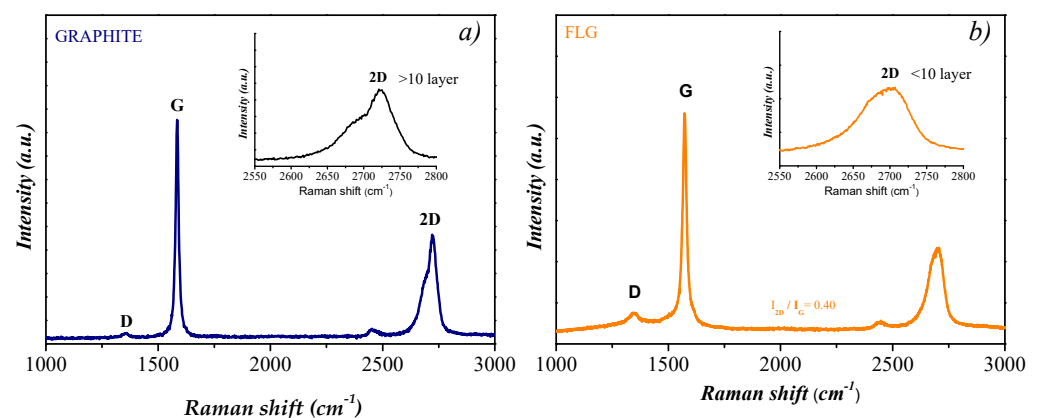


Figure 2. Raman spectroscopic analyses under 532 nm excitation. (a) Spectrum of the initial graphite precursor. (b) Spectrum of FLG micro-flakes.

3.2. Stability Analyses

Dynamic Light Scattering (DLS) is a smooth and quick analysis commonly used to assess the hydrodynamic diameter of dispersed particles in different types of colloidal suspensions [21]. The instability of nanofluids may cause nanoparticles to cluster together and eventually sediment. Thus, an increase in apparent DLS diameter with time can be an indicator of sample instability due to nanoparticle agglomeration or aggregation. In this work, dynamic light scattering analyses were repeated for about 30 days to monitor possible changes in the hydrodynamic size of dispersed particles [22]. Only 0.005, 0.010, 0.020 and 0.050 wt.% nanofluids were investigated using this technique, as 0.100 wt.% and 0.200 wt.% FLG loadings were too concentrated to ensure appropriate optical properties. For each concentration, two different samples were studied. One was kept static, and the other was manually shaken for a few seconds just before measurements [23], without any specific visual sedimentation observed. As an example, Figure 3a presents the fluctuations in the particle size distribution of a representative sample (0.050 wt.% FLG nanofluid maintained under static conditions). Dispersions present two-peak DLS distributions with a main peak at about ~ 800 nm and a secondary low peak at $\sim 5 \mu\text{m}$. It should be stressed that dynamic light scattering is based on the assumption that disperse materials are spherical while graphene is sheet-like shaped with only one dimension in the nanometric range. The average DLS sizes, with time, in static and shaken dispersions, are shown in Figure 3b. In the investigated samples, the hydrodynamic sizes of dispersed particles are within 600 to 900 nm, with an average value of 750 ± 50 nm in the whole investigated period.

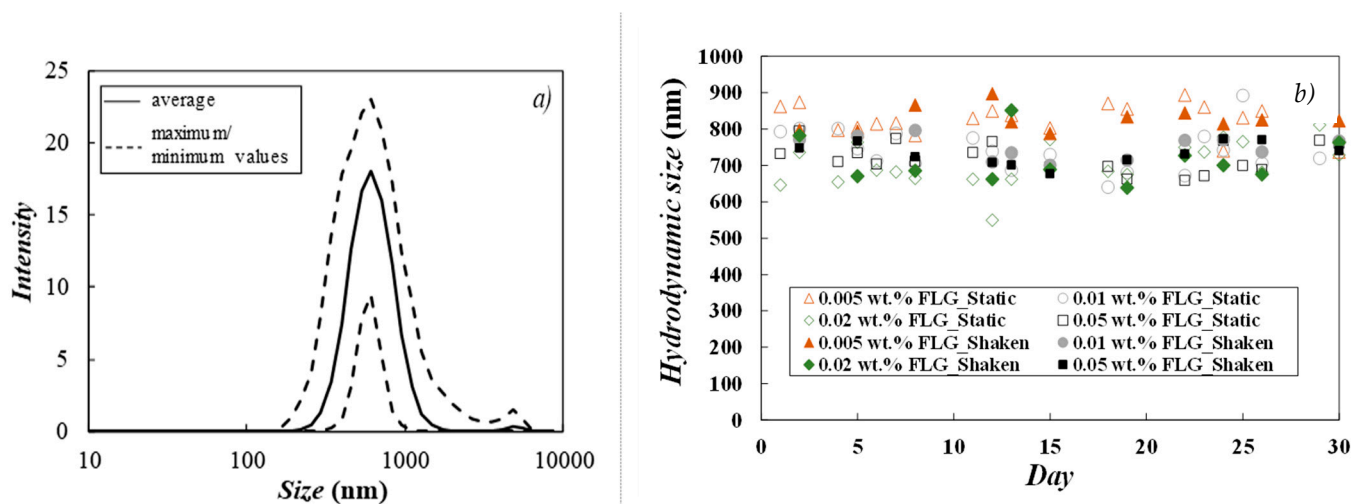


Figure 3. (a) Average DLS distributions taken over the 30-day period for 0.050 wt.% FLG nanofluid kept under static conditions and (b) changes in particle size for 0.005–0.050 wt.% FLG dispersions over time.

ζ eta potential is a measure of the electrical repulsion that rises among particles suspending in a fluid. Particles with high surface charges of the same sign repel each other and do not tend to agglomerate. Thus, high absolute ζ -values (negative or positive) generally indicate that suspensions systems are electrically stable. The ζ eta potential of prepared FLG nanofluids was investigated for a month as for DLS measurements, and the obtained data are gathered in Table 1. Samples exhibit ζ -values in the range between -34 and -40 mV, which are (in absolute value) higher than the ± 30 mV threshold usually regarded as efficient stability proof for water-based suspensions [9,24]. As can be observed in Table 1, no significant modification of this physicochemical property was detected in the investigated timeframe. These results evidence both the robustness of the exfoliation process and the good stability of nanofluids thus obtained.

Table 1. Weekly values of zeta potentials for 1:100 diluted samples.

FLG Concentration wt.%	zeta Potential (mV)				
	1st Day	8th Day	16th Day	23rd Day	30th Day
0.005	-35.3 ± 0.3	-36.5 ± 0.5	-38.4 ± 0.6	-36.5 ± 0.7	-34.0 ± 0.2
0.010	-39.2 ± 1.6	-35.3 ± 0.3	-37.9 ± 0.8	-37.1 ± 1.2	-35.5 ± 1.0
0.020	-39.6 ± 0.1	-36.5 ± 0.3	-37.8 ± 0.8	-37.6 ± 1.4	-40.4 ± 2.4
0.050	-38.3 ± 0.4	-39.9 ± 0.2	-38.4 ± 1.1	-38.3 ± 0.9	-36.7 ± 1.3
0.100	-39.7 ± 1.0	-37.2 ± 1.3	-36.1 ± 0.9	-38.8 ± 1.1	-37.3 ± 1.2
0.200	-36.5 ± 0.5	-37.4 ± 1.1	-37.2 ± 0.4	-35.0 ± 0.6	-35.5 ± 0.6

3.3. Thermophysical Profile

3.3.1. Density and Thermal Expansivity

Density was experimentally evaluated at atmospheric pressure and from 288.15 K to 313.15 K, at each 5 K. Obtained values for the base fluid and the six prepared nanofluid concentrations are depicted in Figure 4a. Water data agree well with well-established reference [25]. As can be observed in Figure 4b, this thermophysical property increases with FLG loading, with modifications that reach 0.25% at the 0.200 wt.% nanoparticle concentration. Similar changes in density for a 0.25 wt.% content was obtained by Vallejo et al. [26] when investigating functionalized-GNP nanofluids based on a propylene glycol:water mixture at 30:70% mass ratio. Experimental data were correlated with temperature according to the following polynomial fitting:

$$\rho(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 \quad (1)$$

where ρ is the density in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, T is the temperature in K and a_i are the fitting parameters (gathered in Table 2, together with standard deviations). Nanofluid ρ values at 283.15 K and 323.15 K were determined with Equation (1). From 283.15 to 323.15 K, this property decreases by about 1.2% for both the base fluid and the developed FLG nanofluids. Isobaric thermal expansivity coefficients, $\alpha_p = -(1/\rho) \cdot (\partial\rho/\partial T)_p$, were also calculated from density correlations. At investigated conditions, this thermophysical property rises with increasing temperature from about $2.0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ at 293.15 K to $3.0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ at 313.15 K. Even if α_p values were slightly higher, as in the case of 0.050–0.200 wt.% FLG nanofluids, maximum variations were within 0.06 K^{-1} .

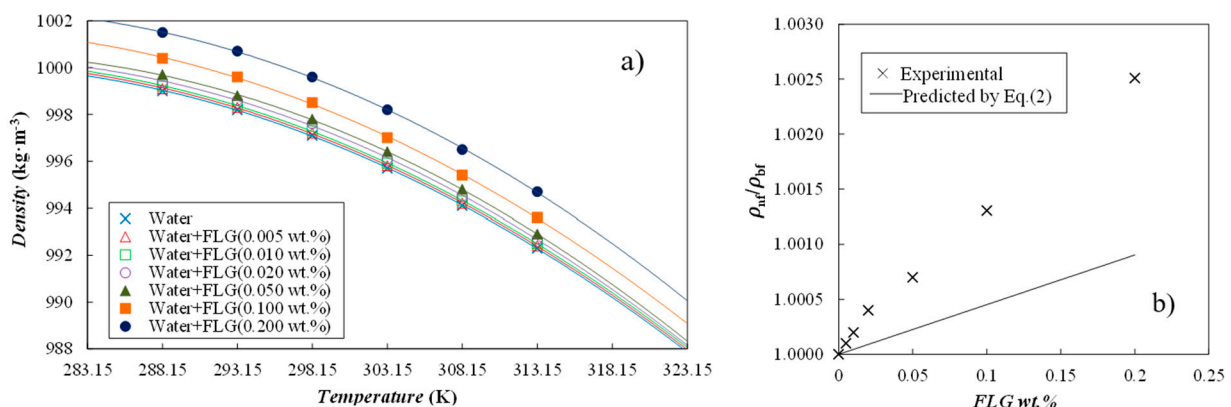


Figure 4. (a) Temperature dependence of density for the investigated nanofluid set. (—) Second-order polynomial fittings, Equation (1), and (b) relative densities, ρ_{nf}/ρ_{bf} , versus FLG content at 303.15 K.

A comparison of experimental nanofluid densities to the following mass-averaged equation was also performed:

$$\frac{1}{\rho_{nf}} = \frac{\varphi_m}{\rho_{np}} + \frac{(1 - \varphi_m)}{\rho_{bf}} \quad (2)$$

where ρ is the density and φ_m is the mass fraction of nanoparticles, while nf , np and bf subscripts stand for nanofluid, nanoparticles and base fluid, respectively. In this case, a density of $1820 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ was considered for the FLG nanopowder [27]. As shown in Figure 4b, experimental density increases are higher than predicted by Equation (2), with deviations that reach 0.16% at the highest content of FLG (0.200 wt.%).

Table 2. Fitting parameters (a_0 , a_1 , a_2) and standard deviations (s).

	FLG Mass Fraction (wt.%)					
	0.005	0.010	0.020	0.050	0.100	0.200
$a_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	625.6	625.7	625.8	600.4	544.9	628.5
$a_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$	2.74	2.74	2.74	2.91	3.29	2.73
$-10^3\cdot a_2/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-2})$	5.00	5.00	5.00	5.29	5.93	5.00
$10^2\cdot s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	6.1	6.1	9.5	5.1	7.4	5.0

3.3.2. Isobaric Heat Capacity

Isobaric heat capacities, C_p , were investigated for the dry FLG powder, the base fluid (water) and four representative FLG dispersions (viz., 0.010, 0.050, 0.100 and 0.200 wt.%) from 283.15 to 333.15 K. Obtained experimental results are shown in Figure 5a. The C_p values measured for the dry FLG powder increase from $899 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ at 283.15 K to $1106 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ at 333.15 K. Values are in the range of $700\text{--}1600 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, usually reported for carbon-based materials at similar temperature conditions [28–31]. Nanofluids exhibit the same temperature trend as water, with a minimum at around 303–313 K [25]. As shown, C_p of nanofluids weakly decreases with the increasing FLG content in the dispersion. Thus, in comparison to water, the C_p values of 0.010 and 0.200 wt.% concentrations are, on average, 0.15% and 1.9% lower, respectively. Experimental data were confronted to the isobaric heat capacities calculated by means of the Xuan and Roetzel [32] correlation, defined by the following equation:

$$C_{p_{nf}} = \varphi_m \cdot C_{p_{np}} + (1 - \varphi_m) \cdot C_{p_{bf}} \quad (3)$$

in which φ_m is the nanoparticle mass fraction and $C_{p_{nf}}$, $C_{p_{np}}$ and $C_{p_{bf}}$ are the isobaric heat capacities of the nanofluid, nanoadditive and base fluid, respectively. Figure 5b graphically compares the reductions in this property experimentally obtained and calculated by means of Equation (3). Even if both data sets show the same trend with FLG content, experimental reductions are higher than expected, according to Equation (3). The same observations from Żyła et al. [33] have been made, when investigating ethylene glycol-based nanofluids loaded with various types of nitrides.

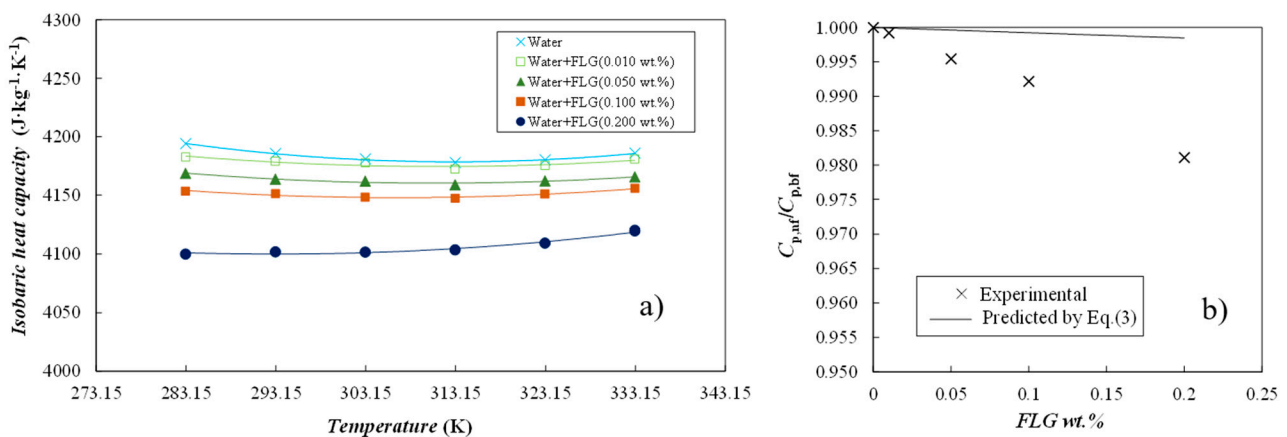


Figure 5. (a) Isobaric heat capacities as a function of temperature. (—) Second-order polynomial fittings and (b) relative isobaric heat capacities, $C_{p_{nf}}/C_{p_{bf}}$, as a function of FLG content at 303.15 K.

3.3.3. Thermal Conductivity

Figure 6a–d show the evolution of thermal conductivity ratio, defined as the thermal conductivity of nanofluids divided by the thermal conductivity of base fluid distilled water (DW) as a function of temperature and FLG volume fraction. As an expectation, the thermal conductivity is enhanced by both FLG content and temperature increase compared to DW. A 20% increase in average is obtained at 0.200% wt. content of graphene for the range of tested temperatures. For comparison purposes, an enhancement of about 12% is achieved at 0.100 wt.% and 313.15 K, that is, higher than 7.9%, reported by Gao et al. [34] for FLG/water nanofluids under the same conditions of concentration and temperature. In interesting ways, this enhancement reaches an average of 10% for only 0.005 wt.% graphene. A closer look at the results also evidences that thermal conductivity tends to decrease for intermediate concentrations in FLG but with reasonable enhancement of about 7% compared to DW. Such a trend for thermal conductivity was yet reported previously for carbon nanotubes and water-based nanofluids [35].

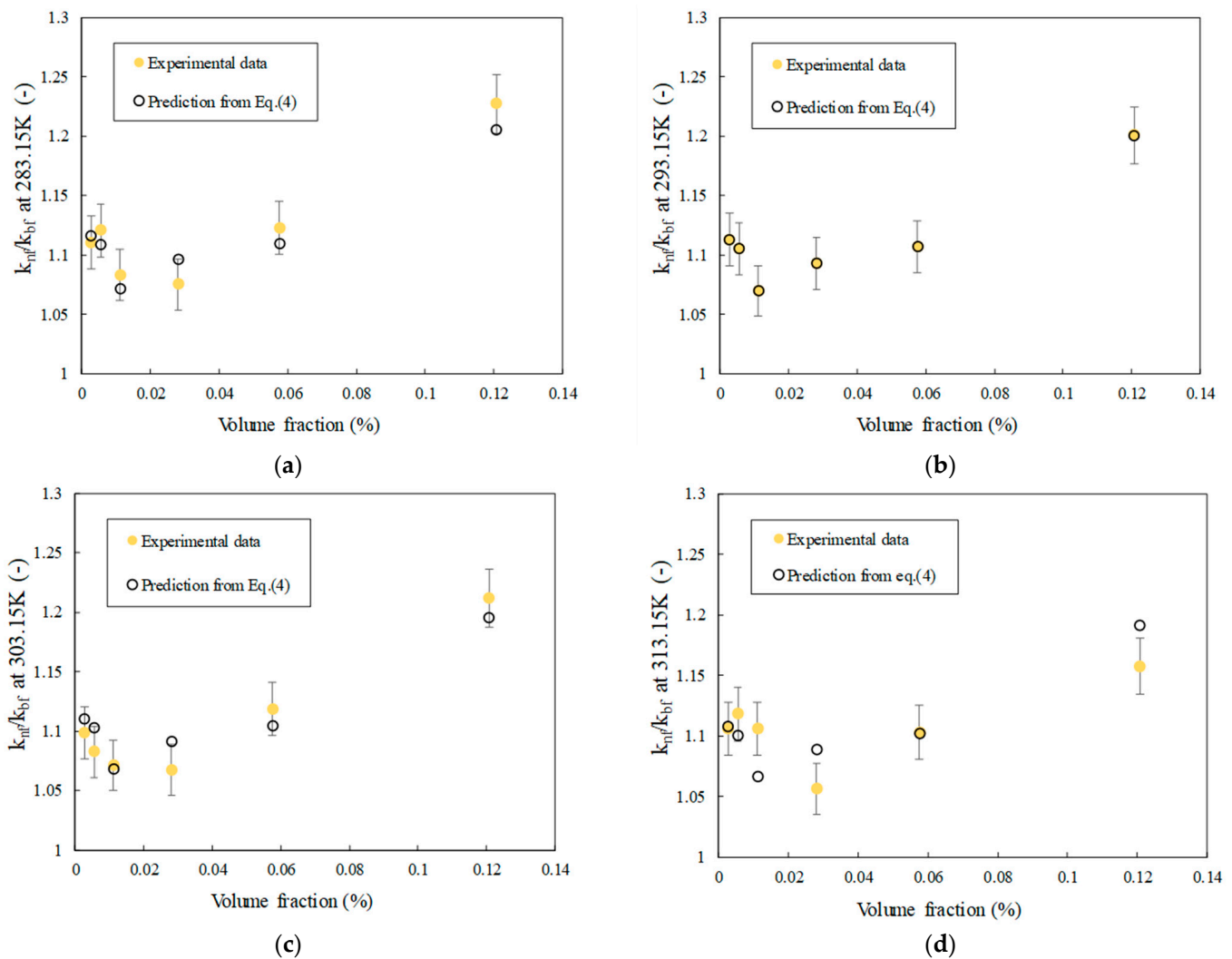


Figure 6. Thermal conductivity ratio of FLG nanofluids as a function of FLG volume fraction at different temperatures (a–d)—Comparison of experimental data and predictions of Equation (4).

It is now well-established that thermal conductivity of nanofluids depends on several coupled mechanisms and parameters of thermal conductivities of base fluid and nanoparticles, including their content, size, shape, motion and distribution. One relevant theoretical thermal conductivity correlation for graphene-based composites and nanofluids is Chu's model [8,36]. In order to analyze the thermal conductivity evolution of the FLG nanofluids,

this equation is considered here. This model, defined by Equation (4), includes parameters such as the flatness ratio, length, thickness, volume fraction, and interfacial thermal resistance of FLG nanosheets:

$$k_{nf} = k_{bf} \left(\frac{3 + \frac{2\eta^2\varphi}{\left[k_{bf} \left(\frac{2R_K}{L} + 13.4\sqrt{t} \right) \right]}}{3 - \eta\varphi} \right) \quad (4)$$

where L is the average length of graphene, taken here is 5 μm , and t is the average thickness of 5 nm, as evidenced previously by TEM characterization. R_K is the interfacial thermal resistance, taken at $4.5 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ at 293.15 K [37], considering the number of layers and that the base fluid is water. Finally, φ is the FLG volume fraction expressed by the following relationship, which depends on FLG mass fraction, denoted as φ_m , and the density of the base fluid, ρ_{bf} , typically water, and FLG nanoparticles, ρ_{np} , at 293.15 K (reported above in Section 3.3.1). It should be noted that the density of karaya gum was not considered because of the low content used for nanofluid preparation and the value near the density of water.

$$\varphi = \frac{\varphi_m \frac{\rho_{bf}}{\rho_{np}}}{\left(1 - \varphi_m \left(1 - \frac{\rho_{bf}}{\rho_{np}} \right) \right)} \quad (5)$$

Consequently, all the parameters from these equations are fixed, except the flatness ratio, η , which characterizes the ability of FLG to be bended and wrinkled within the base fluid, and will be adjusted. Hence, Figure 6a–d also presents the results of the analysis performed using the Chu model. These predictive values are then compared to the measured experimental data to evaluate the model's effectiveness and precision. Consequently, an Average Absolute Deviation (AAD) of 0.035% is obtained at 293.15 K with a flatness ratio evolution as reported in Figure 7. AAD values are 1.3%, 1.4% and 1.9% at 283.15, 303.15 and 313.15 K, respectively. Those results are reasonable when considering the value of the interfacial thermal resistance at 293.15 K only, in the absence of any other relevant reference at lower and higher temperatures.

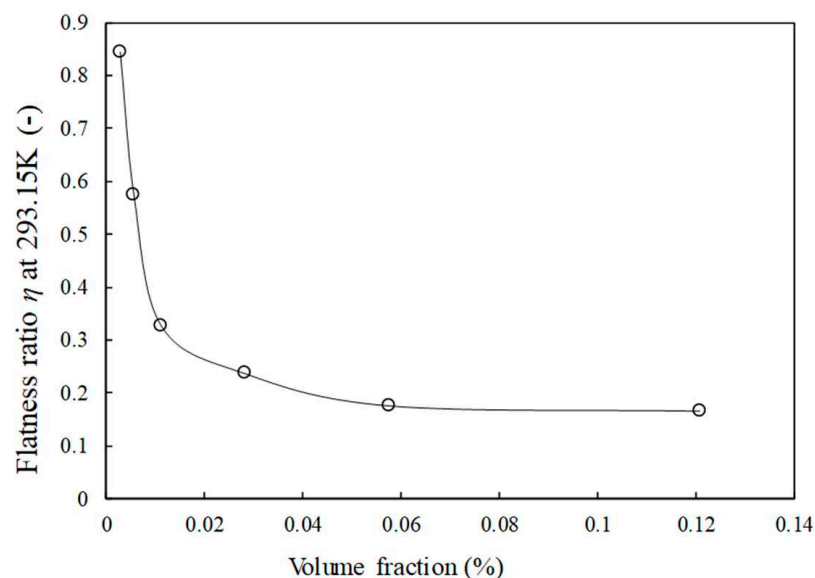


Figure 7. Flatness ratio evolution of FLG in Chu's Model as a function of FLG volume fraction at 293.15 K (The line is only a guide for the eye to follow).

In Figure 7, a reduction in the flatness ratio (the only adjustable parameter in the model) is observed as the FLG content increases, allowing good prediction of the model compared to the experimental data. This means that with more FLG sheets in the nanofluids, the likelihood of FLG contact and overlap rises, leading to a decrease in the FLG flatness ratio. This occurs as FLGs may undergo deformation, adopting a more curved shape in the fluid [38]. Moreover, larger FLGs are more susceptible to bending and wrinkling due to their size and shape [39]. This observation suggests that a higher number of graphene nanosheets correlates with an increased tendency to bend and wrinkle within the HTF. Such behavior differs from the case of FLG dispersed in fluid composed of water and propylene glycol from non-covalent functionalization, using surfactant in rather large content. In that case, due to the adsorption of many surfactant molecules on the nanosheet surface, a constant flatness ratio was reported [25].

3.3.4. Dynamic Viscosity

Because of the practical implementation of nanofluids in heat transfer systems, it is necessary to investigate how nanoparticle content can impact the dynamic viscosity of nanofluids, which is directly related to pressure drop and power consumption [5]. Consequently, the dynamic viscosity of FLG nanofluids was evaluated at temperatures ranging from 283.15 K to 313.15 K and FLG concentration up to 0.050 wt.%. As illustrated by Figure 8 at 0.005 wt.% and 0.050 wt.%, the nanofluids mainly show a Newtonian nature in the shear rate range investigated within the experimental uncertainty. A viscosity decrease in both temperature increase and FLG content decrease is also evidenced. The temperature-dependent decrease in dynamic viscosity reaches 44%, 48%, 49% and 50% for mass concentrations of 0.005%, 0.010%, 0.020% and 0.050%, respectively. This evolution aligns with previous studies on aqueous nanofluids containing graphene nanoplatelets, as reported by Merhali et al. [40], Vakili et al. [41], Yarmand [42], Vallejo et al. [43] and Alvarado et al. [44]. Also, the presence of FLG induces an enhancement in viscosity compared to distilled water, as highlighted by Figure 9, which reports the viscosity ratio (calculated as the ratio of the viscosity of nanofluids to the viscosity of DW). This figure, as also evidenced by Figure 8, shows that there is no great change in viscosity with FLG content, with average enhancements of about 5%, which are near the experimental uncertainty.

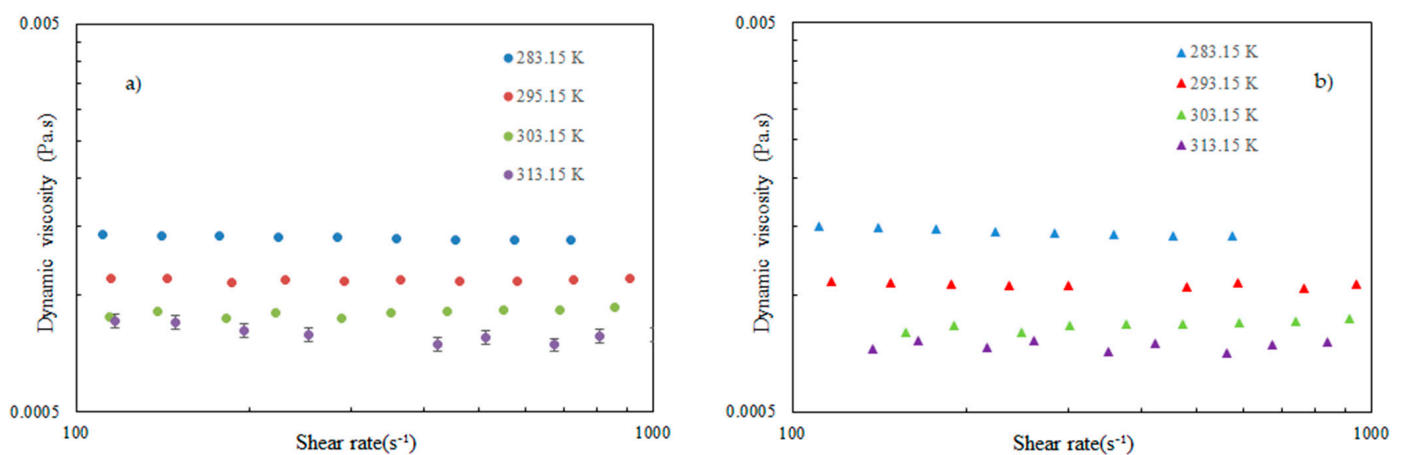


Figure 8. Dynamic viscosity of FLG nanofluids as a function of shear rate for different temperatures and at (a) 0.005 wt.% and (b) 0.050 wt.% in FLG content.

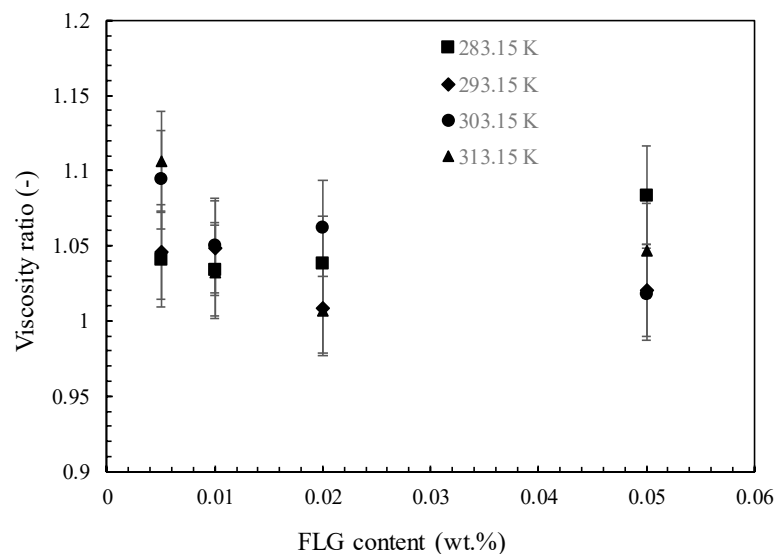


Figure 9. Viscosity ratio of FLG nanofluids as a function of temperature and FLG mass fraction.

4. Conclusions

We report the first comprehensive characterization of the stability and thermophysical properties of Few-Layer Graphene (FLG) nanofluids produced in an industrial context with FLG mass fractions ranging from 0.005% to 0.200%. These nanofluids are developed through a green and smooth mechanical exfoliation process, which ensures FLG production with excellent structural quality and controlled dimensions, as assessed by SEM and HRTEM techniques. Moreover, ζ eta potential and DLS analyses also show good stability of these industrial nanofluids. Their thermophysical profile is fully evaluated over a temperature range from 283.15 K to 303.15 K. As expected, the density of the nanofluids slightly increases with FLG content, while the heat capacity weakly decreases. A maximum enhancement of about 20% in thermal conductivity is reported at 0.200 wt.%, while this improvement reaches 10% at only 0.005 wt.%, and the dynamic viscosity remains within a reasonable variation of 5% compared to pure water.

For the majority of the properties, as well as across a range of temperatures and FLG concentrations, the experimental data were found to align well with theoretical correlations. The mass-averaged equation and mixture law provide accurate predictions for density and heat capacity, respectively. Regarding thermal conductivity, the enhancements in this property are demonstrated to be mainly governed by interfacial thermal resistance, average dimensions of FLG and the ability of FLG to be bent and wrinkled within the base fluid. Such behavior depends on FLG content, as illustrated by the model from Chu, here considered.

Finally, based on these properties and stability, industrial graphene-based nanofluids that can be produced in large quantities appear as promising heat transfer fluids in thermal engineering applications, in particular at low graphene content.

Author Contributions: Conceptualization, P.E.; Data curation, S.G., D.C. and P.E.; Formal analysis, S.G., D.C. and P.E.; Funding acquisition, W.H. and P.E.; Investigation, S.G., D.C., H.B. and P.E.; Methodology, C.P.-H., H.B. and P.E.; Project administration, P.E.; Resources, A.N., Y.L., C.P.-H. and H.B.; Supervision, W.H. and P.E.; Validation, S.G., D.C., A.N., Y.L., C.P.-H., H.B. and P.E.; Visualization, S.G., D.C., H.B. and P.E.; Writing—original draft, S.G., D.C., H.B. and P.E.; Writing—review and editing, S.G., D.C., W.H. and P.E. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: S.G., W.H. and P.E. gratefully acknowledge the financial support of CMCU and Campus France through the grant No. 23G1111 from the PHC Utique. S.G. also acknowledges Rennes Métropole for its financial support through the Ph.D. student incoming mobility grants received in 2022 and 2023. D.C. is a recipient of a “Juan de la Cierva” contract (agreement IJC2020-043779-I) supported by the Spanish “Ministerio de Ciencia e Innovación” and the European Union NextGenerationEU/PRTR.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Acknowledgments: Thierry Romero (ICPEES) is gratefully acknowledged for performing SEM analysis.

Conflicts of Interest: Author Anaghim Nasri, Yannick Lafue and Housseinou Ba were employed by the company BLACKLEAF SAS. The remaining authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Nomenclature

Abbreviations

AAD	Average absolute deviation (%)
DLS	Dynamic light scattering
C_p	Isobaric heat capacity, ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
DW	Deionized/Distilled water
FLG	Few layer graphene
HTF	Heat transfer fluid
HRTEM	High-resolution transmission electron microscopy
GNP	Graphene nanoplatelets
k	Thermal conductivity ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
L	Average length of graphene (μm)
MLG	Multilayer/thick graphene
PHP	Pulsed heat pipe
R_K	Interfacial thermal resistance ($\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
SEM	Scanning electron microscopy
T	Temperature (K)
t	Graphene thickness (nm)
TEM	Transmission electron microscopy
TMDSC	Temperature-modulated differential scanning calorimetry

Greek letters

α_p	Isobaric thermal expansivity coefficient (K^{-1})
ζ	Zeta potential (mV)
η	Average flatness ratio of FLG
ρ	Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
φ_m	Mass fraction
φ	Volume fraction

Subscripts

bf	Base fluid
nf	Nanofluid
np	Nanoparticles

References

1. Tam, N.T.; Phuong, N.V.; Khoi, P.H.; Minh, P.N.; Afrand, M.; Van Trinh, P.; Thang, B.H.; Zyla, G.; Estellé, P. Carbon nanomaterial-based nanofluids for direct thermal solar absorption. *Nanomaterials* **2020**, *10*, 1199. [[CrossRef](#)]
2. Novoselov, K.S.; Geim, A.K.; Morozov, S.V.; Jiang, D.; Katsnelson, M.I.; Grigorieva, I.V.; Dubonos, S.V.; Firsov, A.A. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature* **2005**, *438*, 197–200. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Neto, A.H.C.; Guinea, F.; Peres, N.M.R.; Novoselov, K.S.; Geim, A.K. The electronic properties of graphene. *Rev. Mod. Phys.* **2009**, *81*, 109. [[CrossRef](#)]
4. Parvin, N.; Kumar, V.; Joo, S.W.; Park, S.-S.; Mandal, T.K. Recent advances in the characterized identification of mono-to-multi-layer graphene and its biomedical applications: A review. *Electronics* **2022**, *11*, 3345. [[CrossRef](#)]
5. Hamze, S.; Cabaleiro, D.; Estellé, P. Graphene-based nanofluids: A comprehensive review about rheological behavior and dynamic viscosity. *J. Mol. Liq.* **2021**, *325*, 115207. [[CrossRef](#)]
6. Bahiraei, M.; Heshmatian, S. Graphene family nanofluids: A critical review and future research directions. *Energy Convers. Manag.* **2019**, *196*, 1222–1256. [[CrossRef](#)]
7. Pavía, M.; Alajami, K.; Estellé, P.; Desforges, A.; Vigolo, B. A critical review on thermal conductivity enhancement of graphene-based nanofluids. *Adv. Colloid Interface Sci.* **2021**, *294*, 102452. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
8. Hamze, S.; Berrada, N.; Cabaleiro, D.; Desforges, A.; Ghanbaja, J.; Gleize, J.; Bégin, D.; Michaux, F.; Maré, T.; Vigolo, B.; et al. Few-layer graphene-based nanofluids with enhanced thermal conductivity. *Nanomaterials* **2020**, *10*, 1258. [[CrossRef](#)]

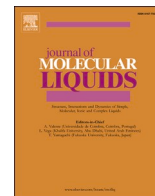
9. Le Ba, T.; Mahian, O.; Wongwises, S.; Szilágyi, I.M. Review on the recent progress in the preparation and stability of graphene-based nanofluids. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2020**, *142*, 1145–1172. [[CrossRef](#)]
10. Sadeghinezhad, E.; Akhiani, A.R.; Metselaar, H.S.C.; Latibari, S.T.; Mehrali, M.; Mehrali, M. Parametric study on the thermal performance enhancement of a thermosyphon heat pipe using covalent functionalized graphene nanofluids. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *175*, 115385. [[CrossRef](#)]
11. Kumar, L.H.; Kazi, S.N.; Masjuki, H.H.; Zubir, M.N.M.; Jahan, A.; Bhinitha, C. Energy, exergy and economic analysis of liquid flat-plate solar collector using green covalent functionalized graphene nanoplatelets. *Appl. Therm. Eng.* **2021**, *192*, 116916. [[CrossRef](#)]
12. Balaji, T.; Selvam, C.; Lal, D.M.; Harish, S. Enhanced heat transport behavior of micro channel heat sink with graphene based nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2020**, *117*, 104716. [[CrossRef](#)]
13. Xu, Y.; Xue, Y.; Qi, H.; Cai, W. Experimental study on heat transfer performance of pulsating heat pipes with hybrid working fluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2020**, *157*, 119727. [[CrossRef](#)]
14. Alawi, O.A.; Sidik, N.A.C.; Kazi, S.N.; Najafi, G. Graphene nanoplatelets and few-layer graphene studies in thermo-physical properties and particle characterization. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2019**, *135*, 1081–1093. [[CrossRef](#)]
15. Janowska, I.; Truong-Phuoc, L.; Ba, H.; Pham-Huu, C. Nanocomposites Nanomatériau/Système Polymoléculaire Colloïdaux, et Méthodes de Préparation. WO 2018/087484 A1 [Online]. Available online: <https://patents.google.com/patent/WO2018087484A1/fr> (accessed on 30 July 2024).
16. Cabaleiro, D.; Gracia-Fernández, C.; Lugo, L. (Solid+liquid) phase equilibria and heat capacity of (diphenyl ether+biphenyl) mixtures used as thermal energy storage materials. *J. Chem. Thermodyn.* **2014**, *74*, 43–50. [[CrossRef](#)]
17. Hamze, S.; Cabaleiro, D.; Maré, T.; Vigolo, B.; Estellé, P. Shear flow behavior and dynamic viscosity of few-layer graphene nanofluids based on propylene glycol-water mixture. *J. Mol. Liq.* **2020**, *316*, 113875. [[CrossRef](#)]
18. Osswald, S.; Havel, M.; Gogotsi, Y. Monitoring oxidation of multiwalled carbon nanotubes by Raman spectroscopy. *J. Raman Spectrosc.* **2007**, *38*, 728. [[CrossRef](#)]
19. Chizari, K.; Janowska, I.; Houlléa, M.; Florea, I.; Ersenb, O.; Romeroa, T.; Bernhardt, P.; Ledouxa, M.J.; Pham-Huu, C. Tuning of nitrogen-doped carbon nanotubes as catalyst support for liquid-phase reaction. *Appl. Catal. A* **2010**, *380*, 72–80. [[CrossRef](#)]
20. Ferrari, A.C.; Meyer, J.C.; Scardaci, V.; Casiraghi, C.; Lazzeri, M.; Mauri, F.; Piscanec, S.; Jiang, D.; Novoselov, K.S.; Roth, S.; et al. Raman spectrum of graphene and graphene layers. *Phys. Rev. Lett.* **2006**, *97*, 187401. [[CrossRef](#)]
21. Chakraborty, S.; Panigrahi, P.K. Stability of nanofluid: A review. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *174*, 115259. [[CrossRef](#)]
22. Ilyas, S.U.; Shamsuddin, R.; Xiang, T.K.; Estellé, P.; Pendyala, R. Rheological profile of graphene-based nanofluids in thermal oil with hybrid additives of carbon nanotubes and nanofibers. *J. Mol. Liq.* **2023**, *376*, 121443. [[CrossRef](#)]
23. Fedele, L.; Colla, L.; Bobbo, S.; Barison, S.; Agresti, F. Experimental stability analysis of different water-based nanofluids. *Nanoscale Res. Lett.* **2011**, *6*, 300. [[CrossRef](#)]
24. Ilyas, S.U.; Pendyala, R. Preparation sedimentation and agglomeration of nanofluids. *Chem. Eng. Technol.* **2014**, *37*, 2011. [[CrossRef](#)]
25. Lemmon, E.W.; Huber, M.L.; McLinden, M.O. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties database. In *NIST 23, (REFPROP)*, 8th ed.; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 2007.
26. Vallejo, J.P.; Pérez-Tavernier, J.; Cabaleiro, D.; Fernández-Seara, J.; Lugo, L. Potential heat transfer enhancement of functionalized graphene nanoplatelet dispersions in a propylene glycol-water mixture. Thermophysical profile. *J. Chem. Thermodyn.* **2018**, *123*, 174–184. [[CrossRef](#)]
27. Hamze, S.; Cabaleiro, D.; Bégin, D.; Desforges, A.; Maré, T.; Vigolo, B.; Lugo, L.; Estellé, P. Volumetric Properties and Surface Tension of few-layer graphene nanofluids based on a commercial heat transfer fluid. *Energies* **2020**, *13*, 3462. [[CrossRef](#)]
28. Picard, S.; Burns, D.T.; Roger, P. Determination of the specific heat capacity of a graphite sample using absolute and differential methods. *Metrologia* **2007**, *44*, 294–302. [[CrossRef](#)]
29. Picard, S.; Burns, D.T.; Roger, P. *Measurement of the Specific Heat Capacity of Graphite*; (BIPM--2006-01); Bureau International des Poids et Mesures (BIPM): Paris, France, 2006.
30. Marcos, M.A.; Cabaleiro, D.; Guimarey, M.J.G.; Comuñas, M.J.P.; Fedele, L.; Fernández, J.; Lugo, L. PEG 400-based phase change materials nano-enhanced with functionalized graphene nanoplatelets. *Nanomaterials* **2017**, *8*, 16. [[CrossRef](#)]
31. Pop, E.; Varshney, V.; Roy, A.K. Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications. *MRS Bull.* **2012**, *37*, 1273–1281. [[CrossRef](#)]
32. Xuan, Y.; Roetzel, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2000**, *43*, 3701. [[CrossRef](#)]
33. Żyła, G.; Vallejo, J.P.; Lugo, L. Isobaric heat capacity and density of ethylene glycol based nanofluids containing various nitride nanoparticle types: An experimental study. *J. Mol. Liq.* **2018**, *261*, 530–539. [[CrossRef](#)]
34. Gao, Y.; Wang, H.; Sasmito, A.P.; Mujumdar, A.S. Measurement and modeling of thermal conductivity of graphene nanoplatelet water and ethylene glycol base nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2018**, *123*, 97–109. [[CrossRef](#)]
35. Maré, T.; Halelfadl, S.; Van Vaerenbergh, S.; Estellé, P. Unexpected sharp peak in thermal conductivity of carbon nanotubes water-based nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2015**, *66*, 80. [[CrossRef](#)]
36. Chu, K.; Li, W.; Tang, F. Flatness-dependent thermal conductivity of graphene-based composites. *Phys. Lett. A* **2013**, *377*, 910–914. [[CrossRef](#)]

37. Alexeev, D.; Chen, J.; Walther, J.H.; Giapis, K.P.; Angelikopoulos, P.; Koumoutsakos, P. Kapitza resistance between few-layer graphene and water: Liquid layering effects. *Nano Lett.* **2015**, *15*, 5744–5749. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
38. Fu, S.; Sun, Z.; Huang, P.; Li, Y.; Hu, N. Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. *Nano Mater. Sci.* **2019**, *1*, 2–30. [[CrossRef](#)]
39. Androulidakis, C.; Koukaras, E.N.; Rahova, J.; Sampathkumar, K.; Parthenios, J.; Papagelis, K.; Frank, O.; Galiotis, C. Wrinkled few-layer graphene as highly efficient load bearer. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9*, 26593–26601. [[CrossRef](#)]
40. Sadeghinezhad, E.; Mehrali, M.; Rosen, M.A.; Akhiani, A.R.; Latibari, S.T.; Mehrali, M.; Metselaar, H.S.C. Experimental investigation of the effect of graphene nanofluids on heat pipe thermal performance. *Appl. Therm. Eng.* **2016**, *100*, 775–787. [[CrossRef](#)]
41. Vakili, M.; Khosrojerdi, S.; Aghajannezhad, P.; Yahyaei, M. A hybrid artificial neural network-genetic algorithm modeling approach for viscosity estimation of graphene nanoplatelets nanofluid using experimental data. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2017**, *82*, 40–48. [[CrossRef](#)]
42. Yarmand, H.; Gharekhani, S.; Shirazi, S.F.S.; Amiri, A.; Alehashem, M.S.; Dahari, M.; Kazi, S. Experimental investigation of thermo-physical properties, convective heat transfer and pressure drop of functionalized graphene nanoplatelets aqueous nanofluid in a square heated pipe. *Energy Convers. Manag.* **2016**, *114*, 38–49. [[CrossRef](#)]
43. Vallejo, J.P.; Gómez-Barreiro, S.; Cabaleiro, D.; Gracia-Fernández, C.; Fernández-Seara, J.; Lugo, L. Flow behaviour of suspensions of functionalized graphene nanoplatelets in propylene glycol–water mixtures. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2018**, *91*, 150–157. [[CrossRef](#)]
44. Wang, Y.; Al-Saaidi, H.A.I.; Kong, M.; Alvarado, J.L. Thermophysical performance of graphene based aqueous nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2018**, *119*, 408–417. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

II.3 Caractérisation des nanofluides hybride à base de graphène et Fe_3O_4 et de leurs propriétés thermophysiques :

II.3.1 Tension de surface des nanofluides hybrides graphène/ Fe_3O_4 à base d'eau



Surface tension of graphene/Fe₃O₄ water-based hybrid nanofluids

Soulayma Gal^{a,b}, David Cabaleiro^c, Walid Hassen^b, Ludivine Rault^d, Housseinou Ba^e, Patrice Estellé^{a,*}

^a LGCGM, Univ Rennes, Rennes, France

^b LMES, Université de Monastir, Monastir, Tunisia

^c Dept. Applied Physics, Universidad de Vigo, Vigo, Spain

^d ScanMAT, Univ Rennes, Rennes, France

^e BLACKLEAF SAS, Strasbourg, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Graphene
Iron oxide
Hybrid nanofluids
Surface tension
Concentration influence

ABSTRACT

Advanced hybrid nanofluids have been engineered through the synthesis of aqueous suspensions containing graphene sheets and iron oxide (Fe₃O₄) nanoparticles at a graphene-Fe₃O₄ mass ratio of 70:30. Karaya gum and cocoamidopropyl betaine (CAPB) were selected as surfactants given their good affinity with dispersed nano-materials. Graphene sheets with Fe₃O₄ nanoparticles as well as the prepared dispersions were first characterized in terms of morphology, chemical composition and stability using various techniques, including electron microscopy, UV-visible spectroscopy and Zeta potential analyses. Given the crucial role that surface tension (ST) plays in boiling/condensation processes or micro-flow applications, this physical property was investigated at nanoadditive mass concentrations of 0.005–0.100 % and temperatures of 283.15–313.15 K using the pendant drop method. As an entry parameter for ST evaluation, the density of these hybrid nanofluids was also measured at the same temperature and concentration ranges. Experimental studies revealed that ST of water reduces with the addition of surfactant and increasing temperature. Graphene-Fe₃O₄ nanoparticles were also found to further reduce the ST (thus enhancing the effect of the surfactant mixture) by up to 42.7 % on average at 0.1 %wt. compared to water in the tested temperature range. This may be potentially interesting for improving boiling heat transfer performance and optimizing bubble flow pattern.

1. Introduction

Nanofluids, suspensions of nanoparticles in conventional fluids such as water, glycols, and oils, represent a significant advancement in nanotechnology and heat transfer since they first appeared in the early 1990s. Incorporating metallic nanoparticles, carbides, oxides, or carbon materials imparts these fluids with superior thermophysical properties compared to conventional fluids. Notable advantages include enhanced thermal conductivity, higher heat transfer coefficients, and increased critical heat flux. These exceptional characteristics have facilitated the development of a wide range of practical applications, including microchannel cooling in integrated circuits, chemical and pharmaceutical processes [1–4], nuclear reactors [5], and solar energy concentration systems [6]. Among the different types of nanofluids, those based on graphene and iron oxide (Fe₃O₄) are particularly noteworthy. Graphene possesses exceptional properties, including high electrical and thermal conductivity, high Young's modulus, and remarkable fracture

toughness, making it an ideal additive for nanofluids as demonstrated in different studies [7–11]. Fe₃O₄ nanoparticles are one of the most suitable materials for nanofluids due to their availability, enhanced stability, high thermal conductivity, and magnetic properties enabling controlled cooling. They are stable, corrosion-resistant, easy to synthesize, and also used in biomedicine for magnetic hyperthermia [12–14].

Research on nanofluids often focuses on the characterization of thermal conductivity and dynamic viscosity, both of which are critical for optimizing heat transfer performance as highlighted in the following studies [15–18]. However, experimental data on other physical and interfacial parameters is essential for making appropriate decisions in the design of heat transfer and energy storage systems. Surface tension (ST) refers to the energy required to increase the surface area of a liquid due to intermolecular forces, which significantly influences heat transfer and the interaction of surface fluids. In boiling and condensation processes, ST plays a crucial role in the formation and detachment of bubbles, as well as in the development of a liquid film. Variations in ST

* Corresponding author.

E-mail address: patrice.estelle@univ-rennes.fr (P. Estellé).

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.126630>

Received 30 September 2024; Received in revised form 14 November 2024; Accepted 28 November 2024

Available online 4 December 2024

0167-7322/© 2024 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

can either enhance or hinder the thermal performance of nanofluids. A comprehensive understanding of ST is essential for the effective design and improvement of nanofluids, particularly in micro-flow applications where precise management of fluidic interactions is paramount [19–21]. Although graphene and Fe_3O_4 nanoparticles suspended in the base fluid have been extensively studied for their thermal and rheological properties, their surface tension has been rarely examined. The primary findings from the existing literature are summarized below. Du et al. [22] studied the ST of a graphene-based aqueous nanofluid and its effects on heat transfer. They observed a decrease in ST with increasing dispersant concentration and temperature, noting a reduction from 24.6 % to 0.6 wt% of graphene compared to water. The incorporation of graphene improved the contact angle of water with stainless steel and polypropylene random plate materials, thereby reducing resistance to heat transfer. This reduction in ST also improved boiling heat transfer performance and optimized the bubble flow pattern, while offsetting the increase in frictional resistance. In a recent study, Liu et al. [23] examined the ST of nanofluids composed of distilled water and graphene oxide, with mass concentrations ranging from 0.02 to 0.12 wt%, using an acoustic levitator. They observed an increase in ST with higher mass concentration and a decrease with higher temperature. For nanoparticle concentrations below 0.08 wt%, surface tension increased progressively, while for higher concentrations, significant differences were noted between supercooled and non-supercooled states. Non-contact measurement techniques enabled precise measurements without contamination. Ilyas et al. [24] studied the ST behavior of saline nanofluids composed of graphene nanoplatelets and saline fluid at a concentration of 30 parts per thousand. Their measurements covered graphene nanoplatelet concentrations ranging from 0 to 0.25 wt% and a temperature range from 298.15 to 338.15 K. The study revealed a significant 21 % reduction in ST with increasing nanoplatelet concentration and temperature. Cabaleiro et al. [25] investigated the impact of chemical reduction of graphene oxide on the surface tension of aqueous nanofluids at 293.15 K. Graphene oxide (GO) was synthesized from commercial synthetic graphite using a modified Hummers method, while reduced graphene oxides (rGOs) were produced through the chemical reduction of GO. Three series of aqueous nanofluids were prepared using both GO and rGOs without surfactants, covering volume fractions ranging from 0.0005 to 0.1 %. The results showed a decrease in surface tension proportional to the increase in graphene concentration, with maximum reductions of 3 % observed at the highest concentration (0.1 %), without significant impact from the chemical reduction process. Tian et al. [26] studied the ST of functionalized graphene nanofluids. Their findings indicated that the incorporation of graphene nanosheets led to a reduction in ST by up to 13.9 % in ethylene glycol. Although there was an increase in bond strength, this reduction was not fully compensated. In addition, the ST of the base fluid decreased by 8.3 % with rising temperature, whereas the 5 wt% nanofluid demonstrated a lesser decrease of 3.86 %, suggesting a reduced sensitivity to temperature due to the presence of nanoparticles. Ahammed et al. [27] used sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) as a surfactant in the synthesis of graphene-containing nanofluids. They investigated the impact of varying graphene concentrations and temperatures, specifically within the range of 283.15–363.15 K on the surface tension of the nanofluids. The results indicated a tendency to decrease as graphene concentration and temperature increased, indicating a negative correlation with these parameters. Notably, at a temperature of 323.15 K and a graphene concentration of 0.15 vol%, ST was reduced by 18.7 % compared to water. The study revealed that the effect of graphene concentration on ST was more significant than that of temperature. Kujawska et al. [28] explored the surface tension of a graphene oxide (GO) water-based nanofluid both prior to and following a boiling cycle within a thermosyphon. The authors conducted a comparative analysis of GO nanofluids with and without the incorporation of sodium dodecyl sulfate (SDS) surfactant to distinguish the effects of GO flakes from those of the surfactant. The results showed that even a minimal concentration of SDS

(0.01 g/L) reduces the surface tension by approximately 2 % when compared to pure water. However, in the presence of GO, the effect of SDS is attenuated, as surfactant molecules tend to adsorb onto the GO flakes, reducing the free SDS concentration in the fluid and leading to an increase in the surface tension relative to a solution containing only the surfactant. Hamze et al. [15] examined the surface tension of nanofluids using Triton X-100, Pluronic P-123, and gum Arabic as dispersants across a temperature range of 283.15 to 323.15 K. The study evaluated both the individual effects of the surfactants and graphene particles on ST, as well as their combined interactions. The results indicated that gum Arabic did not exert a measurable effect on the ST of water, whereas the presence of graphene resulted in a 21.5 % increase in ST, independent of graphene concentration. Additionally, the incorporation of Triton X-100 into Tyfocor® LS led to a reduction in ST, with a decrease of 10.8 % observed at a concentration of 0.1 wt% and a temperature of 283.15 K, and a reduction of 0.4 % at 323.15 K. Similarly, the introduction of Pluronic® P-123 into Tyfocor® LS resulted in a decrease in ST, ranging from 14.8 % to 11.4 % as the temperature increased from 283.15 to 323.15 K, with no significant variations observed with respect to concentration. These findings highlight the significant influence of surfactant selection and temperature on the control of the surface tension in nanofluids. Banisharif et al. [29] studied the ST of Fe_3O_4 nanoparticles dispersed in a water/ethylene glycol mixture at concentrations ranging from 0 to 1.0 vol%. This investigation was carried out over a temperature range of 253.15–293.15 K, with a focus on cooling applications. The results showed that ST decreased with the addition of surfactant to the base fluid, then increased with Fe_3O_4 concentration, achieving an increase of nearly 38 % at 253.15 K and 33 % at 293.15 K for a nanoparticle concentration of 0.1 vol%. To enhance the understanding of the influence of Fe_3O_4 nanoparticles on the ST of aqueous nanofluids, Chicea and Goncea [30] investigated the impact of Fe_3O_4 and its functionalization. Their findings indicated a reduction in the surface tension value as the concentration of nanoparticles increased. Jiang et al. [31] studied the ST of nanofluids containing iron(II) oxide and light crude oil. The authors found that the ST was minimized at a nanoparticle concentration of 2.0 wt% at a temperature of 343.15 K. ST decreased significantly between 298.15 K and 343.15 K, but increased at higher temperatures. In a separate investigation, Saptorio et al. [32] used a non-chemical method based on microwave irradiation to modify the ST of Fe_3O_4 nanoparticles dispersed in water. Their findings indicated a reduction in ST of 7.0 % at a nanoparticle mass concentration of 0.05 wt %, 11.6 % at 0.1 wt%, and 12.5 % at 0.5 wt%, in comparison to pure to water. Additional results concerning various types of nanoparticles are compiled in Refs. [33,34] which also emphasize the importance of ST in heat transfer processes.

Recently, hybrid nanofluids have captured growing interest due to their ability to combine different types of nanoparticles, thereby leveraging the synergistic benefits of each constituent. These nanofluids exhibit the potential for enhanced thermal performance, opening up new prospects for more efficient industrial and technological applications, such as solar cooling systems and nuclear reactors, thereby augmenting their overall efficiency and reliability. However, research on the ST of these hybrid nanofluids remains limited, with only a few studies conducted in this field. In this context, Huminic et al. [35] investigated the ST of hybrid nanofluids composed of either water (W) or a water + ethylene glycol mixture (W+EG) that were loaded with reduced graphene oxide decorated with silver nanoparticles (Ag NPs-rGO). The incorporation of surfactants reduced the ST by 8.66 % for water and 4.63 % for the water + ethylene glycol mixture at 293.15 K. Furthermore, an increase in the concentration of Ag NPs-rGO led to an increase in ST by 7.48 % for Ag NPs-rGO/water and 9.50 % for Ag NPs-rGO/W+EG at 293.15 K and 0.10 wt%. Additionally, an increase in temperature was associated with a decrease in ST, more pronounced effect observed for Ag NPs-rGO/water compared to Ag NPs-rGO/W + EG. Nayebpashaei et al. [36] prepared hybrid nanofluids by combining water and ethylene glycol (W + EG in a 50:50 vol% ratio at 298.15 K)

with surfactants containing oleic acid and sodium dodecylsulfonate. They measured the surface tension of the graphene- Al_2O_3 /ethylene glycol–water hybrid nanofluid at temperatures ranging from 253.15 to 293.15 K and at different nanoparticle volume fractions (0.05 %–2.5 %). The addition of surfactant initially resulted in a decrease in surface tension, which then subsequently increased with nanoparticle concentration, reaching rises in this property around 47.84 % (268.15 K) and 54.30 % (283.15 K) for 2 vol% sample and around 48.25 % (258.15 K) for 2.5 vol% concentration. Overall, surface tension exhibited a decreasing trend with increasing temperature.

Owing to the importance of surface tension and density in understanding the thermal and fluid-dynamic characteristics of hybrid nanofluids, the lack of significant investigations on those parameters needs to be filled with more literature on the matter. Our comprehensive literature review, as referenced in studies [33,34], indicates a lack of research focused on the ST of hybrid nanofluids containing graphene and Fe_3O_4 nanostructures. Consequently, this study presents novel findings regarding the synthesis of such hybrid nanofluids and their ST characterization. In the following, as shown in Section 2, the hybrid nanofluids consist of graphene nanosheets with few layers which were prepared through the liquid-phase exfoliation of graphite in water with the aid of surfactants. Additionally, magnetic Fe_3O_4 particles were incorporated into the nanofluids at a graphene- Fe_3O_4 mass ratio of 70:30. The structural and morphological characteristics of selected nanoparticles were analyzed and the stability of the prepared hybrid nanofluids was assessed using UV–visible spectroscopy and zeta potential measurements, as detailed in Section 3. In the same section, the density and surface tension were experimentally evaluated by varying the temperature, ranging from 283.15 K to 313.15 K, and nanoparticle concentration from 0.005 to 0.100 wt%. Finally, a correlation was established among surface tension, temperature and the mass fraction of graphene- Fe_3O_4 nanoparticles, providing practical data to guide their future application across various industrial fields.

2. Materials and methods

2.1. Hybrid nanofluid preparation

Hybrid nanofluids were produced in two successive steps. Initially, a suspension of graphene was generated using an optimized liquid-phase exfoliation technique, akin to the method reported in [37]. To enhance the exfoliation process, karaya gum (Thermo Scientific Chemicals, USA) was used. Additionally, cocoamidopropyl betaine (CAPB) (Microbialtec, USA) was incorporated as co-surfactant. Karaya gum was chosen as surfactant due to its natural emulsifying and dispersion-stabilizing properties, which are essential for the long-term stability of nanofluids. Studies have shown previously that polysaccharides like karaya gum are effective in stabilizing nanoparticle suspensions in aqueous fluids [38]. Cocoamidopropyl betaine (CAPB), an amphoteric surfactant, was selected as the co-surfactant for its strong affinity with iron oxide (Fe_3O_4) nanoparticles, preventing agglomeration and promoting uniform dispersion in the base fluid. This karaya gum/CAPB combination achieves a stable suspension, as shown later, while maximizing the specific surface area of exfoliated graphene, which is crucial for thermal applications of nanofluids.

In practice, 1.0 g of high-purity graphite (Imerys, France) was mixed with 0.1 g of both surfactant/co-surfactant with ratio 1:1 blend in a 1000 mL volumetric flask containing doubly-distilled water, ensuring a controlled environment. This mixture was subjected to sonication using a probe-type sonicator SFX550 Sonifier (Branson, USA) operating at a frequency of 50/60 Hz, with an 80-watt power setting for 2 h, under continuous mechanical stirring to achieve thorough graphite exfoliation. Following the exfoliation process, spherical Fe_3O_4 particles, purchased from Nanographi (Turkey) and with properties gathered in Table 1, were introduced into the suspension at a graphene/ Fe_3O_4 ratio of 70:30 and agitated for an additional 30 min. These parameters are

Table 1
Manufacturer data of Fe_3O_4 nanoparticles [41].

Purity (%)	>98.45
Color	Dark Brown
Average Particle Size (nm)	18–28
Morphology	Spherical
Specific Surface Area (m^2/g)	>55
Bulk density (kg/m^3)	900
True density (kg/m^3)	5100
Element Analysis (%)	Ca: 0.023; Cr: 0.0016; K: 0.0012; Mn: 0.086; SiO_2 : 0.14

optimal for exfoliating graphite into graphene while ensuring effective dispersion of Fe_3O_4 nanoparticles. Studies have shown that such settings minimize agglomeration and maintain a homogeneous suspension over extended periods [39], a key criterion for ensuring the stability of hybrid nanofluids. To prevent excessive temperature increase during the 2-hour ultrasonication, the beaker containing the suspension was placed in a double-walled reservoir connected to a chiller circulating a water-glycol coolant. This setup maintains a stable ambient temperature, ensuring the thermal stability of the suspension and preventing any changes to the nanofluid's properties during preparation. Temperature control is particularly crucial, as high temperatures during ultrasonication can lead to instability and aggregation of nanoparticles [40].

Then, this primary solution underwent meticulous dilutions to ensure its suitability for subsequent characterization evaluations. As a result, five distinct samples were prepared, with particle mass contents ranging from 0.100 to 0.005 wt%.

2.2. Characterization methods

The morphology of graphene- Fe_3O_4 nanostructures was investigated using conventional and high-resolution transmission electron microscopy (TEM and HRTEM) with a JEM 2100 HR (JEOL, Ltd., Tokyo, Japan). Conventional TEM micrographs were acquired with a Gatan Orius SC200D camera, high resolution images were captured with a Gatan UltraScan 1000XP camera. Elemental analysis was conducted using an EDX Oxford X-Max 80T detector. A small aliquot of the sample suspension was diluted with ultrapure water. Subsequently, a droplet of the diluted suspension was placed on a holey carbon-coated 300 mesh copper grid and allowed to dry at room temperature.

The temporal stability of graphene- Fe_3O_4 nanofluids was evaluated at a temperature of 298.15 K utilizing UV–visible spectroscopy and Zeta Potential analyses. The UV–vis measurements were conducted using an HP-8453 diode array spectrophotometer (Agilent Technologies, Inc., California, USA), which was equipped with a cell carrier maintained at a constant temperature by an external water cooler (Julabo, F12-ED, Germany). Dispersions at concentrations of 0.050 wt% and 0.100 wt% were diluted one hundred times with Milli-Q water and subjected to sonication for 5 min in a low-energy ultrasonic bath (200 W, 40 kHz, JP Selecta SA, Spain). These dilutions were then transferred into 10 mm-path-length quartz cuvettes and maintained under static conditions for a duration of 24 days. Absorbance spectra were periodically recorded over a wavelength range of $\lambda = 200\text{--}800$ nm. Zeta potential (ζ -potential) measurements were conducted by means of a Zetasizer Nano ZS device (Malvern Instruments Ltd., UK). The five developed dispersions were analyzed with a 4-mW helium–neon laser source emitting at 632.8 nm, with a detection angle of 13° (forward scattering). To ensure that the recorded signal remained within the optimal sensitivity range of the instrument, samples were also diluted 100 times in Milli-Q water. Then, fluids were filled into electrophoresis cells (DTS 1070 from Malvern) and were kept in a static state for 23 days.

Density ρ determinations were performed by means of a vibrating quartz U-tube densimeter, the DMA 501 manufactured by Anton Paar (Austria). This experimental apparatus is equipped with a Peltier

thermostat, which facilitates temperature control within the range of 288.15 to 313.15 K, achieving an accuracy of ± 0.03 K (with a repeatability: ± 0.01 K). The expanded uncertainty associated with the density measurements is estimated to be less than 0.1 % [15].

The surface tension (ST) measurements were performed using a DSA-30 drop shape analyzer manufactured by KRÜSS GmbH (Hamburg, Germany). Sample droplets were generated using a 15-gauge needle (outer diameter 1.835 mm), with both the flow rate and volume meticulously controlled. The experimental methodology employed has been comprehensively detailed in Ref. [42]. Based on the suspended drop technique, ST was calculated from the density of each sample and the analysis of the droplet shape suspended at the needle tip, in accordance with the Young-Laplace equation. In the following, each ST value has been obtained from the average of at least sixty measurements. Additionally, the ST of distilled water was also measured in the temperature range of 283.15 to 313.15 K. Samples were equilibrated at least for 10 mins at required temperature using a TC40 environmental chamber, where the temperature is regulated by a Peltier system (with an accuracy of ± 0.2 K) and monitored via a PT100 probe. To validate the experimental method and evaluate uncertainty in ST, Fig. 1 shows the experimental results for distilled water alongside reference data from Vargaftik et al. [43]. The comparison demonstrates a strong correlation, with the ST values deviating by an AAD of 1.4 % from the reference values [43] within the examined temperature range.

3. Results & discussion

3.1. Nanostructures morphology

TEM analyses were performed for evaluating the liquid phase exfoliation process in synthesizing graphene sheets with few layers, evaluating their average dimension, and confirming the morphological properties of Fe_3O_4 nanoparticles and their chemical species, in comparison to manufacturer data previously reported in Table 1. As shown by Fig. 2a to 2c, the average lateral dimensions of graphene sheets are between 5 and 10 μm on average. These values are similar to the ones reported in [37] where a similar liquid exfoliation process was used. However, it appears here that graphene sheets thickness is higher, reaching 14 nm in average, as illustrated by Fig. 2d to 2f. Consequently, graphene sheets are here composed of higher number of layers, between 35 and 40. This can be probably explained by the mixture of surfactants used, karaya gum and CAPB, that are less effective in exfoliate graphite sheets that karaya gum alone [37], and by the presence of Fe_3O_4 nanoparticles. It should also be noted that graphene sheets exhibit many folds and folded regions, which are characteristic for this nanostructure.

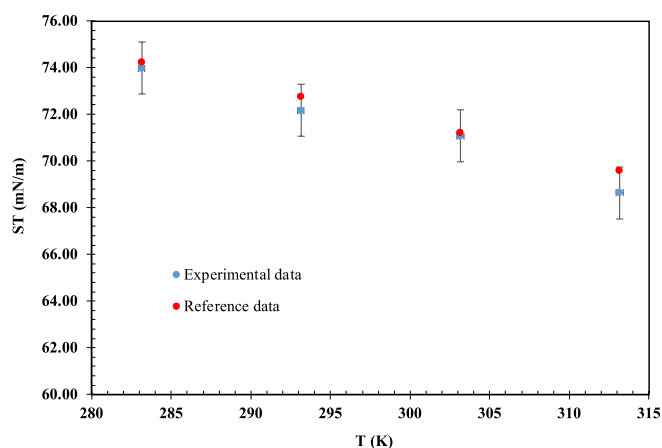


Fig. 1. Surface tension of distilled water as a function of temperature – Experimental data versus reference data [43]. Error bars stand for experimental uncertainty.

With regards of Fe_3O_4 nanoparticles characteristics, TEM analysis shown in Fig. 2g evidences that the sizes of nanoparticles are within the range given by the manufacturer, e.g. 18–28 nm, but the nanoparticles are not well spherical in shape rather in polygon form. Chemical species of these nanoparticles are reported in Fig. 2i. This latter figure highlights the presence of Fe, O, and C as expected. Some other species like Ca and Si are found, in agreement of species reported in Table 1. However, additional impurities are also present, like Na, Al, and Cl. Several other spectra analyses were performed, providing the same results.

3.2. Stability of hybrid nanofluids

As per Beer-Lambert's law, the amount of light absorbed by a colloidal suspension depends upon the concentration of dispersed particles. Thus, nanofluid stability can be investigated by monitoring the evolution of sample absorbance. Fig. 3.a shows several representative UV-vis spectra recorded for 1:100 dilutions of the dispersions loaded with 0.050 wt% and 0.100 wt% of graphene- Fe_3O_4 . As can be observed, nanofluids exhibit a maximum peak at wavelengths around $\lambda = 260$ –270 nm. Graphene nanostructures have been reported to present maximum peaks in the wavelength range between 230 and 300 nm, which correspond to $\pi \rightarrow \pi^*$ transitions of aromatic C–C bonds [44,45]. Thus, in this work, the stability of the dispersions was evaluated by averaging the absorbance in the range $\lambda = 260$ –270 nm and monitoring that value over time. Comparing Fig. 3a and b, it can be observed that, as expected, the higher the graphene concentration, the higher is the extinction coefficient. As shown in Fig. 3.b, recorded absorbance reduced mainly during the first week in the case of the dispersion loaded with 0.050 wt% and during the first two weeks in the case of the 0.100 wt% nanofluid. After then, reductions in absorbance value were considerably lower. This means that at first sight, the tested hybrid nanofluids are subjected to some aggregation phenomena during few days after their preparation, as shown by the decrease in the extinction coefficient values during the first few days. Then, the values remained practically constant, with only minor changes observed, indicating equilibrium state of the nanofluids [46]. This equilibrium is reached quickly with the sample containing the least graphene, as evidenced by Fig. 3b.

In colloidal dispersions, Zeta potential (ζ -potential) is an important physical-chemical parameter since it provides valuable information regarding the magnitude of electrostatic interaction between interfaces. High Zeta potentials are usually an indication of electrostatic charges strong enough to prevent aggregation or agglomeration of dispersed particles. Therefore, ζ -values greater than ± 30 mV are generally considered a criterion for judging nanofluids to be stable [47]. Table 2 summarizes the results obtained for 1:100 dilutions of the five developed dispersions. All samples showed ζ -potentials in the range from ± 40 mV to ± 60 mV, which are an indication of good stability [48]. As shown in Table 2, recorded values did not considerably change in the investigated timeframe.

3.3. Density of hybrid nanofluids

Density ρ was experimentally investigated at 5 K steps covering the temperature interval between 288.15 and 313.15 K. Fig. 4 depicts the temperature dependence of ρ results for distilled water (used as base fluid) and the five prepared graphene- Fe_3O_4 hybrid nanofluids. In the investigated temperature range, all samples exhibit a similar $\rho(T)$ trend, with average reductions of 0.27 % for every 10 K increase in temperature. Experimental data were also correlated as a function of temperature (in Kelvin) by means of a second-order polynomial (i.e. $\rho(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2$). Table 3 presents the obtained a_i fitting parameters together with the standard deviations of the adjustments. The density of the nanofluids at temperatures of 283.15 K, necessary for surface tension analyses, were calculated using those correlations. In addition, the coefficients of isobaric thermal expansion (i.e. $\alpha_p = -(\frac{1}{\rho}) \cdot (\frac{\partial \rho}{\partial T})_p$), were

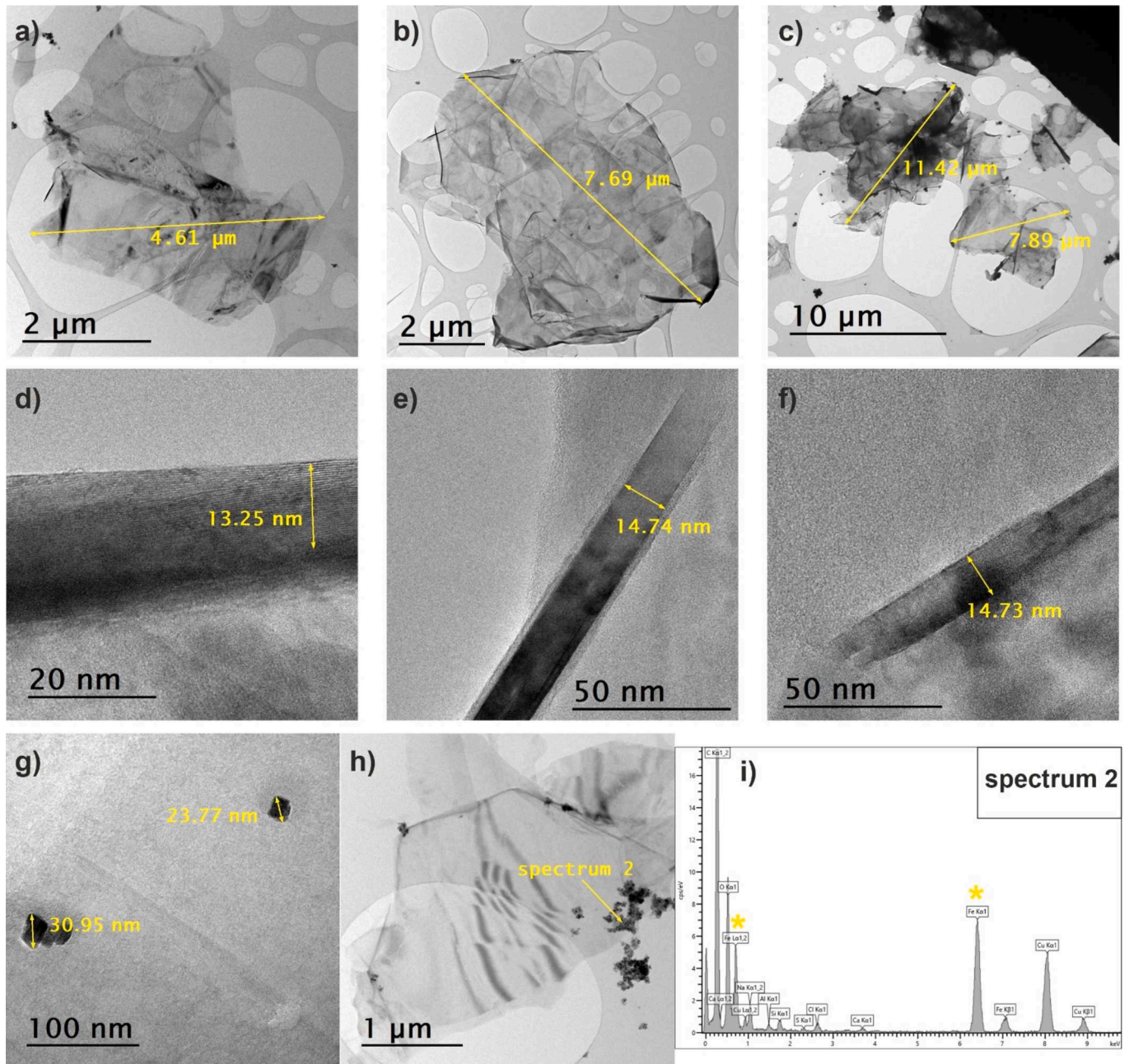


Fig. 2. Characterization by TEM of various graphene sheets with Fe_3O_4 nanoparticles. (a), (b), (c) TEM micrographs show the average lateral dimensions of graphene sheets, (d), (e), (f) HRTEM images show the average thickness of graphene sheets, (g) TEM micrograph shows the size and the shape of Fe_3O_4 nanoparticles, (h) TEM micrograph of graphene sheets with Fe_3O_4 nanoparticles and the location of the EDX spectrum (i) with corresponding peaks for Fe (yellow).

also obtained analytically by differentiating the $\rho(T)$ fittings. Within the studied temperature range, α_p coefficients take values ranging from $2.0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (at 293.15 K) to $3.4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (at 308.15 K). Nanofluids showed slight lower coefficients of thermal expansion, even if the maximum differences between studied fluids were lower than 0.1 K^{-1} .

As for the influence of graphene- Fe_3O_4 addition, density increases with the addition of the nanoparticles. Rises in ρ regarding the base fluid are similar for all investigated temperatures and reach the 0.10 % for the 0.100 wt% sample. Based on the classical theory for mixtures of ideal gases, Pak and Cho [49] proposed a mixing rule to predict the effective density of nanofluids. Such equation can be expressed as a function of nanoparticle mass fraction φ as follows:

$$\frac{1}{\rho_{nf}} = \frac{\varphi}{\rho_{np}} + \frac{1-\varphi}{\rho_{bf}} \quad (1)$$

where nf , np and bf subscripts stand for nanofluid, nanoparticles and base fluid (typically water here), respectively. In this case, the density of the dispersed nanoparticles was calculated using:

$$\frac{1}{\rho_{np}} = \frac{\varphi_{\text{graphene}}}{\rho_{\text{graphene}}} + \frac{\varphi_{\text{Fe}_3\text{O}_4}}{\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4}} \quad (2)$$

Considering that hybrid particles consisted of a mixture of graphene and Fe_3O_4 at a mass ratio of 70:30 and taking the density values of $\rho_{\text{graphene}} = 1820 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ for graphene [15] and $\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 5100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ for iron oxide (see Table 1, in agreement with reference [50]), a value of $\rho_{np} = 2255 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ was estimated by means of Eq. (2). Even if, in general, nanofluid experimental densities were slightly larger than expected according to Eq. (1), the maximum deviations were here lower than the experimental uncertainty. It is worst noting that density of both

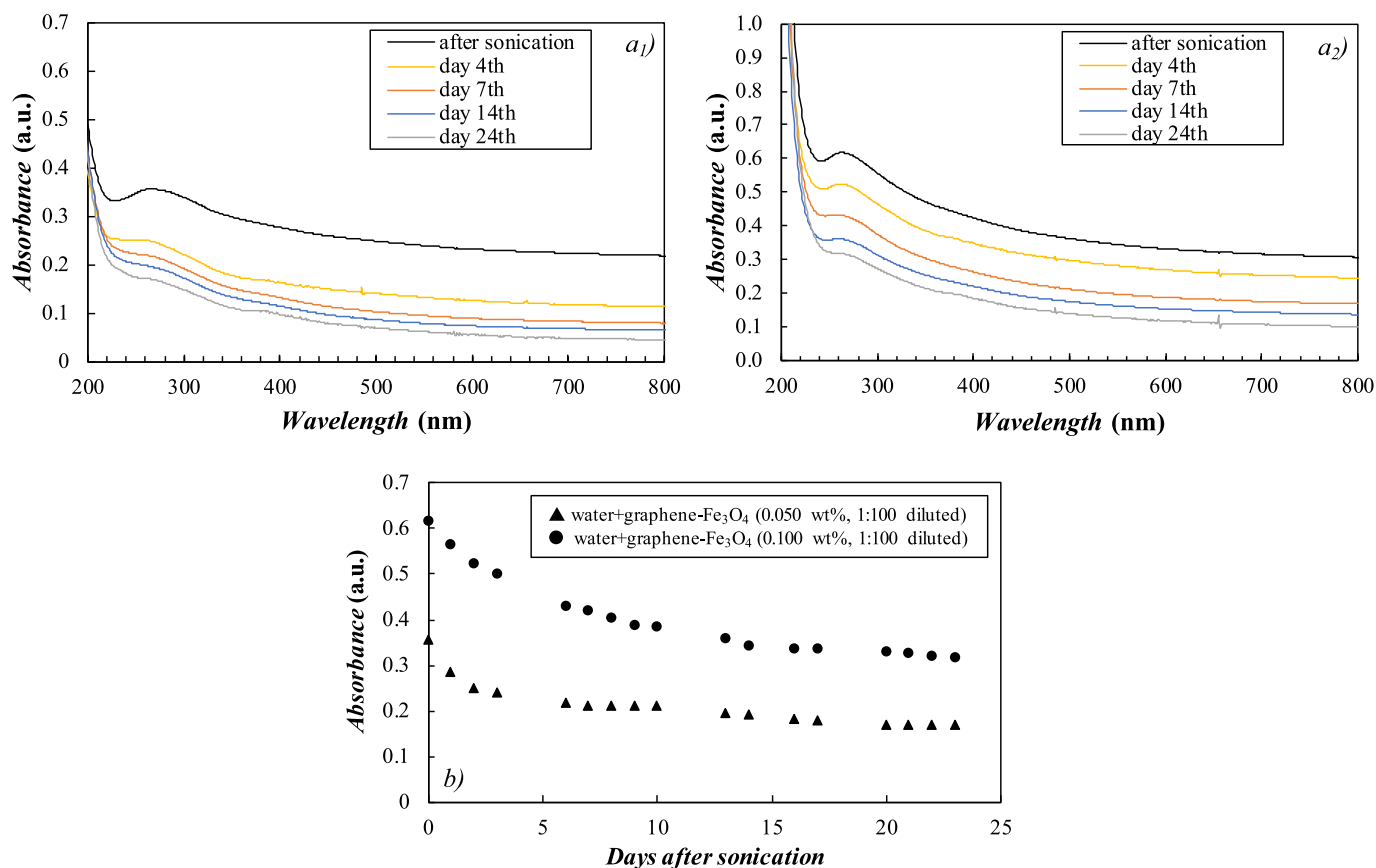


Fig. 3. (a) Representative absorbance spectra recorded for 1:100 dilutions of (a₁) 0.050 wt% and (a₂) 0.100 wt% graphene-Fe₃O₄ dispersions. (b) Temporal evolution of the absorbance (averaged values in the region of $\lambda = 260\text{--}270$ nm).

Table 2
Temporal evolution of Zeta Potential.

Samples (1:100 diluted)	ζ -potential (mV)			
	1st day	8th day	16th day	23th day
graphene-Fe ₃ O ₄ .0.005 wt%	-47.0 ± 1.9	-49.2 ± 1.0	-45.5 ± 1.2	-44.0 ± 1.8
graphene-Fe ₃ O ₄ .0.010 wt%	-45.2 ± 1.1	-47.2 ± 1.3	-45.9 ± 1.2	-43.6 ± 1.9
graphene-Fe ₃ O ₄ .0.025 wt%	-45.7 ± 0.9	-44.4 ± 0.6	-42.7 ± 1.2	-46.2 ± 1.0
graphene-Fe ₃ O ₄ .0.050 wt%	-47.6 ± 0.8	-46.1 ± 0.8	-45.9 ± 0.8	-47.1 ± 0.6
graphene-Fe ₃ O ₄ .0.100 wt%	-49.1 ± 1.6	-45.2 ± 1.1	-46.6 ± 0.3	-46.2 ± 0.5

surfactants, respectively karaya gum and CAPB, was not explicitly include in Eq.2 due to values similar to the one of water [37].

3.4. Surface tension of hybrid nanofluids

The study of ST properties provides insight into the mechanism of heat transfer enhancement and the interaction of surface fluids [51–53]. During the boiling process, part of the liquid vaporizes and forms bubbles, and ST plays an important role in bubble formation and detachment. The results are particularly contradictory concerning changes in ST following the addition of nanoparticles [26,45–49,54–57]. It is difficult to predict whether ST decreases or increases with the increase in nanoparticle mass fraction, and the causes of such behavior is not generalized as well. However, from a practical point of view, a decrease in ST is mostly favorable for heat transfer and heat flux improvement [33]. The present section aims to clarify this issue with the currently

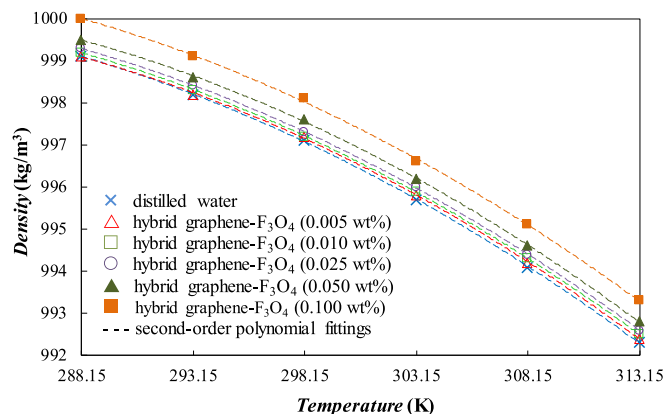


Fig. 4. Obtained densities for the graphene-Fe₃O₄ nanofluid set at various temperatures.

Table 3
Second-order polynomial adjustments of graphene-Fe₃O₄ nanofluid densities.

	Graphene-Fe ₃ O ₄ mass concentration				
	0.005 wt %	0.010 wt %	0.020 wt %	0.050 wt %	0.100 wt %
a_0 , kg/m ³	631.6	657.3	657.4	632.0	658.4
a_1 , kg/(m ³ ·K)	2.70	2.52	2.52	2.70	2.52
$-10^3 \cdot a_2$, kg/(m ³ ·K ²)	-4.93	-4.64	-4.64	-4.93	-4.64
$10^2 \cdot s$, kg/m ³	3.2	1.6	1.6	3.2	5.1

studied hybrid nanofluids. The ST of water, as a reference and yet reported in Fig. 1, mixture of water and surfactants at initial content, and the hybrid nanofluids composed of graphene and Fe₃O₄, with mass fractions of 0.005, 0.010, 0.025, 0.050, and 0.100 wt% was experimentally evaluated at temperatures ranging from 283.15 to 313.15 K. All these experimental data are gathered in Fig. 5.

First, Fig. 5 shows that the presence of the mixture of both surfactants, karaya gum and CAPB respectively, significantly reduces the ST of water by 29.3 % at 283.15 K, 30.2 % at 293.15 K, 35.0 % at 303.15 K and 37.0 % at 313.15 K. These results are generally expected with low viscous and polar fluid like water. Actually, as surfactant molecules are governed by Gibbs adsorption phenomena, they try to form monolayers at the interface and diminish the cohesive forces between liquid molecules, that results in the reduction of ST of the system. These findings agree also with those of Huminic et al. [35], who studied the influence of sodium carboxymethyl cellulose (CMCNa) surfactant on the ST of AgNP-rGO/water and AgNP-rGO/water + ethylene glycol nanofluids, and found that the presence of CMCNa significantly decreased the ST of the base fluid. Du et al. [22] also investigated the modification of the ST of a graphene-based aqueous nanofluid and its effects on the heat transfer process, focusing on the surfactants xanthan-gum (XTG), sodium carboxymethylcellulose (SCMC), and polyvinyl oxide (PEO). Their study demonstrated that, at a concentration of 0.5 %, the dispersant reduced the surface tension by 30.2 % (XTG), 19.9 % (SCMC), and 21.8 % (PEO) in the three systems compared to water. Ahammed et al. [27] have shown that the presence of surfactants also has an effect on the ST of graphene-based nanofluids in the temperature range from 283.15 to 363.15 K, and that the ST of nanofluids decreases in the presence of the surfactant SDBS (5 % vol.). Here, the decrease in ST of the mixture of surfactants and water is larger than in these previous works, and it is sensitive to temperature increase.

The interaction between nanoparticles and surfactants is complex due to the variety of possible involved phenomena and contributions [33]. The Fig. 5 shows the variation in surface tension for graphene-Fe₃O₄/water nanofluids at five nanoparticle concentrations (0.005, 0.010, 0.025, 0.050 and 0.100 wt%). Hence, it is clearly shown that the ST of the graphene-Fe₃O₄ water hybrid dispersions decreases with mass concentration in nanoparticles. In particular, compared to the initial distilled water mixture at 293.15 K, the surfactant results in a 30.2 % reduction. The hybrid solutions demonstrate similarly significant reductions, ranging from 27.1 % for 0.005 wt%, 29.5 % for 0.010 wt%, 33.3 % for 0.025 wt%, 35.4 % for 0.050 wt%, and reaching 41.7 % for 0.100 wt%.

Some theoretical models for liquid and nanofluids surface tension as well as empirical correlations were developed in the past as reported in

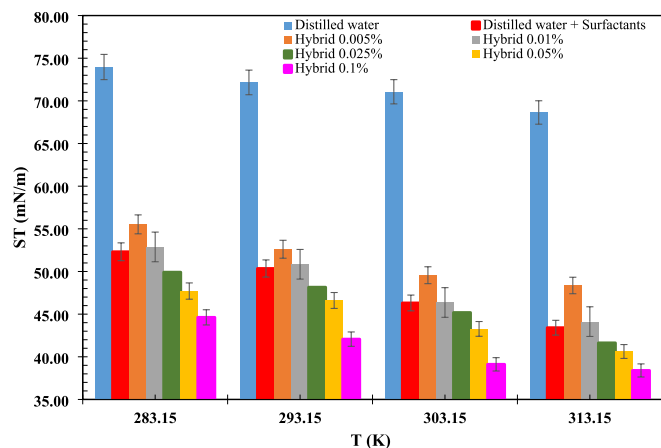


Fig. 5. Surface tension of distilled water, mixture of distilled water and surfactants, and hybrid graphene-Fe₃O₄ nanofluids in function of temperature. Error bars stand for standard deviation.

[26,27,33,34,58,59]. However, only two correlations refer to graphene nanofluids. The first one was developed by Tian et al. [26] for predicting the surface tension of a dispersion made of commercial graphene nanosheets (thickness 18–20 nm) within ethylene glycol. This correlation, depicted by Eq. (3), has been established for graphene mass content between 0.005 and 5 %, and temperature T (in °C) between 25 and 70 °C. In this equation, the ST is initially expressed in N/m.

$$\begin{aligned} \tau_{nf} = & 0.0503869 - 0.000228T - 0.0108072\phi + 3.365 \times 10^{-5}\phi T + 4.378 \\ & \times 10^{-6}T^2 + 0.00568072T^2 + 2.58 \times 10^{-7}T^2\phi - 9.942 \\ & \times 10^{-6}T\phi^2 - 3.668 \times 10^{-8}T^3 - 0.00073728\phi^3 \end{aligned} \quad (3)$$

The second one, given by the Eq. (4), was established by Ahammed et al. [27] for water based nanofluids containing commercial graphene (thickness 1–5 nm) and SDBS as surfactant. In this equation, T refers to the temperature in °C, and varies between 15 and 90 °C, T_∞ is the ambient temperature, taken at 20 °C and φ, defined by Eq. (5), is the nanoparticle volume fraction with the following values 0.05, 0.10 and 0.15 %. It should be noted that here the volume fraction of hybrid nanoparticles is calculated by Eq. (5).

$$\tau_{nf} = \tau_{bf} \times 0.493 \left(\frac{T_{\infty}}{T_{nf}} \right)^{0.163} \left(\frac{1}{\phi} \right)^{0.0884} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{\varphi \frac{\rho_{bf}}{\rho_{np}}}{(1 - \varphi) \left(1 - \frac{\rho_{bf}}{\rho_{np}} \right)} \quad (5)$$

Those correlations are compared to our experimental data in Fig. 6. It should be noted that here the volume fraction of hybrid nanoparticles varies between 0.0022 and 0.047 due to mass fraction considered in this study and density of hybrid nanostructures reported earlier in Section 3.3. It is evident from this figure that those correlations are unable to correctly predict our experimental data. The range of ST value provided by Eq. (3) does not agree with the experimental data, and the values from Eq. (4) are underpredicted. Several coupled reasons can explain such a great deviation, among them one can cite: different base fluid, use of hybrid graphene nanofluid rather than simple graphene nanofluid, dissimilarities in graphene type, dimensions, and structural quality, presence of surfactant, range of nanoparticle content, ...

Consequently, in absence of relevant equations, we propose here a new correlation based on the experimental results of ST of graphene-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids. A simple linear regression (LR) for predicting ST ratio for these nanofluids is used. The LR model was developed using a backward elimination approach, considering temperature and nanoparticle mass fraction as significant variables. Such a

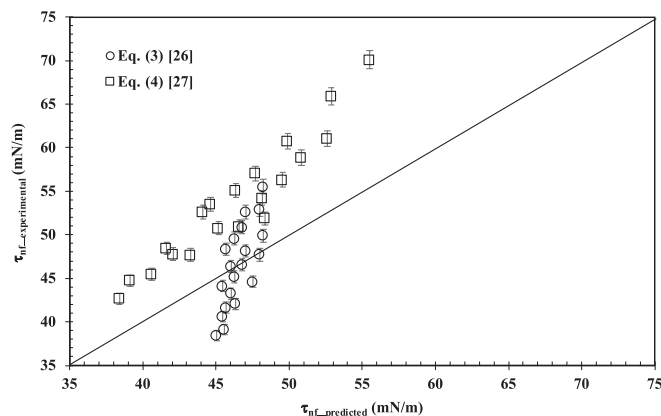


Fig. 6. Comparison between experimental surface tension data of graphene-Fe₃O₄ aqueous nanofluid and empirical prediction from Eq. (3) [26] and Eq. (4) [27].

correlation is expressed by Eq. (6):

$$\frac{\tau_{nf}}{\tau_{bf}} = 1.3168 - 0.002 \times T - 1.345 \times \varphi \quad (6)$$

where τ_{nf} and τ_{bf} are the surface tension of the hybrid nanofluids and base fluid –namely water-, respectively. T is the nanofluid temperature in Kelvin and φ is the nanoparticle mass fraction.

The accuracy of Eq. (6) was evaluated by the deviation margin following the Eq. (7). In this equation, the subscripts Exp. and Pred. represent the experimental and predicted values, respectively.

$$\text{Deviation margin (\%)} = \left[\frac{\left(\frac{\tau_{nf}}{\tau_{bf}} \right)_{\text{Exp}} - \left(\frac{\tau_{nf}}{\tau_{bf}} \right)_{\text{Pred}}}{\left(\frac{\tau_{nf}}{\tau_{bf}} \right)_{\text{Pred}}} \right] \quad (7)$$

Fig. 7 compares the results of the proposed equation with the experimental data over a temperature range of 283.15 to 313.15 K and for all nanoparticle contents. Most of the data points lie near or on the bisector, indicating a minimal difference between the experimental surface tension ratio and the values predicted by the Linear regression model (LR). The correlation well predicts surface tension ratio values with an absolute average deviation (AAD) of 2.48 % within the experimental conditions tested. In addition to deviation margin and AAD calculation, Fig. 8a displays both experimental and predicted values of surface tension ratio in function of temperatures and nanoparticle mass content. It is also observed a good accuracy of the proposed equation, the larger deviation being observed at lower nanoparticles content. Finally, as shown in Fig. 8b, the distribution of studentized residuals is expressed in function of predicted surface tension ratio. It is noticed that most of the residuals are centered around the “0” reference line. This indicates that the developed correlation is valid and adequately captures the trend of the data. Additionally, the figure demonstrates a fairly random distribution of residuals with respect to the run order, suggesting that the model effectively considers the temporal aspect of the data.

4. Conclusion

Aqueous hybrid nanofluids were synthesized as dispersions of graphene, which were initially obtained through the liquid phase exfoliation of graphite assisted by ultrasonication and the use of a mixture of surfactants, specifically karaya gum and cocoamidopropyl betaine. Additionally, commercial iron oxide nanoparticles were incorporated in a ratio 70/30. The morphologies and dimensions, as well as chemical species of both graphene and iron oxide nanostructures were characterized using transmission electron microscopy (TEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The stability of these hybrid

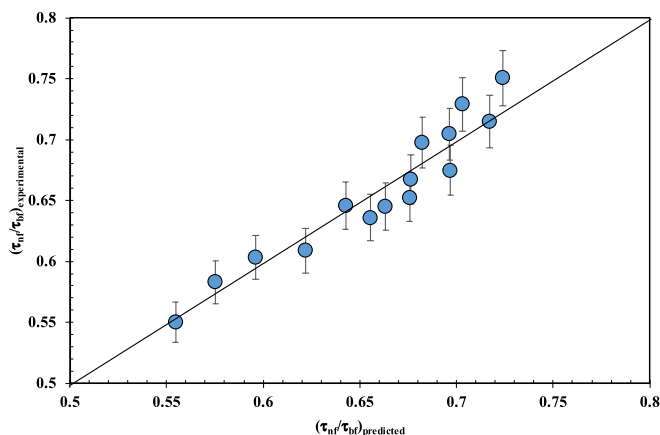


Fig. 7. Comparison between experimental and predicted surface tension ratio of graphene-Fe₃O₄ aqueous nanofluid.

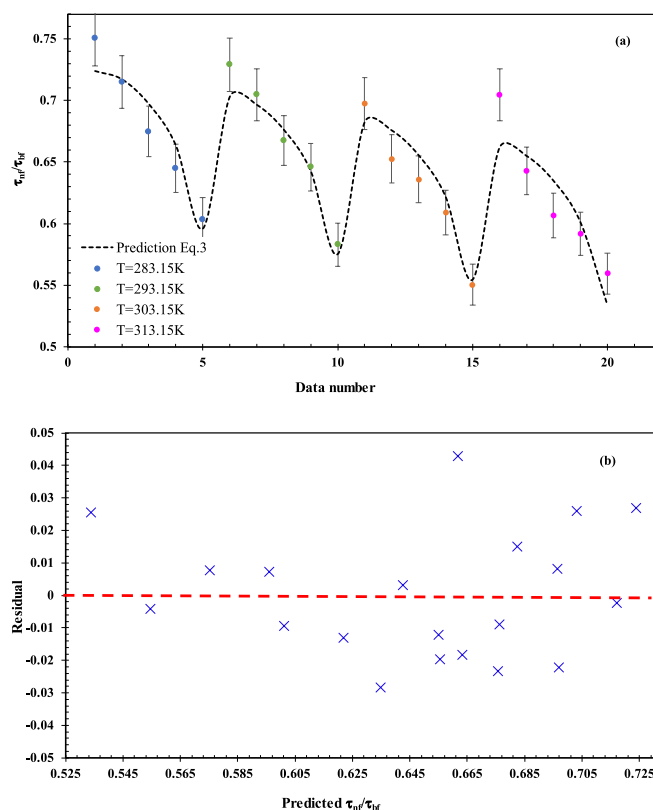


Fig. 8. (a) Evaluation of linear regression methodology accuracy by comparing predicted and experimental values of surface tension ratio of hybrid nanofluids at different temperatures; (b) residuals expressed in function of predicted surface tension ratio of hybrid nanofluids.

nanofluids was assessed through ultraviolet–visible (UV–Vis) spectrometry and zeta potential measurement, demonstrating significant colloidal stability. Then, as a preliminary parameter for surface tension measurement, the density of the graphene-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids was measured at temperatures ranging from 283.15 to 313.15 K and at various mass fractions of nanoparticles, including 0.005, 0.010, 0.025, 0.050, and 0.100 wt%. The density of all samples exhibited a consistent decrease with increasing temperature, averaging a reduction of 0.27 % for every 10 K increase. The incorporation of graphene-Fe₃O₄ nanoparticles only increased the nanofluid density by 0.10 % at a concentration of 0.100 wt%. The experimental density data were well-represented by a second-order polynomial, enabling the calculation of densities at specific temperatures for further analysis. The surface tension of these hybrid nanofluids were evaluated within the same concentration and temperature ranges. A significant reduction in surface tension was observed with the presence of nanoparticles, which enhanced the effectiveness of the surfactants. At the highest mass concentration of 0.100 wt%, reductions of 39.7 % at 283.15 K, 41.7 % at 293.15 K, 45.0 % at 303.15 K, and 44.1 % at 313.15 K was highlighted. Finally, a linear empirical model was proposed to predict the experimental data with a mean deviation of 2.5 %. These findings provide a foundational basis for investigating the impact of graphene-Fe₃O₄ nanofluids on heat transfer performance across different heat exchanger configurations, from both experimental and numerical aspects. Future work will aim to complement these findings with an examination of the thermal and rheological properties of these hybrid nanofluids, and potential influence of magnetic field on those properties.

CRediT authorship contribution statement

Soulayma Gal: Writing – original draft, Visualization, Validation,

Investigation, Formal analysis, Data curation. **David Cabaleiro**: Writing – original draft, Visualization, Validation, Investigation, Formal analysis, Data curation. **Walid Hassen**: Writing – review & editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition. **Ludivine Rault**: Writing – review & editing, Visualization, Investigation, Formal analysis. **Housseinou Ba**: Writing – review & editing, Visualization, Resources. **Patrice Estellé**: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Supervision, Project administration, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

Soulayma Gal, Walid Hassen and Patrice Estellé gratefully acknowledge the financial support of CMCU and Campus France through the grant n°23G1111 from the PHC Utique. Soulayma Gal also acknowledges Rennes Métropole for its financial support through the PhD student incoming mobility grants received in 2022 and 2023. David Cabaleiro is a recipient of a “Juan de la Cierva” contract (Reference IJC2020-043779-I) funded by MICIU/AEI/10.13039/501100011033 and the European Union NextGenerationEU/PRTR.

Data availability

Data will be made available on request.

References

- N. Ali, A.M. Bahman, N.F. Aljuwayhel, S.A. Ebrahim, S. Mukherjee, A. Alsayegh, Carbon-based nanofluids and their advances towards heat transfer applications—a review, *Nanomaterials* 11 (2021) 1628, <https://doi.org/10.3390/nano11061628>.
- P. Kanti, A.A. Minea, K.V. Sharma, M. Revanasiddappa, Improved thermophysical properties of Graphene Ionanofluid as heat transfer fluids for thermal applications, *Ion. Liq.* 2 (2022) 100038, <https://doi.org/10.1016/j.jil.2022.100038>.
- R. Sajjad, M. Hussain, Sami Ullah Khan, Abdul Rehman, Muhammad Jahangir Khan, Iskander Tlili, Sami Ullah, CFD analysis for different nanofluids in fin prolonged heat exchanger for waste heat recovery, *S. Afr. J. Chem. Eng.* 47 (2024) 9–14, <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.10.005>.
- V.A. Martínez, D.A. Vasco, C.M. García-Herrera, Roberto Ortega-Aguilera, Numerical study of TiO₂-based nanofluids flow in microchannel heat sinks: effect of the Reynolds number and the microchannel height, *Appl. Therm. Eng.* 161 (2019) 114130, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114130>.
- T. Iqbal, M. Zafar, M. Ijaz, Use of nano fluids in nuclear technology: a review, *Pak. J. Sci. Ind. Res.* 64 (2) (2021) 149–160, <https://doi.org/10.52763/pjsir.phys.sci.64.2.2021.149.160>.
- A. Kasaiean, A. Toghi Eshghi, Mohammad Sameti, A review on the applications of nanofluids in solar energy systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43 (2015) 584–598, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.020>.
- H. Antonio, Castro Neto, Francisco Guinea, Nuno Peres, Konstantin Novoselov, Andre Geim, The electronic properties of graphene, *Rev. Mod. Phys.* 81 (2009) 109, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.109>.
- O.A. Alawi, N.A.C. Sidik, S.N. Kazi, G. Najafi, Graphene nanoplatelets and few-layer graphene studies in thermo-physical properties and particle characterization, *J. Therm. Anal. Calorim.* 135 (2019) 1081–1093, <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7585-0>.
- F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, A.C. Ferrari, Graphene photonics and optoelectronics, *Nat. Photon* 4 (2010) 611–622, <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.186>.
- S. Hamze, N. Berrada, D. Cabaleiro, A. Desforges, J. Ghanbaja, J. Gleize, D. Bégin, F. Michaux, T. Maré, B. Vigolo, P. Estellé, Few-layer graphene-based nanofluids with enhanced thermal conductivity, *Nanomaterials* 10 (2020) 1258, <https://doi.org/10.3390/nano10071258>.
- N. Ali, Graphene-based nanofluids: production parameter effects on thermophysical properties and dispersion stability, *Nanomaterials* 12 (2022) 357, <https://doi.org/10.3390/nano12030357>.
- Seyed Hadi Pourhoseini, H. Ramezani-Aval, N. Naghizadeh, FHD and MHD effects of Fe₃O₄-water magnetic nanofluid on the enhancement of overall heat transfer coefficient of a heat exchanger, *Phys. Scr.* 95 (2020) 045705 <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab6eb6>.
- Z. Shi, S. Qing, Z. Luo, Y. Liu, J. Li, Thermal physical and magnetic properties of water-based yolk-shell Fe₃O₄@C nanofluids, *Inorg. Chem. Commun.* 151 (2023) 110562, <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110562>.
- B. Kichatov, A. Korschunov, V. Sudakov, A. Golubkov, A. Kolobov, L. Chikishev, Magnetic nanofluid Fe₃O₄ in passive cooling system based on thermo-osmotic effect, *Thermal Sciences* 199 (2024) 108931, <https://doi.org/10.1016/j.jthermalsci.2024.108931>.
- S. Hamze, D. Cabaleiro, D. Bégin, A. Desforges, T. Maré, B. Vigolo, L. Lugo, P. Estellé, Volumetric properties and surface tension of few-layer graphene nanofluids based on a commercial heat transfer fluid, *Energies* 13 (2020) 3462, <https://doi.org/10.3390/en13133462>.
- S. Hamze, N. Berrada, A. Desforges, B. Vigolo, J. Gleize, J. Ghanbaja, T. Maré, D. Cabaleiro, P. Estellé, Dynamic viscosity of purified multi-walled carbon nanotubes water and water-propylene glycol-based nanofluids, *Heat Transfer Eng.* 42 (2020) 1663–1674, <https://doi.org/10.1080/01457632>.
- D. Cabaleiro, J. Nimo, M.J.P. Gallego, M.M. Piñeiro, JI Legido, Luis Lugo, Thermal conductivity of dry anatase and rutile nano-powders and ethylene and propylene glycol-based TiO₂ nanofluids, *Chem. Thermodyn.* 83 (2015) 67–76, <https://doi.org/10.1016/j.ct.2014.12.001>.
- H.H.A. Mansoor, S.R. Devarapu, R. Samuel, J.S. Sangwai, Swaminathan Ponmani, Investigation of chia based copper oxide nanofluid for water based drilling fluid: an experimental approach, *Nat. Gas Sci. Eng.* 107 (2022) 104775, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104775>.
- Mehrdad Karimzadehkhouei, Morteza Ghorbani, Meltem Sezen, Kürşat Şendur, M. Pinar Mengüç, Yusuf Leblebici, Ali Koşar, Increasing the stability of nanofluids with cavitating flows in micro orifices, *Appl. Phys. Lett.* 109 (2016) 104101, doi: 10.1063/1.4962330.
- S. Chena, K. Liu, C. Liu, D. Wang, D. Ba, Y. Xie, Du. Guangyu, Y. Ba, Q. Lin, Effects of surface tension and viscosity on the forming and transferring process of microscale droplets, *Appl. Surf. Sci.* 388 (2016) 196–202, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.205>.
- C. Galusinski, P. Vigneaux, On stability condition for bifluid flows with surface tension: application to microfluidics, *Comput. Phys.* 227 (2008) 6140–6464, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2008.02.023>.
- Du. Wenqiao, J. Ma, W. Wang, L. Zhang, Surface-tension change of graphene-based water nanofluid and its effects on heat-transfer process, *Mole. Liq.* 392 (2023) 123457, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123457>.
- Y. Liu, B. Chen, D. Wang, N. Jiang, J. Tan, Fu. Jing, Wu. Baohui, Hu. Yuanhao, Zhihong Guo, Surface tension of supercooled graphene oxide nanofluids measured with acoustic levitation, *Therm. Anal. Calorim.* 144 (2020) 1369–1379, <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09659-y>.
- Suhaib Umer Ilyas, Syahrir Ridha, Firas Ayad Abdul Kareem, Dispersion stability and surface tension of SDS-Stabilized saline nanofluids with graphene nanoplatelets, *Colloids Surf. A* 592 (2020) 124584, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124584>.
- D. Cabaleiro, P. Estellé, H. Navas, A. Desforges, B. Vigolo, Dynamic viscosity and surface tension of stable graphene oxide and reduced graphene oxide aqueous nanofluids, *Nanofluids* 7 (2018) 1081–1088, <https://doi.org/10.1166/jon.2018.1539>.
- X.-X. Tian, R. Kalbasi, R. Jahanshahi, C. Qi, H.-L. Huang, S. Rostami, Competition between intermolecular forces of adhesion and cohesion in the presence of graphene nanoparticles: investigation of graphene nanosheets/ethylene glycol surface tension, *Mole. Liq.* 311 (2020) 113329, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113329>.
- N. Ahammed, Lazarus Godson Asirvatham, Somchai Wongwises, Effect of volume concentration and temperature on viscosity and surface tension of graphene–water nanofluid for heat transfer applications, *Therm. Anal. Calorim.* 123 (2015) 1399–1409, <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5034-x>.
- A. Kujawska, R. Mulka, S. Hamze, G. Żyła, B. Zajaczkowski, M.H. Buschmann, P. Estellé, The effect of boiling in a thermosyphon on surface tension and contact angle of silica and graphene oxide nanofluids, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 627 (2021) 127082, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127082>.
- A. Banisharif, M. Aghajani, S. Van Vaerenbergh, P. Estellé, Alimorad Rashidi, Thermophysical properties of water ethylene glycol (WEG) mixturebased Fe₃O₄ nanofluids at low concentration and temperature, *Mole. Liq.* 302 (2020) 112606, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112606>.
- Dan Chicea, C.M. Goncea, On aqueous Fe₃O₄ nanofluid room temperature synthesis and physical properties, *Optoelectron. Adv. Mater.* 3 (2009) 185–189.
- Yu. Jiang, Mohsen Tahmasebi Sulgani, Ramin Ranjbarzadeh, Arash Karimpour, Truong Khang Nguyen, Hybrid GMDH-type neural network to predict fluid surface tension, shear stress, dynamic viscosity & sensitivity analysis based on empirical data of iron (III) oxide nanoparticles in light crude oil mixture, *Phys. A* 526 (2019) 120948, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.184>.
- A. Saptoro, Y. Kanazawa, M. Asada, Y. Asakuma, C. Phan, Microwave irradiation based non chemical method to manipulate surface tension of nanofluids, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 72 (2016) 228–234, <https://doi.org/10.1016/j.exptthermfluidsci.2015.11.015>.
- P. Estellé, D. Cabaleiro, G. Żyła, S.M. Luis Lugo, S. Murshed, Current trends in surface tension and wetting behavior of nanofluids, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94 (2018) 931–944, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.006>.
- Su. Guifu, L. Yang, S. Liu, J. Song, W. Jiang, X. Jin, Review on factors affecting nanofluids surface tension and mechanism analysis, *Mole. Liq.* 407 (2024) 125159, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125159>.
- G. Huminic, A. Huminic, A. Vardaru, C. Fleaca, F. Dumitrache, I. Morjan, Surface tension of Ag NPs-rGO based hybrid nanofluids, *Mole. Liq.* 390 (2023) 123002, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123002>.

- [36] N. Nayeypashae, M. Hadavi, Thermal conductivity and surface tension of graphene- Al_2O_3 /ethylene glycol-water hybrid nanofluid at sub-zero temperatures: an experimental study, *Therm. Anal. Calorim.* 147 (2022) 13039–13057, <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11587-y>.
- [37] S. Gal, D. Cabaleiro, W. Hassen, A. Nasri, Y. Lafue, C. Pham-Huu, H. Ba, P. Estellé, Thermophysical profile of industrial graphene water-based nanofluids, *Nanomaterials* 14 (2024) 1401, <https://doi.org/10.3390/nano14171401>.
- [38] V. Singh, T. Malviya, Surabhi Gupta Shehala, Lalit Mohan Dwivedi, Polysaccharide-based nanoparticles: nanocarriers for sustained delivery of drugs, *Adv. Biopolym. Syst. Drug Deliv.* (2020) 151–181, https://doi.org/10.1007/978-3-030-46923-8_7.
- [39] Muhd Al-Hafiz Mohd Shariff, Yuzairi Abdul Rahim, Asyraf Mahboob Ali, A. N. M. Khalil, Azwan Iskandar Azmi, Hadisah M. Salleh, «Effect of Coco Amido Propyl Betaine (CAPB) on Thermal Conductivity of Bio-Based Hybrid Nanolubricant, *Intelli. Manuf. Mechatron.* 2021, p. 373–380, doi: 10.1007/978-981-16-0866-7_32.
- [40] G. Unsoy, S. Yalcin, R. Khodadust, G. Gunduz, U. Gunduz, Synthesis optimization and characterization of chitosan-coated iron oxide nanoparticles produced for biomedical applications, *J. Nanopart. Res.* 14 (2012) 964, <https://doi.org/10.1007/s11051-012-0964-8>.
- [41] Iron Oxide (Fe_3O_4) Nanopowder/Nanoparticles, <https://nanografi.com/nanoparticles/iron-oxide-fe3o4-nanopowder-nanoparticles-purity-98-45-size-18-28-nm/assessed-on-27-August-2024>.
- [42] R. Gómez-Villarejo, T. Aguilar, S. Hamze, P. Estellé, J. Navas, Experimental analysis of water-based nanofluids using boron nitride nanotubes with improved thermal properties, *Mole. Liq.* 277 (2019) 93–103, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.12.093>.
- [43] N.B. Vargaftik, Bc. Nikolay Volkov, L.D. Voljak, International tables of the surface tension of water, *Phys. Chem. Ref. Data* 12 (2009) 817–820, <https://doi.org/10.1063/1.555688>.
- [44] M. Abdolkarimi-Mahabadi, A. Bayat, A. Mohammadi, Use of UV-vis spectrophotometry for characterization of carbon nanostructures: a review, *Theor. Exp. Chem.* 57 (2021) 191–198, <https://doi.org/10.1007/s11237-021-09687-1>.
- [45] M. Cayambe, C. Zambrano, T. Tene, M. Guevara, G.T. Usca, H. Brito, R. Molina, D. C. Coello-Fiallos, C. Lorenzo Caputi, V. Gomez, Dispersion of graphene in ethanol by sonication, *Mater. Today Proc.* 37 (2021) 4027–4030, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.441>.
- [46] Desireé De los Santos, Juan Jesús Gallardo, Iván Carrillo-Berdugo, Rodrigo Alcántara, Patrice Estellé, Saray Gragera, María Gragera, Javier Nava, Nanofluids based on Pd nanoparticles and a linear silicone-based fluid: toward highly efficient heat transfer fluids for concentrated solar power, *ACS Sust. Chem. Eng.* 12 (2024) 2375–2385, <https://doi.org/10.1021/acsschemeng.3c07285>.
- [47] J. Wang, X. Yang, Jirí Jaromír Kleme, Bengt Sundén, Ke Tian, Ting Ma, A review on nanofluid stability: preparation and application, *Mater. Today Proc.* 188 (2023) 113854, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.371> 2214-7853.
- [48] V. Singh, A. Kumar, M. Alam, A. Kumar, P. Kumar, V. Goyat, A study of morphology, UV measurements and zeta potential of Zinc Ferrite and Al_2O_3 nanofluids, *Mater. Today Proc.* 59 (2022) 1034–1039, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.371>.
- [49] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Exp. Heat Transfer: J. Therm. Energy Gener. Transport Storage Convers.* (2007) 151–170, <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>.
- [50] E. Fatmawati, Siti Nur Halizah, Nadiya Miftachul Chusna, Putri Yuliana, Sunaryono Sunaryono, Crystal structure, morphology, and magnetic properties of magnetic nanocomposites with iron oxide core and zinc oxide/titanium oxide shell, *Metastable Nanocryst. Mater.* 38 (2024) 1–14, 10.4028/p-60eL85.
- [51] D. Ciloglu, A. Bolukbasi, A comprehensive review on pool boiling of nanofluids, *Appl. Therm. Eng.* 84 (2015) 45–63, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.063>.
- [52] Du. Jianqiang, W. Yang, H. Zhu, J. Wang, Z. Cao, Bengt Sundén, «Experimental study of pool boiling performance of Fe_3O_4 ferromagnetic nanofluid on a copper surface», *Appl. Therm. Eng.* 248 (2024) 123213 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123213>.
- [53] T. Karayiannis, M. Mahmoud, Flow boiling in microchannels: fundamentals and applications, *Appl. Therm. Eng.* 115 (2017) 1372–1397, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.063>.
- [54] Seonggon Kim, Ronghuan Xu, Wonhyeok Lee, Yong Tae Kang, Mass transfer performance enhancement by nanoabsorbents during CO_2 absorption process, *Int. J. Heat Mass Transfer* 137 (2019) 1–11, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.098.
- [55] Dongsheng Zhu, Shuying Wu, Nan Wang, Thermal physics and critical heat flux characteristics of Al_2O_3 - H_2O nanofluids, *Heat Transfer Eng.* 31 (2010) 1213–1219, doi: 10.1080/01457631003733019.
- [56] Yue Li, Weilin Zhao, Yuying Gong, Experimental investigation on the surface tension and contact angle of Al_2O_3 -oil and SiO_2 -oil nanofluids, *Int. J. Nanomanuf.* 15 (2019) 80–91, doi: 10.1504/IJNM.2019.097241.
- [57] Yu Jiang, Mohsen Tahmasebi Sulgani, Ramin Ranjbarzadeh, Arash Karimipour, Truong Khang Nguyen, Hybrid GMDH-type neural network to predict fluid surface tension, shear stress, dynamic viscosity & sensitivity analysis based on empirical data of iron(II) oxide nanoparticles in light crude oil mixture, *Physica A* 526 (2019) 120948, doi: 10.1016/j.physa.2019.04.184.
- [58] A.R. Harikrishnan, P. Dhar, P.K. Agnihotri, S. Gedupudi, S.K. Das, Effects of interplay of nanoparticles, surfactants and base fluid on the surface tension of nanocolloids, *Euro. Phys. J. E* 40 (2017), <https://doi.org/10.1140/epje/i2017-11541-5>.
- [59] J. Traciak, G. Żyła, Effect of nanoparticles saturation on the surface tension of nanofluids, *Mole. Liq.* 40 (2022) 119937, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119937>.

II.4 Conductivité thermique des nanofluides hybrides

Dans cette section, en complément des résultats précédents, nous étudions la conductivité thermique des nanofluides hybrides à base de graphène et Fe_3O_4 en suspension dans l'eau distillée, afin d'évaluer l'effet du tensioactif, de la concentration massique des nanoparticules, ainsi que de la température sur cette propriété. Le protocole expérimental utilisé ici est identique à celui détaillée précédemment dans la section II.2 [1]. Par conséquent, il ne sera pas détaillé à nouveau.

II.4.1 Effet de surfactant

Pour étudier l'influence du type de surfactant sur la conductivité thermique des nanofluides, nous avons comparé une solution d'eau distillée contenant le surfactant, à savoir la gomme karaya et la cocoamidopropylbétaine (CAPB) correspondant au nanofluide contenant 0.1% en masse de nanoparticules [2] à celui de l'eau distillée dans une plage de température de 283,15 K à 313,15 K. La Figure II.1 montre que la conductivité thermique de deux solutions présente un écart négligeable confirmant que le surfactant n'a pas d'effet significatif sur la conductivité thermique de l'eau distillée. Il est considéré qu'il en est de même pour les fluides de base dilués, et les conductivités thermiques des nanofluides sera ainsi comparée à celle de l'eau.

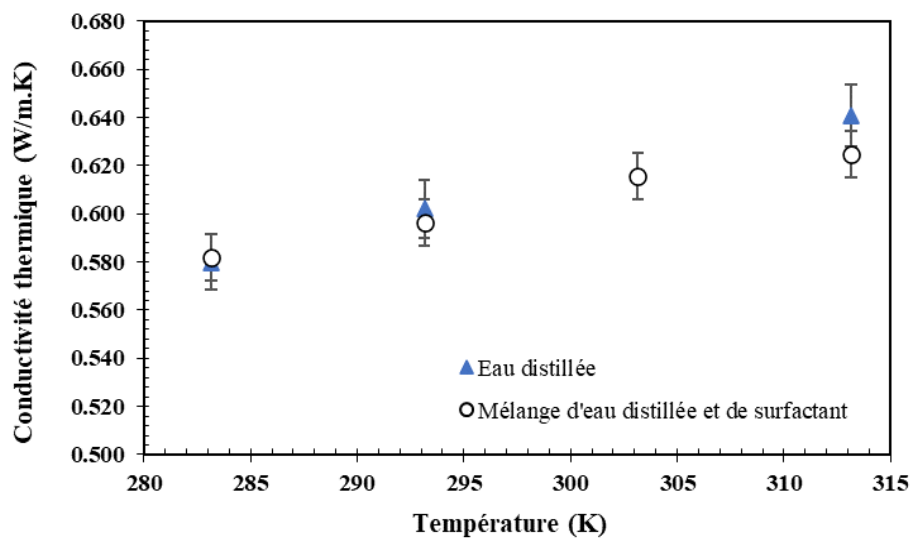


Figure II.1. Conductivité thermique de l'eau distillée vs, Eau distillée avec tensioactif

II.4.2 Effet de la concentration de nanoparticules et de la température

La conductivité thermique du nanofluide graphène- Fe_3O_4 (70/30) dispersé dans l'eau distillée a été mesurée sur une plage de températures allant de 283,15 K à 313,15 K, avec des concentrations massiques variant entre 0,005 % et 0,1 %. Comme illustré dans la Figure II.2, la conductivité thermique des nanofluides augmente à la fois avec la concentration massique et la température. Une amélioration maximale d'environ 6 % est observée à une concentration de 0,1 % à 283,15 K, ce qui s'explique par la conductivité thermique élevée des nanoparticules de graphène et de Fe_3O_4 , ainsi que par l'augmentation du mouvement brownien des particules à des températures plus élevées. Bien que le nanofluide graphène- Fe_3O_4 améliore la conductivité thermique de l'eau, cet effet reste cependant inférieur à celui du graphène seul, qui atteint 10 % d'amélioration à 0,005 % à 283,15 K comme mentionné dans l'article [1]. Cette différence peut être

attribuée à une épaisseur plus importante du graphène constituant le nanofluid hybride [2] par rapport à celle du FLG seul [1] dispersé, ainsi que par la conductivité thermique intrinsèquement plus faible des nanoparticules de Fe₃O₄ par rapport à celle du graphène [3] ainsi qu'à la présence de plis, comme le suggèrent certains travaux [4], [5], [6], qui pourraient également contribuer à cette diminution de performance. Des tendances similaires à celles rapportées par Borode et al. [7], ont été observées concernant l'influence de la température et de la fraction massique sur la conductivité thermique des nanofluides hybrides GNP–Fe₃O₄. Ces auteurs ont montré que la conductivité thermique augmente avec la température et la proportion de nanoplaquettes de graphène (GNP), avec une performance optimale pour le ratio GNP–Fe₃O₄ (50 :50) à basse température (288.15–293.15 K), et pour le ratio GNP–Fe₃O₄ (75 :25) à des températures plus élevées. Al-Rabeeh et al. [8], ont montré que la conductivité thermique d'un nanofluid hybride graphène–Fe₃O₄/eau augmente avec la concentration et la température, atteignant un gain maximal de 34 % à 0,5 % et 333,15 K. Rashidi et al. [3], ont également observé que la conductivité thermique des nanofluides Fe₃O₄/graphène augmente avec la fraction massique et la température. Par exemple, à 313,15 K, la conductivité thermique de l'eau est de 0,59 W/m·K, tandis que pour le nanofluid Fe₃O₄/Graphène à 0,1 wt.%, elle atteint 0,64 W/m·K (+8,5 %), et à 1 wt.%, elle atteint 0,78 W/m·K (+32,2 %).

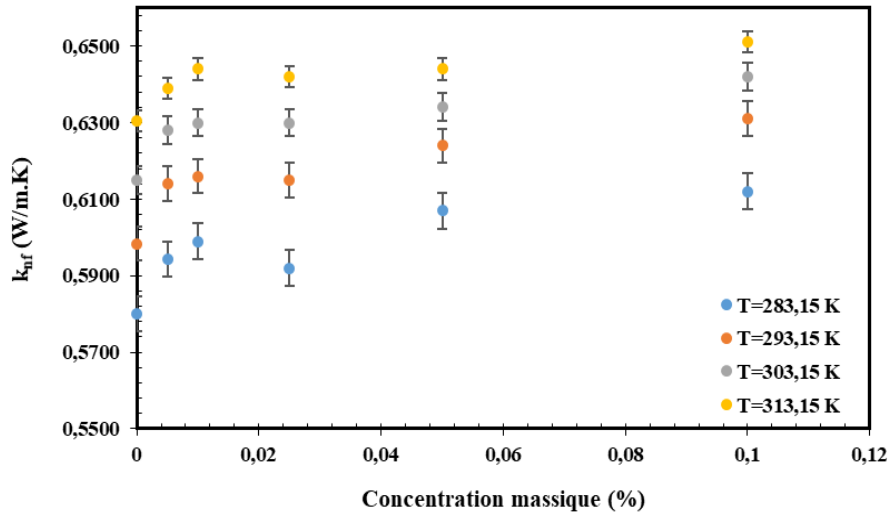


Figure II.2. Evolution de la conductivité thermique du nanofluid graphène -Fe₃O₄/eau en fonction de la température et concentration

Les données de conductivité thermique des nanofluides hybrides graphène-Fe₃O₄, mesurées pour différentes concentrations et températures, ont permis d'établir une relation linéaire entre la conductivité, la fraction massique et la température à l'aide d'un modèle de régression linéaire. L'Eq II.1 suivante présente une précision acceptable, avec un coefficient de détermination R² = 0,83 :

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 0,257, \varphi_m - 0,005, T + 1,172 \quad \text{Eq II.1}$$

Où, k_{nf} désigne respectivement la conductivité thermique du nanofluid hybride et k_{bf} celle de l'eau distillée, T représente la température du nanofluid en Kelvin, et φ_m la fraction massique de nanoparticule.

Pour évaluer la précision de cette corrélation, nous avons employé une analyse de l'écart relatif du rapport de conductivité thermique. L'Eq II.2 suivante permet d'estimer la disparité entre les résultats expérimentaux et ceux prédits par notre modèle :

$$\text{Marge de déviation (\%)} = \left[\frac{\left(\frac{k_{nf}}{k_{bf}}\right)_{\text{exp}} - \left(\frac{k_{nf}}{k_{bf}}\right)_{\text{Pred}}}{\left(\frac{k_{nf}}{k_{bf}}\right)_{\text{Pred}}} \right] * 100\% \quad \text{Eq II.2}$$

Dans cette équation, "Exp," et "Pred," font référence aux valeurs expérimentales et prédites par la corrélation proposée. La marge de déviation moyenne du rapport de conductivité thermique est de 0,344 %, tandis que l'écart moyen absolu (ADD) en pourcentage est de 0,345 %, ce qui témoigne de la bonne qualité de notre corrélation empirique.

La Figure II.3, présente une comparaison entre les rapports de conductivité thermique obtenus à partir de notre équation et les données expérimentales. La majorité des points se situe près de la ligne bissectrice. Ces résultats confirment la fiabilité de notre modèle, avec un écart-type faible de 0,00521 entre les valeurs prédites et observées, avec une déviation maximale de 1,37 % pour des concentrations massiques comprises entre 0,025 % et 0,5 % à $T = 283,15$ K.

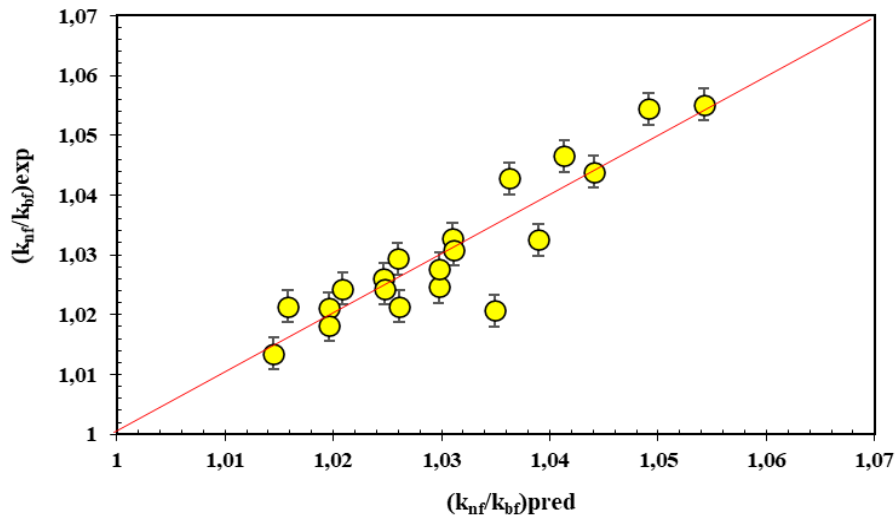


Figure II.3. Comparaison entre les données expérimentales et les résultats de corrélation de ratio de la conductivité thermique à différentes températures

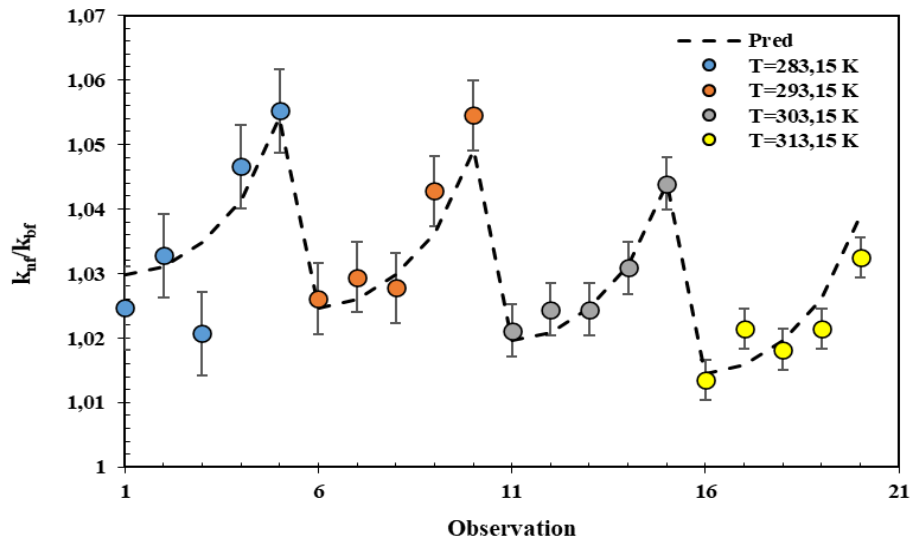


Figure II.4. Évaluation de la précision de la régression linéaire par comparaison des valeurs prédites et expérimentales de la conductivité thermique des nanofluides hybrides à différentes températures

Dans un modèle de régression linéaire, les résidus représentent les écarts entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle. Ils sont essentiels pour évaluer la qualité de l'ajustement du modèle. Une analyse appropriée des résidus permet de vérifier les hypothèses sous-jacentes de la régression linéaire et de s'assurer que le modèle est bien adapté aux données. Les résidus sont définis comme la différence entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle, comme exprimé dans l'Eq II.3 suivante :

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad \text{Eq II.3}$$

Où, e_i est le résidu de l'observation i , y_i est la valeur observée et \hat{y}_i est la valeur prédite par le modèle pour cette observation.

La Figure II.5 présente les valeurs résiduelles, qui, idéalement, devraient toutes être nulles. On observe que la majorité des points se situent près de la ligne zéro, avec seulement deux valeurs présentant des écarts plus grands. Cette distribution des résidus en fonction de l'ordre des mesures, de la température et de la concentration massique montre que le modèle capture bien la dynamique des données, sans indiquer de biais systématique.

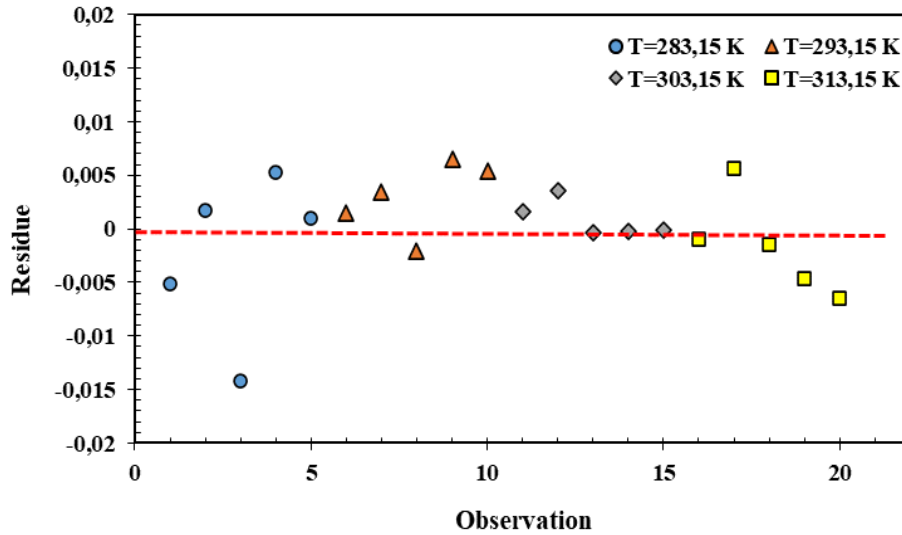


Figure II.5. Résidus en fonction des valeurs prédites de la viscosité dynamique des nanofluides hybrides

II.5 Capacité calorifique

La capacité thermique spécifique, notée C_p , a été déterminée expérimentalement pour les nanoparticules de graphène/ Fe_3O_4 sous forme sèche, obtenue par étuvage de la suspension la plus concentrée, ainsi que pour les nanofluides hybrides, dans une plage de températures allant de 283,15 K à 323,15 K. Le protocole expérimental est ici aussi identique à celui exploité précédemment dans [1]. Pour le graphène/ Fe_3O_4 sous forme sèche, les valeurs de C_p ont été mesurées entre 833 J/(kg,K) à 283,15 K et 971 J/(kg,K) à 323,15 K. Ces valeurs sont approximativement 7 % inférieures à celles rapportées par Gal et al. [1] pour le graphène à quelques couches (FLG). Cette différence est attribuée à la capacité thermique spécifique relativement faible de l'oxyde de fer Fe_3O_4 , qui est estimée à environ 650-660 J/(kg,K) à 323,15 K [9], [10], ainsi que par le fait que les matériaux à base de carbone, comme le graphène, présentent généralement des capacités thermiques plus élevées. Par exemple Lugo et al. [11] ont montré que la capacité calorifique de nanoplaquettes de graphène dispersées dans l'eau pure à 293,15 K atteint 4180 J/(kg·K) à une concentration de 0,25 % en masse, et 4150 J/(kg·K) à 1 %. De même Aleksein et al. [12] ont rapporté une capacité calorifique du FLG de 4250 J/(kg·K) à 293,15 K, et de 4000 J/(kg·K) à 313,15 K, pour une concentration massique de 0,2 %.

Les résultats concernant les nanofluides hybrides sont présentés dans la Figure II.6, en comparaison avec ceux de l'eau distillée. Les capacités thermiques spécifiques des nanofluides suivent une évolution similaire à celle de l'eau en fonction de la température, avec des écarts maximaux de l'ordre de 0,5 % dans l'intervalle de 313,15 à 323,15 K. L'ajout de nanoparticules hybrides induit une légère diminution de cette propriété par rapport à l'eau distillée. Par exemple, pour une concentration de 0,010 wt. % en nanoparticules hybrides, la valeur de C_p est inférieure de 0,2 à 0,3 %. À une concentration plus élevée (0,1 wt. %), cette diminution atteint 2,2 à 2,4 %, une variation toutefois comparable à l'incertitude expérimentale. Des observations similaires ont été rapportées par Tlili et al. [13], qui ont montré que l'eau présente une capacité calorifique supérieure à celle des nanoparticules de graphène (GO) et de Fe_3O_4 .

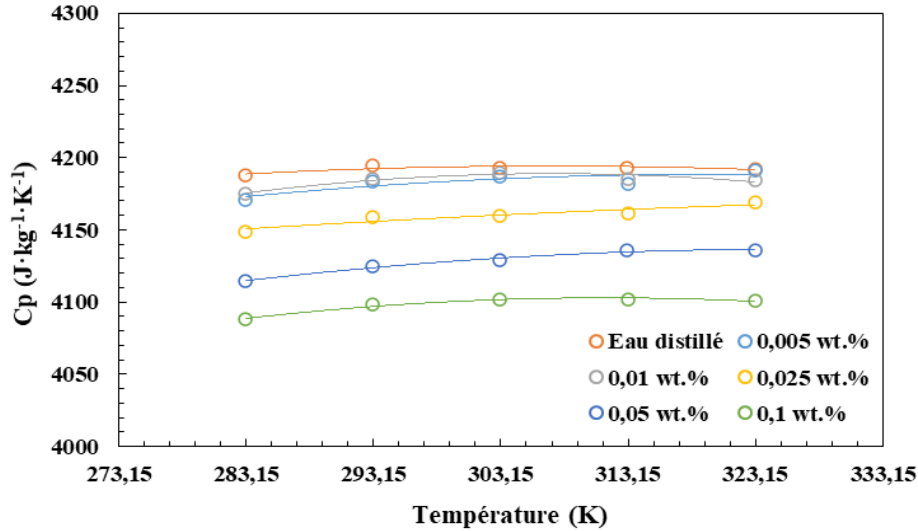


Figure II.6. Capacités thermiques isobares en fonction de la température, avec des ajustements polynomiaux de second ordre (—)

Enfin, les résultats expérimentaux ont été comparés aux capacités thermiques spécifiques prédites par le modèle de Xuan-Roetzel présenté dans Eq II.4 [14] :

$$C_{p,nf} = \varphi_m \cdot C_{p,np} + (1 - \varphi_m) \cdot C_{p,bf} \quad \text{Eq II.4}$$

Où φ_m est la fraction massique des nanoparticules, tandis que les indices nf, np et bf représentent respectivement le nanofluide, les nanoparticules et le fluide de base,

Les valeurs de Cp mesurées expérimentalement sont jusqu'à 1,7 % inférieures à celles prédites par l'Eq II.4. Cette différence peut être attribuée à l'incertitude des capacités thermiques isobares, estimée à moins de 3 %, ainsi qu'à des facteurs tels que la distribution des tailles des nanoparticules et les interactions entre celles-ci et le fluide de base.

II.6 Caractérisation du comportement rhéologique des nanofluide hybride

Comme pour les propriétés thermiques, l'objectif est ici d'étudier l'influence de la concentration en nanoparticules et de la température sur les propriétés rhéologiques, des facteurs déterminants pour leurs performances thermiques et hydrodynamiques dans des applications comme les systèmes de refroidissement. Nous évaluerons leur impact sur la viscosité et le comportement sous écoulement, en comparant les résultats expérimentaux aux prédictions des modèles théoriques. Un modèle de régression linéaire sera également développé pour optimiser l'analyse des données.

II.6.1 Effet du surfactant

Comme pour la conductivité thermique, cette section a pour objectif d'analyser l'impact de la présence de surfactant sur la viscosité des nanofluides. La viscosité dynamique d'une solution de surfactant dans l'eau distillée correspondant là aussi au nanofluide contenant 0.1% en masse de nanoparticules (le plus concentrée en surfactant) a été comparée à celle de l'eau distillée entre 283,15 K et 313,15 K dans la Figure II.7. Les résultats montrent une diminution de la viscosité avec la température pour les deux liquides sans différence

significative entre les deux dans le domaine d'incertitude. Ceci indique que la présence de surfactant ne modifie pas significativement la viscosité du fluide de base, ici l'eau.

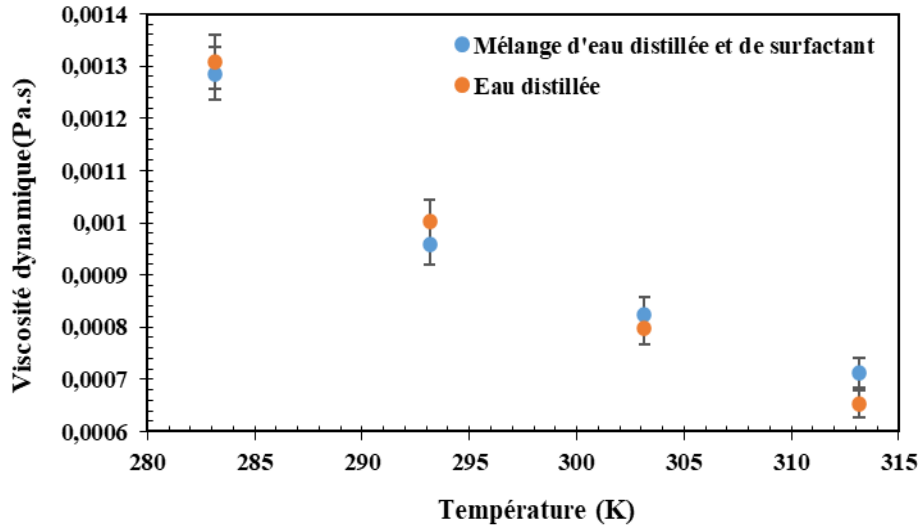


Figure II.7. Variation de la viscosité dynamique de l'eau distillée avec et sans surfactant en fonction de la température

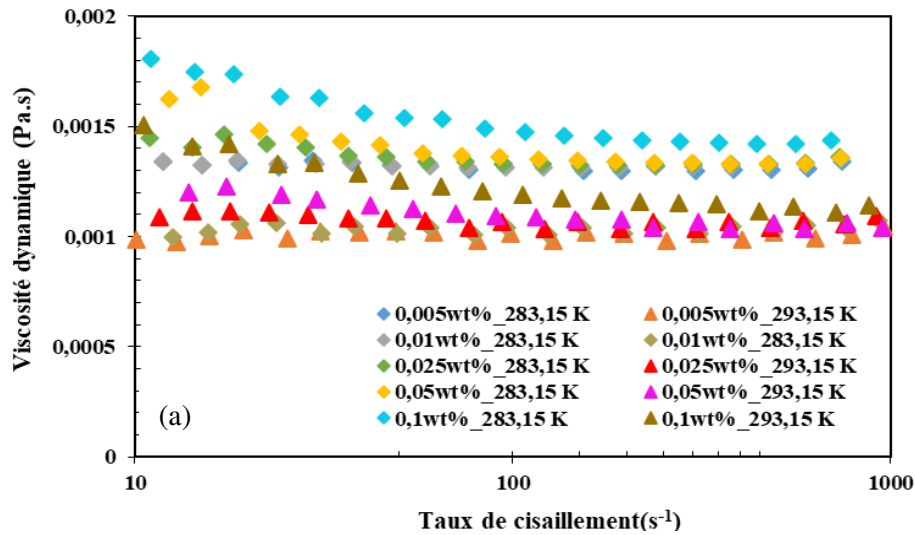
II.6.2 Effet de la concentration de nanoparticules et de la température

Les données rhéologiques ont été mesurées en évaluant la variation de la viscosité dynamique des nanofluides en fonction du taux de cisaillement selon une procédure expérimentale similaire à celle utilisée pour les nanofluides à base de graphène seul [1]. La Figure II.8, présente la courbe d'écoulement montrant la viscosité dynamique des nanofluides hybrides graphène- Fe_3O_4 pour les cinq fractions massiques étudiées (0,005 %, 0,01 %, 0,025 %, 0,05 % et 0,1 %) dans une plage de températures allant de 283,15 K à 313,15 K. À faibles fractions massiques (0,005 % et 0,01 %), les nanofluides présentent un comportement Newtonien, avec une viscosité constante quelle que soit la vitesse de cisaillement. En revanche, les nanofluides à concentrations plus élevées (0,025 %, 0,05 % et 0,1 %) affichent un comportement non Newtonien, de type rhéofluidifiant, où la viscosité diminue de manière significative à faibles taux de cisaillement. Pour ces concentrations plus élevées, un plateau Newtonien apparaît pour des taux de cisaillement compris entre 200 et 1000 s^{-1} . Ainsi, la viscosité dynamique des nanofluides est déterminée par la moyenne des valeurs pour un taux de cisaillement supérieur à 200 s^{-1} , indépendamment de la concentration massique et la température de nanofluide. Ce sont ces valeurs qui sont discutées par la suite en fonction de la température et de la concentration.

L'effet de la température sur la viscosité des fluides de base et des nanofluides est illustré dans la Figure II.9. Il est bien établi que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la viscosité des fluides. Ce phénomène, observé dans la majorité des liquides, résulte de la réduction des forces de cohésion moléculaire avec l'élévation de la température, ce qui entraîne une diminution de la contrainte de cisaillement et, par conséquent, de la viscosité [7], [14]. À faible concentration (0,005% et 0,01%), la viscosité des nanofluides reste légèrement inférieure à celle de l'eau distillée, avec une réduction maximale de 4,72% à 293,15 K pour une concentration de 0,005%. À partir de 0,025%, une augmentation progressive de la viscosité est observée, atteignant une hausse de 2,52% à 303,15 K et 1,77% à 313,15 K pour une concentration de 0,025%. Ces variations sont proches de l'incertitude expérimentale évaluée à 4%. À 0,05%,

Chapitre II. Analyse thermophysiques et caractérisation des nanofluides à base de graphène et de nanofluides hybrides graphène/ Fe₃O₄

cette augmentation devient plus marquée, avec un accroissement de 10,31% à 313,15 K, et à 0,1%, l'augmentation atteint 12,52% à la même température. Parallèlement, la viscosité de l'eau distillée et des nanofluides diminue avec l'augmentation de la température, Pour les nanofluides à faible concentration (0,005% et 0,01%), la réduction de viscosité est de 22,14% et 22,15%, respectivement. À des concentrations plus élevées, la diminution de viscosité est moins prononcée : 19,23% à 0,025%, 16,79% à 0,05%, et 14,69% à 0,1%. Ces résultats sont en accord avec des études antérieures sur les nanofluides hybrides à base de graphène-Fe₃O₄, telles que celles rapportées par Al-Rabeeh et al. [12]. Leur étude démontre que l'augmentation de la température, de 293,15 à 333,15 K, provoque une réduction significative de la viscosité des nanofluides hybrides, dépendant de la concentration massique. À $\phi = 0,1\%$, la viscosité diminue de 56%, et une tendance similaire est observée à $\phi = 0,2\%$, À $\phi = 0,3\%$, la viscosité chute de 55%, tandis qu'à $\phi = 0,4\%$, cette diminution se stabilise à 55%. Cependant, à $\phi = 0,5\%$, la réduction de viscosité n'atteint que 4%. L'étude de Rashidi et al. [13] montre que, à 293,15 K, la viscosité augmente respectivement de 3,03% à une concentration massique de 0,1%, de 6,06% à 0,3%, et de 16,16% à 0,5%. À 303,15 K, la viscosité diminue de 20,39% à 0,1 wt.%, et à 313,15 K, cette diminution atteint 34,95% à 0,1 wt.%. Enfin, la comparaison des viscosités entre les nanofluides à base de graphène pur [1] et ceux à base de graphène-Fe₃O₄ révèle que ces derniers présentent une viscosité plus élevée, avec des augmentations moyennes d'environ 7%. Cela est attribué à la présence de Fe₃O₄, qui accroît la friction et la résistance à l'écoulement [13].



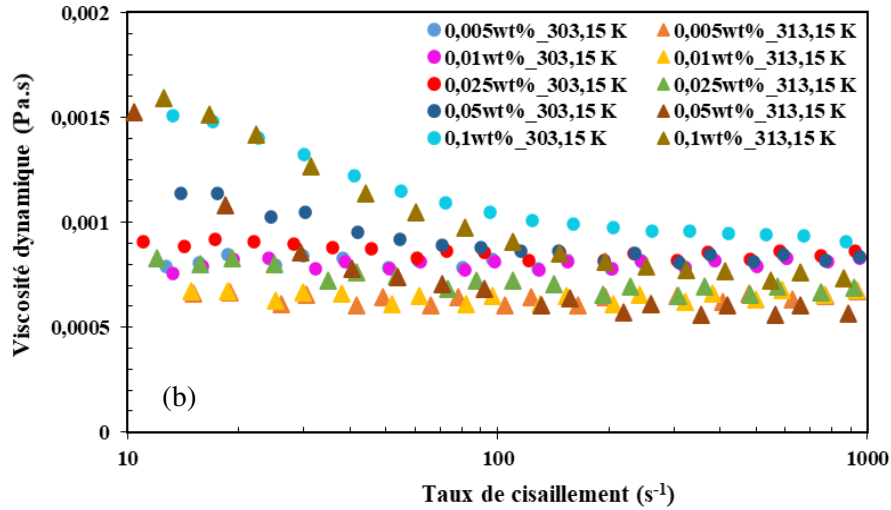


Figure II.8. Viscosité en fonction du taux de cisaillement pour le nanofluide hybride à différentes températures et fractions massiques : (a) 283,15 et 293,15 K, (b) 303,15 et 313,15 K

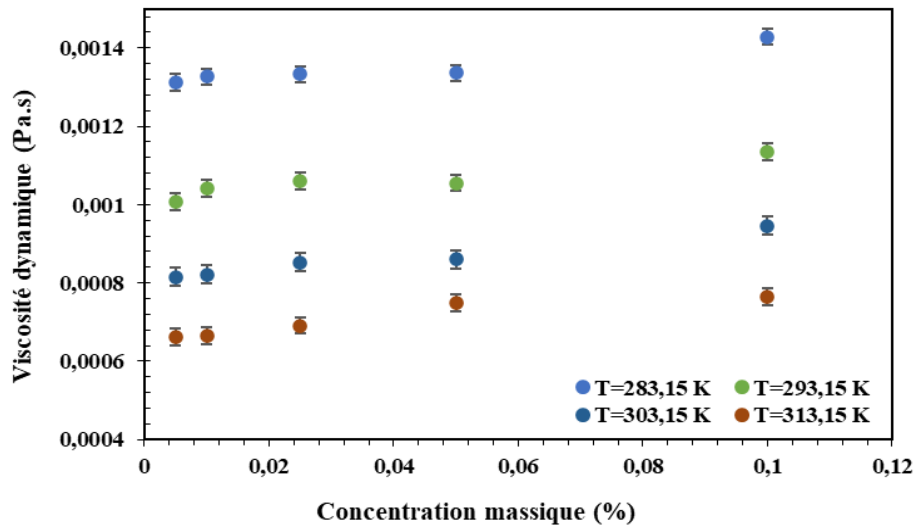


Figure II.9. Evolution de la viscosité en fonction de la température et concentration massique de nanofluide

De nombreux modèles théoriques et empiriques ont été développés pour décrire ou prédire les variations de la viscosité des nanofluides dans diverses conditions, comme souligné dans la référence [15]. Bien que la majorité de ces modèles soient destinés aux nanofluides à base de nanoparticules sphériques, ceux spécifiquement adaptés aux nanoparticules de forme allongée, telles que les nanotubes ou nanofils, sont plus rares. Parmi les modèles les plus utilisés pour expliquer la dépendance de la viscosité des nanofluides à base de graphène vis-à-vis de la température, le modèle de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) [16], [17], (Eq II.5), et présenté dans le chapitre 1, s'est révélé particulièrement efficace. Ce modèle a été utilisé dans plusieurs études antérieures pour prédire avec précision la viscosité expérimentale de nanofluides, tels que ceux composés de nanoplaquettes de graphène (GNP)-Ethylène glycol-eau [18], de nanofluides hybrides Diamant-GNP dans de l'huile minérale [19] et de nanofluides Graphène-ammonium [20], montrant des

Chapitre II. Analyse thermophysiques et caractérisation des nanofluides à base de graphène et de nanofluides hybrides graphène/ Fe₃O₄

résultats très satisfaisants. Par ailleurs, le modèle proposé par Vallejo et al. (Eq II.6), et initialement introduit dans le chapitre I, qui a été appliqué à divers nanofluides, tels que les mélanges GNP-propylène glycol-eau [21], les dispersions GNP-eau [11], [22] et les mélanges GNP-éthylène glycol-eau à 50 :50 [23], a également démontré une grande précision dans ses prédictions.

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot e^{\frac{A \cdot T_0}{T - T_0}} \quad \text{Eq II.5}$$

Où $\mu(T)$ représente la viscosité dynamique à la température T (en Kelvin), μ_0 , A et T_0 sont des paramètres ajustables, déterminés par une régression sur un jeu de données expérimentales. Ce modèle décrit la variation exponentielle de la viscosité du fluide de base avec la température.

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot e^{\frac{A \cdot T_0}{T - T_0}} + B \cdot e^{\frac{C}{T}} \cdot \varphi - D \cdot \varphi^2 \quad \text{Eq II.6}$$

Où $\mu(T)$ correspond à la viscosité dynamique du nanofluide à la température T (en Kelvin), tandis que les paramètres μ_0 , A et T_0 conservent leur signification du modèle VFT. Les coefficients B, C et D sont des paramètres ajustables permettant de modéliser l'influence des nanoparticules sur la viscosité en fonction de leur concentration et de la température. Ces paramètres sont également déterminés par régression sur des données expérimentales.

Ces paramètres, qui permettent un ajustement à nos données expérimentales, sont récapitulés dans les Tableau II.1 et Tableau II.2, pour l'ensemble des concentrations massiques et des plages de température analysées.

Tableau II.1. Paramètres de l'équation de Vogel-Fulcher-Tammann [16] (Eq II.5), écarts-types (s) et AAD obtenus pour les nanofluides hybrides de graphène-Fe₃O₄

	μ (mPa.s)				μ_0 (mPa.s)	A	T_0 (K)	AAD%	s (mPa.s)
	Température (K)								
φ_m (%)	283,15	293,15	303,15	313,15					
0,005	1,31	1,03	0,799	0,606	1,15	3,446	576,3	3,26	0,0248
0,01	1,32	1,04	0,803	0,609	1,18	3,4562	576,3	2,82	0,0205
0,025	1,37	1,11	0,86	0,695	0,5864	3,1	580	3,06	0,032
0,05	1,42	1,14	0,898	0,695	0,77	3,201	576,23	6,57	0,0662
0,1	1,62	1,48	1,35	1,23	0,86	4,5	1000	36,61	0,348

Tableau II.2. Paramètres de l'équation de Vallejo [21] (Eq II.6) écarts-types (s) et AAD obtenus, pour les nanofluides hybrides de graphène-Fe₃O₄

	μ (mPa.s)				B (Pa.s)	C (K)	D (Pa.s)	AAD %	s (mPa.s)
	Température (K)								
φ_m (%)	283,15	293,15	303,15	313,15					
0,005	1,31	1,02	0,778	0,575	38,214	1,0436	17,3	4,79	0,0348
0,01	1,321	1,022	0,7709	0,5619	0,43	59,09	0,120	5,97	0,0446

0,025	1,38	1,02	0,716	0,446	-2,72	-26,7	-0,221	3,16	0,0297
0,5	1,35	1,07	8,3	6,29	0,026	-50	-1,1	5,43	0,0441
0,1	1,43	1,3	1,17	1,05	-0,0015	10	-0,05	18,6	0,166

Pour évaluer la précision des modèles de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) [16] et de Vallejo et al. [21], une analyse comparative a été réalisée via le calcul de l'écart absolu moyen (AAD) et de l'écart-type (s), illustrée par la Figure II.10, afin de comparer les valeurs expérimentales à celles prédites. Les résultats obtenus pour le modèle de Vogel-Fulcher-Tammann, présentés dans le Tableau II.1, sont particulièrement satisfaisants pour des concentrations massiques de 0,005 %, 0,01 %, 0,025 % et 0,05 %, avec un AAD maximal de 6,57 % et un écart-type maximal de 0,0662 (mPa.s). En revanche, pour la concentration massique la plus élevée (0,1 %), les résultats sont moins satisfaisants, avec un AAD de 36,61 % et un écart-type de 0,348 (mPa.s). Le modèle de Vallejo et al. [21], présenté dans le Tableau II.2, affiche des écarts légèrement plus élevés, bien que restant dans des limites acceptables, avec un AAD maximal de 5,97 % et un écart-type maximal de 0,0446 (mPa.s) pour des concentrations massiques de 0,005 %, 0,01 %, 0,025 % et 0,05 %. Toutefois, pour la concentration massique la plus élevée (0,1 %), l'AAD atteint 18,6 % et l'écart-type 0,166 (mPa.s). Ainsi, bien que le modèle VFT soit précis pour les faibles concentrations, sa fiabilité diminue à mesure que la concentration augmente, tandis que le modèle de Vallejo et al. [21], malgré des écarts plus importants, présente un écart qui diminue à la concentration la plus élevée.

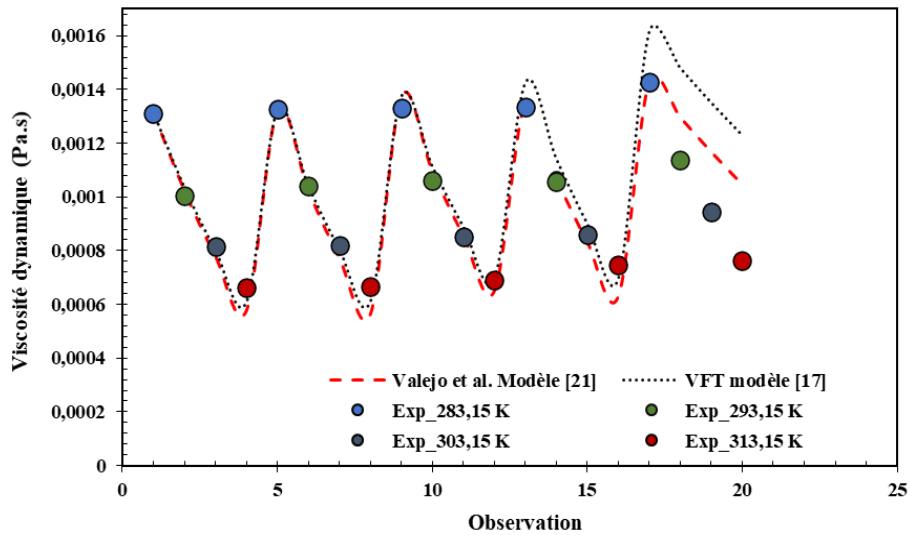


Figure II.10, Comparaison des données expérimentales avec les modèles de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT)[17] et de Vallejo et al. [21] pour les nanofluides hybrides graphène-Fe₃O₄

Les modèles de Vogel-Fulcher-Tammann [17] et de Vallejo et al. [21], bien qu'utiles pour prédire la viscosité des nanofluides hybrides graphène-Fe₃O₄ en fonction de la température, présentent une précision qui peut être améliorée pour certaines concentrations massiques du nanofluide. A cette fin, nous proposons une nouvelle corrélation empirique dérivée de nos données expérimentales et d'un modèle de régression linéaire, dans une démarche similaire à celle de la conductivité thermique et de la tension de surface. Cette corrélation linéaire donnée par l'Eq II.7 permet une prédiction fiable de la viscosité dynamique des nanofluides hybrides graphène-Fe₃O₄/eau, avec la fraction massique des nanoparticules et la température. L'Eq II.7, ci-dessous montre une grande précision, avec un coefficient de détermination R² = 0,9985.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1,3 \cdot \varphi_m - 0,0013 \cdot T + 0,582 \tag{Eq II.7}$$

Chapitre II. Analyse thermophysiques et caractérisation des nanofluides à base de graphène et de nanofluides hybrides graphène/ Fe₃O₄

Où, μ_{nf} et μ_{bf} désignent respectivement la viscosité dynamique du nanofluide hybride et du fluide de base, ici l'eau, T représente la température du nanofluide en Kelvin, et φ_m la fraction massique de nanoparticule. Pour évaluer l'exactitude de la corrélation, nous avons employé la même analyse que pour le modèle de conductivité thermique. L'Eq II.8 permet d'estimer l'écart relatif entre les résultats expérimentaux et ceux prédits par notre équation :

$$\text{Marge de déviation (\%)} = \left[\frac{(\mu_{nf})_{exp} - (\mu_{nf})_{Pred}}{(\mu_{nf})_{Pred}} \right] * 100\% \quad \text{Eq II.8}$$

Dans cette équation, "Exp," et "Pred," désignent les valeurs expérimentales et prédites dans la corrélation proposée. Les calculs montrent que les valeurs de R² et la marge moyenne de déviation de la viscosité dynamique est de 0,999 et 1,69 %, respectivement, confirmant la qualité satisfaisante de notre corrélation empirique.

Figure II.11, présente une comparaison entre les résultats de l'équation proposée et les données expérimentales sur une plage de températures de 283,15 à 313,15 K, pour l'ensemble concentrations en nanoparticules. La majorité des points de données se situe à proximité de la bissectrice, indiquant un bon ajustement du modèle.

La Figure II.12, compare les valeurs expérimentales et prédites de la viscosité dynamique des nanofluides hybrides en fonction de la température et de la concentration en nanoparticules. L'équation proposée montre une bonne précision générale, l'écart le plus important, de 4,32 %, est observé à une température de 313,15 K.

La Figure II.13, présente l'analyse des résidus qui, idéalement, devraient être répartis autour de zéro. La plupart des points restent proches de cette ligne, bien que certains écarts plus marqués soient observés, reflétant une distribution aléatoire des résidus en fonction de l'ordre des mesures. Cette tendance montre que le modèle parvient globalement à capturer là aussi les variations de viscosité avec une bonne précision.

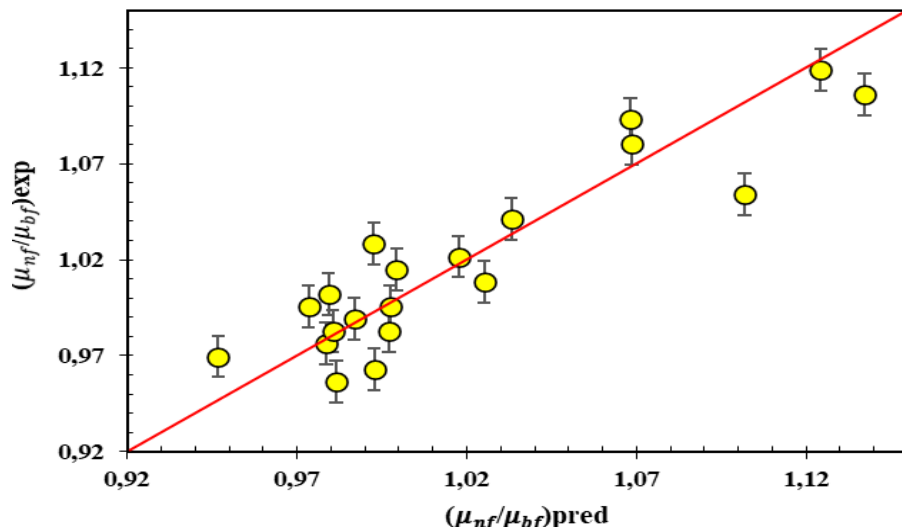


Figure II.11. Comparaison entre les rapports de viscosités dynamiques expérimentales et prédites du nanofluide aqueux à base de graphène et Fe₃O₄

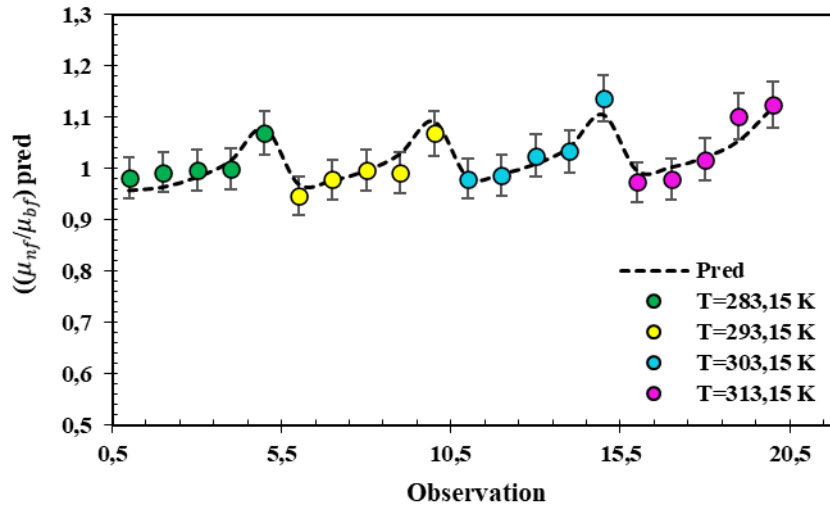


Figure II.12. Évaluation de la précision de la méthodologie de régression linéaire par comparaison des valeurs prédites et expérimentales de la viscosité dynamique des nanofluides hybrides à différentes températures

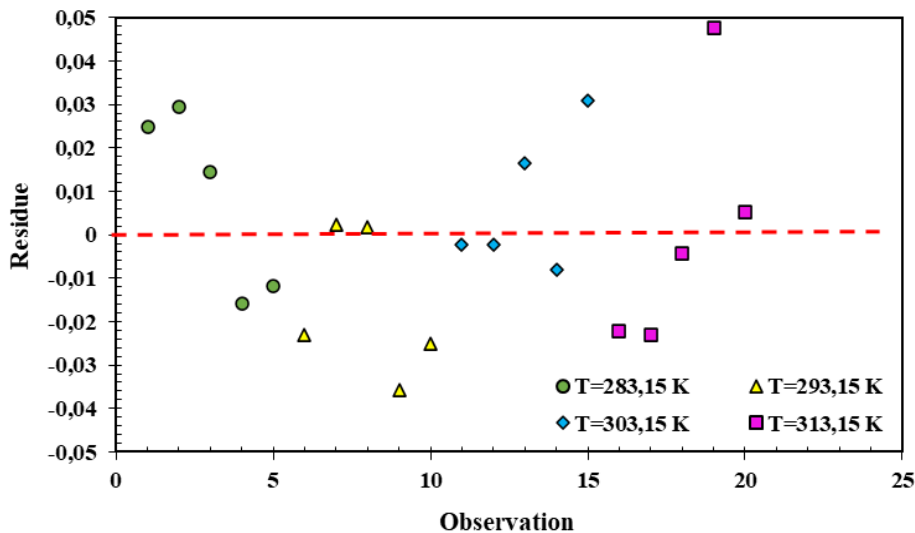


Figure II.13. Résidus en fonction des valeurs prédites de la viscosité dynamique des nanofluides hybrides

II.7 Conductivité électrique

Dans le cadre de l'analyse des propriétés thermophysiques des nanofluides à base de graphène et de formulations hybrides, la conductivité électrique constitue un paramètre déterminant, en particulier lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué. Elle influence directement les effets magnétohydrodynamiques (MHD), en modulant les forces électromagnétiques induites et, par conséquent, le comportement de l'écoulement et le transfert thermique. Dans ce contexte, la conductivité électrique des deux nanofluides a été évaluée afin de quantifier l'impact du champ électromagnétique sur les performances thermiques. Des facteurs tels que la charge de surface, la structure de la double couche électrique et la conductance intrinsèque des nanoparticules contribuent à la conductivité effective du fluide. Ces mécanismes, bien que prometteurs pour les applications en refroidissement électronique et dissipation thermique [17], [18], restent encore insuffisamment explorés.

Les mesures de conductivité ont été réalisées à l'aide d'un conductimètre CRISON GLP 31+, équipé d'une électrode en verre avec une plaque de platine, à une température constante de 298,15 K. L'appareil couvre une large plage de mesure, allant de 0,001 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 1000 mS/cm . Chaque valeur rapportée correspond à la moyenne de cinq mesures indépendantes, avec une incertitude estimée à $\pm 1\%$, l'eau distillée étant utilisée comme référence.

La Figure II.14, illustre l'évolution de la conductivité électrique en fonction de la fraction massique pour deux types de nanofluides : graphène/eau et graphène- Fe_3O_4 /eau, à une température constante de 298,15 K. Dans le cas du nanofluide graphène/eau, une augmentation notable de la conductivité est observée dès la plus faible concentration testée (0,005 wt%). Cette hausse s'explique par la dispersion des feuillets de graphène dans l'eau, lesquels développent une charge de surface négative, principalement due à la déprotonation des groupes fonctionnels présents à leur surface [23]. Ce mécanisme est confirmé par les mesures de potentiel zêta qui étaient présentées dans la section précédente (II.2, Tableau 1) [1], qui révèle la formation d'une double couche électrique (DCE) autour des feuillets, résultant de l'attraction d'ions de charge opposée. Cette structure favorise la conduction ionique via la mobilité électrophorétique, comme l'ont également observé Shen et al. [24]. À des concentrations plus élevées (0,01 à 0,05 wt. %), une diminution de la conductivité est enregistrée, atteignant un minimum de $33 \times 10^{-4} \text{ S}/\text{m}$ à 0,02 wt.%. Cette baisse est généralement attribuée à la condensation des contre-ions autour des feuillets de graphène, ce qui entraîne un épaississement de la DCE, phénomène typique des milieux à faible force ionique [25]. Au-delà de cette concentration, la conductivité augmente de nouveau, atteignant $176 \times 10^{-4} \text{ S}/\text{m}$ à 0,1 wt%, en lien avec une densité accrue de sites chargés due à la présence plus importante de graphène [26], ce qui peut créer une non-linéarité avec la concentration massique du nanofluide, un comportement similaire a été observé dans [25] et [27]. Le nanofluide hybride graphène- Fe_3O_4 présente une évolution similaire, mais avec des performances nettement supérieures. Ainsi, à 0,02 wt%, sa conductivité dépasse celle du nanofluide graphène/eau de plus de 330 %. Cette amélioration est attribuée à la contribution des nanoparticules de Fe_3O_4 , qui jouent le rôle de porteurs de charge supplémentaires [28]. Ces résultats concordent avec ceux de Borode et al. [6], qui ont observé une augmentation allant jusqu'à 300 % de la conductivité électrique pour un nanofluide GNP- Fe_3O_4 à 0,4 vol% et 288,15 K.

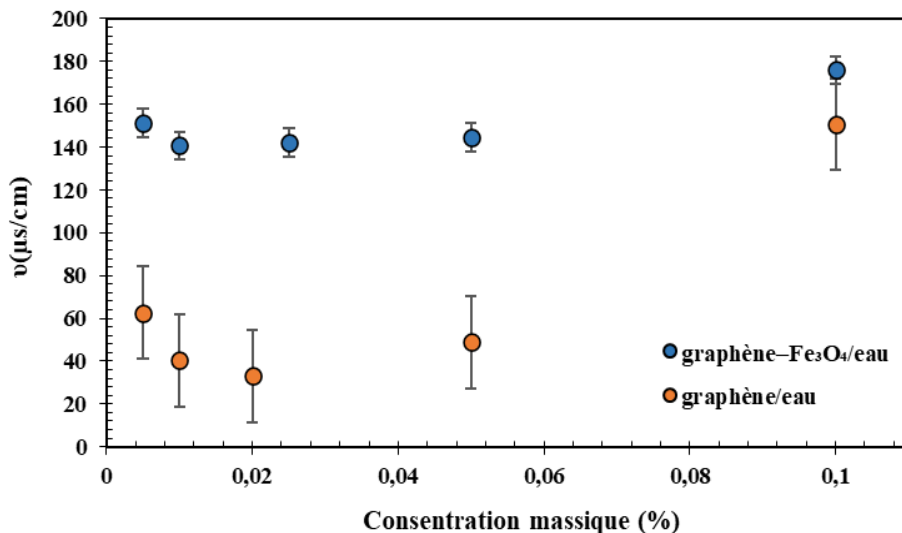


Figure II.14. Conductivité électrique des nanofluides en fonction de la fraction massique à 298,15 K

II.8 Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence les propriétés thermophysiques des nanofluides à base de graphène à quelques couches (FLG) ainsi que celles des nanofluides hybrides associant graphène et oxyde de fer (Fe₃O₄). Les analyses réalisées ont montré que les différences structurelles et morphologiques entre les deux types de nanofluides influencent directement leurs performances globales.

Les nanofluides à base de FLG, caractérisés par un faible nombre de couches, une bonne cristallinité et un faible ratio Raman I_D/I_G, présentent une structure graphitisée de qualité, propice à une conductivité thermique élevée. En revanche, l'ajout de Fe₃O₄ dans les nanofluides hybrides et une composition de surfactant différente modifie la structure des feuillets de graphène (stratification accrue, plis, plus grande épaisseur), traduisant une exfoliation moins efficace. Néanmoins, cette modification s'accompagne de propriétés magnétiques intéressantes, malgré quelques défauts structuraux supplémentaires.

Du point de vue de la stabilité, les deux systèmes présentent des tailles hydrodynamiques et des spectres UV-vis comparables. Toutefois, les nanofluides hybrides FLG/Fe₃O₄ se démarquent par une stabilité électrostatique supérieure, comme en témoigne leur potentiel Zeta plus élevé, gage d'une meilleure dispersion et d'un comportement plus stable à long terme.

Concernant la conductivité thermique, les nanofluides à base de graphène montrent une amélioration atteignant jusqu'à 10 % pour une concentration de 0,005 wt. % à 283,15 K, et jusqu'à 20 % pour 0,2 wt.% sur l'ensemble de la plage de température étudiée (283,15–313,15 K). Les nanofluides hybrides graphène/Fe₃O₄ montrent quant à eux une amélioration maximale de 6 % à 0,1 wt. % à la même température. L'effet de la température sur la conductivité thermique est plus marqué pour les nanofluides à base de graphène. Le modèle théorique de Chu [29] a permis de modéliser avec précision la conductivité thermique des nanofluides à base de graphène, mettent en évidence l'influence de la planéité des feuillets en fonction de la concentration en graphène, tandis qu'un modèle empirique basé sur une régression linéaire s'est révélé particulièrement adapté aux formulations hybrides.

L'étude rhéologique a révélé un comportement Newtonien pour les nanofluides à base de graphène, diminuant jusqu'à 50 % entre 283,15 K et 313,15 K, tandis que les nanofluides hybrides FLG/Fe₃O₄ adoptent un comportement non Newtonien à partir de 0,025 wt.%. Les modèles de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) [17] et de Vallejo et al. [21] ont montré une bonne précision pour les faibles concentrations, mais leur performance se dégrade à concentrations plus élevées. En revanche, la corrélation empirique linéaire développée dans cette étude a fourni une prédiction fiable avec un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0,9985$) pour les plages de concentrations et températures étudiées.

En ce qui concerne la densité, une augmentation de 0,25 % a été observée pour les nanofluides à base de graphène à 0,2 wt.% contre 0,10 wt.% pour les nanofluides hybrides à 0,100 wt.%. Une légère diminution de 0,27 % est également notée avec l'augmentation de la température. Les résultats expérimentaux sont cohérents avec les modèles classiques.

Les capacités calorifiques isobares (C_p), diminuent légèrement avec l'ajout de nanoparticules : jusqu'à 1,9 % pour les nanofluides FLG à la concentration maximale testée, et jusqu'à 2,4 % pour les nanofluides hybrides à 0,1 wt.%, en accord avec les prédictions du modèle de Xuan-Roetzel [30].

Sur le plan de la conductivité électrique, pour les nanofluides à base de graphène, la conductivité électrique augmente initialement à partir de 0,005 wt% en raison de la charge négative des feuillets de graphène, suivie d'une diminution à 0,02 wt% due à l'épaississement de la double couche électrique, avant de croître à nouveau au-delà de 0,05 wt%, atteignant 176×10^{-4} S/m à 0,1 wt%. Le nanofluide hybride graphène–

Chapitre II. Analyse thermophysiques et caractérisation des nanofluides à base de graphène et de nanofluides hybrides graphène/ Fe_3O_4

Fe_3O_4 /eau présente une amélioration plus importante, avec une conductivité supérieure de plus de 330 % à 0,02 wt.% par rapport au FLG seul, due à l'effet des nanoparticules de Fe_3O_4 comme porteurs de charge.

Enfin, l'ajout de nanoparticules hybrides dans l'eau induit une réduction significative de la tension de surface, allant jusqu'à 41,7 %, effet amplifié par la présence de tensioactifs. Une nouvelle corrélation basée sur un modèle de régression linéaire permet de prédire cette propriété avec une déviation moyenne de seulement 2,48 %.

Dans la continuité de ce travail, la partie suivante repose sur une modélisation numérique réalisée à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics, et se divise en deux chapitres complémentaires.

Le premier chapitre est consacré à l'analyse tridimensionnelle de la convection naturelle magnétohydrodynamique dans une enceinte cubique remplie d'un nanofluide à base de nanotubes de carbone (CNT). Cette étude vise, en préambule à la suite, à examiner de manière détaillée l'influence de plusieurs paramètres physiques sur le comportement convectif du système, notamment le champ magnétique, les propriétés thermophysiques du nanofluide, la présence d'une ailette interne, ainsi que les conditions aux limites appliquées, et mettre en évidence l'impact de nanostructures carbonées sur les phénomènes MHD.

Le chapitre suivant portera sur la convection mixte tridimensionnelle magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à contre-courant, en utilisant les nanofluides à base de graphène et hybrides FLG/ Fe_3O_4 , dont les propriétés thermophysiques ont été caractérisées expérimentalement dans le présent chapitre. L'intégration de ces propriétés dans les modèles numériques permettra d'évaluer avec précision les performances thermohydrauliques de ces fluides, en vue d'optimiser le transfert de chaleur dans des dispositifs à échelle microscopique.

II.9 Références

- [1] S. Gal, D. Cabaleiro, W. Hassen, A. Nasri, Y. Lafue, C. Pham-Huu, H. Ba et P. Estellé, « Thermophysical profile of industrial graphene water-based nanofluids », *Nanomaterials*, 14, 1401, 2024, doi: 10.3390/nano14171401.
- [2] S. Gal, D. Cabaleiro, W. Hassen, L. Rault, H. Ba et P. Estellé, « Surface tension of graphene/Fe₃O₄ water-based hybrid nanofluids », *J. Mol. Liq.*, 417, 126630, 2025, doi: 10.1016/j.molliq.2024.126630.
- [3] A. E. Mag-isa, S.-M. Kim, J.-H. Kim et C.-S. Oh, « Variation of thermal expansion coefficient of freestanding multilayer pristine graphene with temperature and number of layers », *Mater. Today Commun.*, vol. 25, 101387, 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101387.
- [4] Y. Y. Zhang et Y. T. Gu, « Mechanical properties of graphene: Effects of layer number, temperature and isotope », *Comput. Mater. Sci.*, vol. 71, pp. 197–200, 2013, doi: 10.1016/j.commatsci.2013.01.032.
- [5] M. Bahiraei et S. Heshmatian, « Graphene family nanofluids: A critical review and future research directions », *Energy Convers. Manag.*, vol. 196, pp. 1222–1256, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.06.076.
- [6] A. Borode, T. Tshephe, P. Olubambi, M. Sharifpur et J. Meyer, « Effects of temperature and nanoparticle mixing ratio on the thermophysical properties of GNP–Fe₂O₃ hybrid nanofluids: An experimental study with RSM and ANN modeling », *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 5059–5083, 2024, doi: 10.1007/s10973-024-13029-3.
- [7] A. Y. Al-Rabeeah, I. Seres et I. Farkas, « Effects of concentration and temperature on the viscosity and thermal conductivity of graphene–Fe₃O₄/water hybrid nanofluid and development of new correlation », *J. Eng. Thermophys.*, pp. 328–339, 2022, doi: 10.1134/S1810232822020138.
- [8] S. Askari, H. Koolivand, M. Pourkhalil, R. Lotfi et A. Rashidi, « Investigation of Fe₃O₄/graphene nanohybrid heat transfer properties: Experimental approach », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 30–39, 2017, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.06.012.
- [9] C. L. Snow, Q. Shi, J. Boerio-Goates et B. F. Woodfield, « Heat capacity studies of nanocrystalline magnetite (Fe₃O₄) », *American Chemical Society*, 2010, doi: 10.1021/jp1072704.
- [10] E. F. Westrum Jr et F. Grønvold, « Magnetite (Fe₃O₄): Heat capacity and thermodynamic properties from 5 to 350 K, low-temperature transition », *J. Chem. Thermodyn.*, 1969, doi: 10.1016/0021-9614(69)90015-9.
- [11] R. Agromayor, D. Cabaleiro, A. A. Pardinas, J. P. Vallejo, J. Fernandez-Seara et L. Lugo, « Heat transfer performance of functionalized graphene nanoplatelet aqueous nanofluids », *Materials*, 9, 455, 2016, doi: 10.3390/ma9060455.
- [12] A. A. Vozniakovskii, E. I. Kalashnikova, S. V. Kidalov et A. P. Voznyakovskii, « Thermophysical properties of water-based nanofluids modified with few-layer graphene », *Carbon*, 119911, 2025, doi: 10.1016/j.carbon.2024.119911.
- [13] Adnan, K. U. Rahman, Z. Mahmood, S. U. Khan, A. Ali, Z. Li et I. Tlili, « Enhanced thermal study in hybrid nanofluid flow in a channel motivated by graphene/Fe₃O₄ and Newtonian heating », *Results Eng.*, 101772, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101772.
- [14] S. Hamze, D. Cabaleiro, T. Maré, B. Vigolo et P. Estellé, « Shear flow behavior and dynamic viscosity of few-layer graphene nanofluids based on propylene glycol–water mixture », *J. Mol. Liq.*, vol. 316, 113875, 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.113875.
- [15] J. P. Meyer, S. A. Adio, M. Sharifpur et P. N. Nwosu, « The viscosity of nanofluids: A review of the theoretical, empirical, and numerical models », *Heat Transf. Eng.*, pp. 387–421, 2016, doi: 10.1080/01457632.2015.1057447.
- [16] G. Tammann et W. Hesse, « The dependence of viscosity upon the temperature of supercooled liquids », *Z. Anorg. Allg. Chem.*, pp. 245–257, 1926, doi: 10.1002/zaac.19261560121.

- [17] G. Gordons et P. Pulca, « Analysis of recent measurements of the viscosity of glasses », *J. Am. Ceram. Soc.*, pp. 153–400, 1925.
- [18] D. Cabaleiro, L. Colla, S. Barison, L. Lugo, L. Fedele et S. Bobbo, « Heat transfer capability of (ethylene glycol + water)-based nanofluids containing graphene nanoplatelets: Design and thermophysical profile », *Nanoscale Res. Lett.*, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1186/s11671-016-1806-x.
- [19] S. U. Ilyas, S. Ridha, S. Sardar, P. Estellé, A. Kumar et R. Pendyala, « Rheological behavior of stabilized diamond–graphene nanoplatelets hybrid nanosuspensions in mineral oil », *J. Mol. Liq.*, 115509, 2021, doi: 10.1016/j.molliq.2021.115509.
- [20] P. M. Martínez-Rubio, M. D. Avilés, J. Arias-Pardilla, F. J. Carrión-Vilches, J. Sanes, M. D. Bermúdez et R. Pamies, « Physicochemical characterisation of graphene–ammonium lactate ionic liquid nanofluid », *J. Mol. Liq.*, 120446, 2022, doi: 10.1016/j.molliq.2022.120446.
- [21] J. P. Vallejo, S. Gómez-Barreiro, D. Cabaleiro, C. Gracia-Fernández, J. Fernández-Seara et L. Lugo, « Flow behaviour of suspensions of functionalized graphene nanoplatelets in propylene glycol–water mixtures », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 91, pp. 150–157, févr. 2018, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.12.001.
- [22] J. P. Vallejo, G. Żyła, J. Fernández-Seara et L. Lugo, « Rheological behaviour of functionalized graphene nanoplatelet nanofluids based on water and propylene glycol: Water mixtures », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, pp. 43–53, 2018, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.10.001.
- [23] S. B. White, A. J.-M. Shih et K. P. Pipe, « Investigation of the electrical conductivity of propylene glycol-based ZnO nanofluids », *Nanoscale Res. Lett.*, 6, 346, 2011, doi: 10.1186/1556-276X-6-346.
- [24] L. P. Shen, H. Wang, M. Dong, Z. C. Ma et H. B. Wang, « Solvothermal synthesis and electrical conductivity model for the zinc oxide–insulated oil nanofluid », *Phys. Lett. A*, pp. 1053–1057, 2012, doi: 10.1016/j.physleta.2012.02.006.
- [25] S. B. White, A. J.-M. Shih et K. P. Pipe, « Investigation of the electrical conductivity of propylene glycol-based ZnO nanofluids », *Nanoscale Res. Lett.*, 2011, doi: 10.1186/1556-276X-6-346.
- [26] M. Hadadian, E. K. Goharshadi et A. Youssef, « Electrical conductivity, thermal conductivity, and rheological properties of graphene oxide-based nanofluids », *J. Nanoparticle Res.*, pp. 1–17, 2014, doi: 10.1007/s11051-014-2788-1.
- [27] J. D. Posner, « Properties and electrokinetic behavior of non-dilute colloidal suspensions », *Mech. Res. Commun.*, pp. 22–32, 2009, doi: 10.1016/j.mechrescom.2008.08.008.
- [28] S. H. Pourhoseini, H. Ramezani-Aval et N. Naghizadeh, « FHD and MHD effects of Fe₃O₄–water magnetic nanofluid on the enhancement of overall heat transfer coefficient of a heat exchanger », *Phys. Scr.*, no 4, 2020, doi: 10.1088/1402-4896/ab6eb6.
- [29] K. Chu, W. Li et F. Tang, « Flatness-dependent thermal conductivity of graphene-based composites », *Phys. Lett. A*, 377(12), pp. 910–914, 2013, doi: 10.1016/j.physleta.2013.02.009.
- [30] Y. Xuan et W. Roetzel, « Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids », *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2000.

Chapitre III Étude tridimensionnelle de la convection naturelle magnétohydrodynamique dans une enceinte remplie de nanofluide

Résumé

Cette thèse se concentre sur l'amélioration du transfert thermique par l'usage de nanofluides à base de nanostructures carbonées, en combinant caractérisation expérimentale et simulation numérique. Dans ce chapitre, des simulations ont été réalisées à l'aide de corrélations théoriques pour prédire les propriétés thermophysiques de nanofluides à base de nanotubes de carbone (CNT) et évaluer leur comportement thermique sous un champ magnétique.

Les résultats et discussions présentés dans ce chapitre ont été publiés avec la référence suivante. **Soulayma Gal**, Lioua Kolsi, Walid Hassen, Naim Ben Ali, Nidhal Ben Khedher, and Ali J. Chamkha, "Three-Dimensional Study of Magnetohydrodynamic Natural Convection, Entropy Generation, and Electromagnetic Variables in a Nanofluid Filled Enclosure Equipped with Inclined Fins," ACS OMEGA, vol. 7, p. 12365-12373, Jun. 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c00923. Open Access.

Cet article constitue ce chapitre, et permet de mettre en évidence l'impact de la présence de nanostructure carbonées dans les phénomènes liés à la convection naturelle en présence d'un champ magnétique, à la génération d'entropie ainsi qu'aux interactions électromagnétiques affectant les mécanismes de transfert thermique, dans le cadre d'une approche couplant modélisation numérique tridimensionnelle et analyse paramétrique.

Les éléments essentiels de cet article sont ici rappelés. La géométrie étudiée, illustrée par la Figure 0.1, correspond à une enceinte cubique tridimensionnelle remplie d'un nanofluide à base de nanotubes de carbone (CNT), soumise à un champ magnétique externe uniforme appliqué selon l'axe horizontal (x). Deux parois verticales opposées sont maintenues à une température chaude constante, tandis que les parois horizontales supérieure et inférieure sont adiabatiques. Deux ailettes froides, disposées en forme de V et inclinées selon un angle variable, sont fixées sur la paroi supérieure. La résolution des équations de Navier-Stokes et de l'énergie est réalisée via la méthode des éléments finis avec formulation de Galerkin pondérée. Les paramètres d'étude incluent le nombre de Rayleigh (10^3 à 10^5), le nombre de Hartmann (0 à 100), la fraction volumique de nanoparticules (jusqu'à 4,5 %) et l'angle d'inclinaison entre les deux ailettes (0° à 80°).

L'objectif de ce travail numérique est de comparer les performances thermiques de nanofluide constitué de CNT à l'eau comme fluide de base dans un contexte magnétohydrodynamique (MHD), en tenant compte de l'impact des paramètres géométriques, tels que l'angle d'inclinaison des ailettes, et de l'effet du champ magnétique sur la convection naturelle.

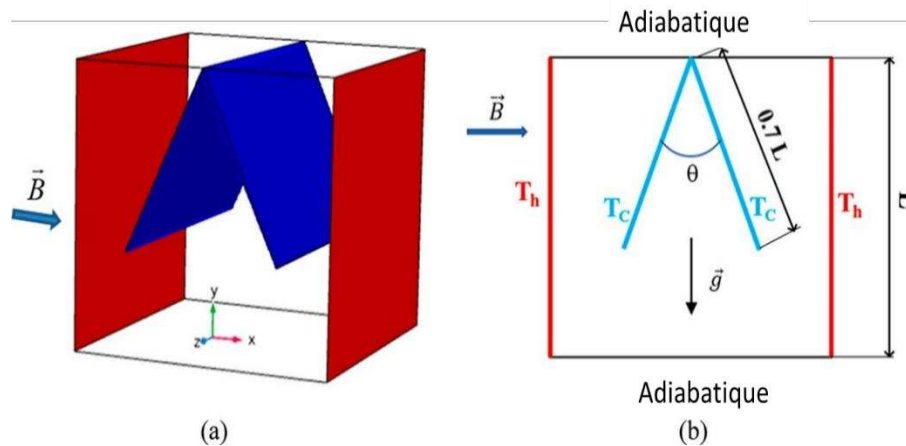


Figure 0.2. Configuration étudiée : (a) Géométrie 3D et (b) Plan central xy.

Les principaux résultats sont les suivants :

Amélioration du transfert de chaleur par les nanoparticules : L'ajout de CNT dans l'eau améliore significativement le transfert thermique, avec une augmentation du nombre de Nusselt moyen d'environ 100% en passant d'une fraction volumique nulle à 4,5% de CNT. L'ajout de CNT accentue la stratification verticale et la distorsion des isosurfaces de température, tandis que l'effet du champ magnétique tend à rendre les surfaces iso-température parallèles aux ailettes froides, rapprochant le régime thermique d'une conduction pure.

Effet du nombre de Hartmann (Ha) : L'augmentation de l'intensité du champ magnétique entraîne une réduction significative du transfert de chaleur et de l'intensité de l'écoulement. Une augmentation de Ha de 0 à 100 conduit à une diminution du nombre de Nusselt moyen de 70 % et à une réduction de la vitesse maximale de l'écoulement de 60 à 80 %, traduisant l'effet de freinage magnétique dû à la force de Lorentz.

Effet de l'inclinaison des ailettes : la variation de l'angle d'inclinaison modifie sensiblement les structures d'écoulement et la distribution thermique. Une inclinaison optimisée peut augmenter localement le nombre de Nusselt jusqu'à 35 % et réduire l'entropie totale générée de 25 % par rapport à l'orientation de référence, améliorant ainsi l'efficacité thermodynamique du système.

Génération d'entropie : La génération totale d'entropie résulte de l'interaction entre les effets de frottement, du champ magnétique et du transfert thermique. L'augmentation du nombre de Hartmann (Ha) entraîne une diminution de la production d'entropie liée au frottement d'environ 80 %, mais simultanément une augmentation de la production d'entropie due au transfert thermique d'environ 40 %. Cette évolution traduit une stratification thermique accentuée au sein du fluide.

Ces résultats confirment les apports des nanofluides à base de nanostructures carbonées en matière d'amélioration du transfert thermique, comme exposé dans la bibliographie. L'influence du champ magnétique et de l'inclinaison des ailettes illustre le potentiel de contrôle précis du régime thermique par couplage MHD. L'ensemble de l'étude valide les tendances dans les études récentes et souligne l'intérêt des approches hybrides, combinant plusieurs types de nanoparticules. L'intérêt du couplage des nanofluides hybrides et du contrôle MHD réside dans la synergie obtenue entre l'intensification des transferts thermiques et la réduction des pertes énergétiques.

Three-Dimensional Study of Magnetohydrodynamic Natural Convection, Entropy Generation, and Electromagnetic Variables in a Nanofluid Filled Enclosure Equipped with Inclined Fins

Soulayma Gal, Lioua Kolsi, Walid Hassen,* Naim Ben Ali, Nidhal Ben Khedher, and Ali J. Chamkha



Cite This: *ACS Omega* 2022, 7, 12365–12373

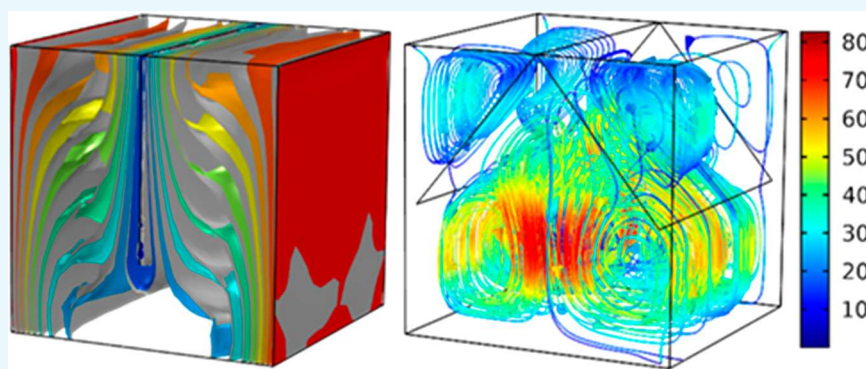


Read Online

ACCESS |

Metrics & More

Article Recommendations



ABSTRACT: This article provides a numerical study on carbon nanotube–water nanofluid convection in a three-dimensional cavity under a magnetic field effect. Two walls are kept at a hot temperature, and the upper and lower horizontal walls are considered adiabatic. As a new configuration, the beneficial effect of using a nanofluid is coupled with the incorporation of cold V-shape obstacle placed in the cubic cavity; in addition, an external magnetic field is applied toward the horizontal x -axis direction. The finite element method based on the Galerkin's Weighted Residual technique is used to solve the three-dimensional governing equations. In this paper, the ranges of the parameters used are the Hartmann number, varied from 0 to 100, Rayleigh number from 10^3 to 10^5 , nanofluid volume fraction between 0% and 4.5%, and the body V-shaped opening angle varied from 0 to 80° . The effect of the obstacle shape and the added nanoparticle concentration on the flow behaviors, the different instabilities generated, and the heat transfer exchanged were exposed. An enhancement in heat transfer was recorded by increasing the obstacle opening angle and the volume fraction of the carbon nanotubes. Special attention has also been devoted to the calculation of the different kinds of entropy generations.

INTRODUCTION

The control of convective heat transfer in cavities has attracted the interest of many researchers in view of its beneficial technical applications. In some processes such as heat exchangers, thermal engines, furnaces, steam boilers, etc., the aim is to intensify and improve heat transfer. In other processes such as crystal growth, the aim is to minimize convection. Therefore, having a tool for controlling and mastering heat transfer in the same enclosure will be of great interest to engineers. Today, among the vast array of methods available to improve or reduce heat transfer, it was decided in this work to couple three mature techniques: two passive techniques, namely, the use of an adjustable shape obstacle with the addition of nanoparticles, and also an active technique using an external magnetic field. In this context, it should be noted that several studies have focused on enhancing or decreasing heat transfer. Gangawane et al.¹ analyzed the impact of the position and size of a heated triangular body inside

a 2D cavity. They showed that there is a direct correlation between Nu_{av} and the position and size of the block in the cavity. Increases of more than 50% were achieved after optimizing the obstacle location and dimension.

Kolsi et al.² considered a closed cavity equipped with sharp-edged fins. The 3D calculation of heat transfer and irreversibilities through the generated entropy was performed. The authors were able to find the best fin inclination giving the highest heat exchange and the minimum entropy generation.

Received: February 15, 2022

Accepted: March 17, 2022

Published: March 31, 2022



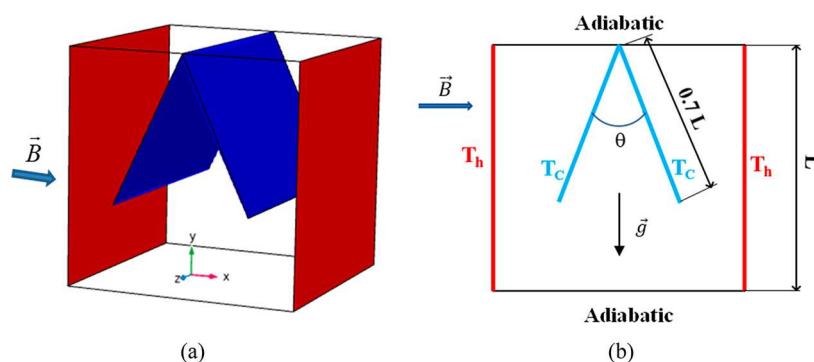


Figure 1. Studied configuration; (a): 3D geometry and (b) central xy plane.

Rathor and Aharwal³ presented an experimental study to expose the variation in the Nu number of several inclined ribs implanted in a rectangular duct representing a solar air heater. The liquid crystal thermography technique was adopted to visualize the temperature distribution. An increase on the order of 229% was recorded.

Du et al.⁴ numerically studied the natural convection inside an isolated cavity containing a hot baffle. This cavity, subjected to a magnetic field, contains two diagonally opposed openings located on either side of the vertical walls. The openings allow the creation of a cold fluid flow composed of hybrid nanofluids. The authors were able to demonstrate that the transfer is even better with the inclusion of nanoparticles and, conversely, the use of magnetic fields significantly reduces thermal convection.

The effect of an obstacle^{5–8} (square or circular, fixed or rotating) in a lid-driven closed enclosure or of several obstacles^{9–11} (of different shapes) in a square cavity subjected to an external magnetic field has been widely treated with the aim of optimizing and improving heat transfer.

Hassen et al.¹² tried to intensify the heat transfer using hot rectangular obstacles of different sizes and at different positions. The enhancement technique was done by creating an electric potential difference between the obstacle and the cavity walls. They were therefore able to set up an electric field that allowed the heat transfer to be improved up to 530%. In another complementary paper,¹³ the authors tested the coupling of two intensification techniques: electric field and addition of MWCNT. An improvement of around 43% was recorded.

Xiao et al.¹⁴ proposed the use of inclined baffles to enhance heat exchange performances, in particular the cooling of a solar concentrator focus via thermal oil. The idea is to test three types of baffles which by impact with the fluid will create longitudinal vortices and improve convection. They solved the problem numerically and found that the average global performance and the operating energy were improved by 0.52% and 0.22%, respectively.

Ajeel et al.¹⁵ numerically simulated the flow and heat transfer through a curved-corrugated pipe filled with a nanofluid in the presence of L-shaped baffles. Their results revealed the development of a vortex flow and an improvement in turbulence as a result of the influence of the wave walls and the baffles. For a specific geometry and amount of the used nanoparticles, an improvement in heat transfer of about 142% was achieved.

Luan and Phu¹⁶ were able to develop correlations for estimating Nu_{av} and a friction coefficient for a solar air heater fitted with tilted obstacles. The correlations were validated experimentally with an error of less than 8%. The authors focused mainly on the estimation of the solar collector efficiency

as a function of the tilt angle of the obstacles. The result was that horizontal baffles give the worst efficiency, whereas with baffles sloping between 60° and 120° a high efficiency of up to 62% can be achieved.

The effects of a short, thin fin attached to the hot wall of a partially differentially heated enclosure was studied by Torabi et al.¹⁷ The goal of the work is to show how to control the heat transfer by simply adjusting the position of the fin. The authors have shown that it is possible to increase the average Nu up to 250%, as it is also possible to decrease it drastically with a careful choice of the fin. Similarly, Mehryan et al.¹⁸ examined the problem of a differentially heated enclosure with a baffle installed on the hot wall. In this study, the baffle is elastically flexible, and the fluid flowing through the cavity can be Newtonian or non-Newtonian. It was proven that the variation of the modulus of elasticity of the baffle has practically no effect on the heat transfer.

Yang et al.¹⁹ investigated the 3D turbulent forced convection in a channel filled with nanofluid. The channel with a constant wall temperature is provided with a rectangular groove. In this study two models were considered: the single-phase and the two-phase (solid–liquid) models treating the nanoparticles and the base fluid separately. The authors mentioned that using grooves can improve the heat transfer by 18.2%.

An experimental study on the heat transfer in a channel equipped with a matrix consisting of a set of 30 V-shaped fins and multiple counter-rotating ribbons was performed by Promvong.²⁰ The results revealed that depending on the shape of the ribbons the heat transfer can be enhanced by 63%.

Li et al.²¹ studied the natural convection of the alumina dispersed in water mixture. The enclosure is inclined and subjected to a uniform lateral magnetic field. A hot baffle was positioned in the center of the cavity. The results concluded that an increase in the Rayleigh number and the Hartmann number leads to a 350% amplification and a 45% reduction, respectively, in the Nusselt number. Other articles on this topic can be found in the literature.^{22,23}

The control of heat transfer by natural convection through the coupling of several passive and active techniques provides good energy efficiency and flexibility of operation of different systems such as electronic equipment, renewable energy technologies, ventilation and heating of buildings, etc. Based on the above literature review and to the best of our knowledge, three-dimensional systems coupling the addition of nanoparticles and a complex shaped obstacle as passive techniques and the application of an external magnetic field as the active technique are almost nonexistent.

This paper is therefore an original work devoted to the understanding of the behavior of the different instabilities that can arise after the application of an external magnetic field on a nanofluid filled enclosure fitted with a complex V-shaped obstacle. The temperature, velocity, entropy, and electric potential fields for different Rayleigh numbers, Hartmann numbers, nanoparticle volume fractions, and obstacle opening angles will be presented, detailed, and discussed.

The remainder of this paper is organized as follows. In Methodology and Mathematical Modeling, the physical model, governing equations, and numerical method are formulated. A subsection presents the Model Verification and Grid Sensitivity Test. The Results and Discussion are presented next. Finally, we end with a Conclusion section.

METHODOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

Physical Problem. A 3D enclosure filled with CNT–water is considered (Figure 1). The left and right walls are kept at a hot

Table 1. Properties of Water (Base Fluid) and CNT (Dispersed Nanoparticles)^{29–32}

physical properties	water	CNT
C_p (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	4.179	0.425
ρ (kg·m ⁻³)	997.1	2600
μ (Pa·s)	10 ⁻³	-
k (kW·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.613 × 10 ⁻³	6.6
β (K ⁻¹)	2.1 × 10 ⁻⁶	16 × 10 ⁻⁷
σ (Ω ⁻¹ ·m ⁻¹)	5 × 10 ⁻²	48 × 10 ⁻⁸

Table 2. Comparison of Nu_w with the Findings of Ozoe and Okada³³

	Nu_w	
$Ha = 100$	present model	4.458
	Ozoe and Okada ³³	4.9068
$Ha = 200$	present model	2.2781
	Ozoe and Okada ³³	4.2561
$Ha = 300$	present model	4.3974
	Ozoe and Okada ³³	4.2014

Table 3. Grid Sensitivity Check for $Ra = 10^5$, $\phi = 0.03$, $Ha = 50$, and $\theta = 40^\circ$

	Nu_w	percentage increase	incremental increase
E1: 83175	4.658	-	-
E2: 421557	4.7068	1.046%	0.127%
E3: 622551	4.7851	0.127%	0.227%
E4: 1089405	4.7614	6.7814	0.47865

temperature ratio ratio between hot, and cold fins, respectively, flow is considered under nonspaced buoyancy. Evidently, convection can be generated for the magnetic field in five different directions ($\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_x$).

The volume fraction of the nanofluid never exceeds 50% it can be considered that the nanofluid never enters a single-phase.

Governing Equations. Under the above-mentioned assumptions, the governing equations are given as

$$\nabla \cdot \vec{V}' = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}'}{\partial t'} + (\vec{V}' \cdot \nabla) \vec{V}' = -\frac{1}{\rho_{nf}} \nabla P' + \frac{1}{\rho_{nf}} (\vec{J}' \times \vec{B}') + \nu_{nf} \nabla^2 \vec{V}' - \beta_t (T' - T'_c) \vec{g} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T'}{\partial t'} + \vec{V}' \cdot \nabla T' = \alpha_{nf} \Delta T' \quad (2)$$

$$\vec{J}' = \sigma_{nf} (\nabla \phi' + \vec{V}' \times \vec{B}') \quad \text{with} \quad \vec{E} = -\nabla \phi' \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}' = 0 \quad (4)$$

The dimensionless variables are chosen as

$$t = \frac{t'}{L^2 / \alpha}; (x, y, z) = \frac{(x, y, z)'}{L}; (V_x, V_y, V_z) = \frac{(V_x, V_y, V_z)'}{\alpha / L}; P = \frac{P'}{\rho(\alpha / L)}; \vec{J} = \frac{\vec{J}'}{\sigma \cdot V_0 \cdot B_0}; \vec{B} = \frac{\vec{B}'}{B_0}; \phi = \frac{\phi'}{L \cdot V_0 \cdot B_0}; \text{and } T = \frac{(T' - T'_c)}{(T'_h - T'_c)}$$

Thus, the governing equations become as follows:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \frac{\sigma_{nf} \rho_t}{\sigma \rho_{nf}} Ha^2 Pr (\vec{J} \times \vec{B}) + Pr \left(\frac{\nu_{nf}}{\nu_f} \right) \nabla^2 \vec{V} + \left(\frac{\beta_{nf}}{\beta_t} \right) Ra Pr T \vec{g} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_t} \nabla^2 T \quad (8)$$

$$\vec{J} = -\nabla \phi + \vec{V} \times T^{r1} - \eta Pr \varphi Ha^2 (\vec{V} \cdot \vec{B}) \nabla \vec{0} \quad (9)$$

Boundary conditions are stated as (10)

- On left wall: $T = 1, u = 0, v = w = 0$
- On right wall: $T = 0, u = v = w = 0$
- On obstacle: $T = 6, u = v = w = 0, \frac{\partial \theta}{\partial n} \vec{n} = 0$
- On all walls: $\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0 = u = v = w = 0$

Boundary conditions are stated as:

- on left wall: $T = 1, u = 0, v = w = 0$
- On right wall: $T = 0, u = v = w = 0$
- On obstacle: $T = \vec{B}, u = v = w = 0, \frac{\partial \theta}{\partial n} \vec{n} = 0$
- On all walls: $\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0 = \vec{v} = 0 = u = v = w = 0$

Considering the MHD effect, the entropy generation is expressed as

$$\begin{aligned}
S'_{\text{gen}} = & \left\{ \frac{k_{\text{nf}}}{T_0^2} \left[\left(\frac{\partial T'}{\partial x'} \right)^2 + \left(\frac{\partial T'}{\partial y'} \right)^2 + \left(\frac{\partial T'}{\partial z'} \right)^2 \right] \right. \\
& + \frac{\mu_{\text{nf}}}{T_0} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial V'_x}{\partial x'} \right)^2 + \left(\frac{\partial V'_y}{\partial y'} \right)^2 + \left(\frac{\partial V'_z}{\partial z'} \right)^2 \right] \right. \\
& + \left(\frac{\partial V'_y}{\partial x'} + \frac{\partial V'_x}{\partial y'} \right)^2 + \left(\frac{\partial V'_z}{\partial y'} + \frac{\partial V'_y}{\partial z'} \right)^2 \\
& \left. \left. + \left(\frac{\partial V'_x}{\partial z'} + \frac{\partial V'_z}{\partial x'} \right)^2 \right\} + \frac{1}{T_0} \frac{1}{\sigma_{\text{nf}}} (J_x'^2 + J_y'^2 + J_z'^2) \right\} \quad (11)
\end{aligned}$$

Using the above-mentioned dimensionless variable, the local generated entropy (N_s) becomes

$$\begin{aligned}
N_s = & \frac{k_{\text{nf}}}{k_f} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \\
& + \frac{\mu_{\text{nf}}}{\mu_f} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 \right] \right. \\
& + \left[\left(\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right)^2 \right] \left. \right\} \\
& + I_s \frac{\mu_f}{\mu_{\text{nf}}} + \frac{\sigma_{\text{nf}}}{\sigma_f} Ha^2 (J_x^2 + J_y^2 + J_z^2) \quad (12)
\end{aligned}$$

with $I_s = \left(\frac{\alpha_f}{l \Delta T} \right)^2 T_0$ as the irreversibility coefficient.

The total generated entropy is expressed as

$$\begin{aligned}
S_{\text{tot}} = & \int_v N_s \, dv = \int_v (N_{s-\text{th}} + N_{s-\text{fr}} + N_{s-\text{m}}) \, dv \\
= & S_{\text{th}} + S_{\text{fr}} + S_{\text{m}} \quad (13)
\end{aligned}$$

The Bejan number is

$$Be = \frac{S_{\text{th}}}{S_{\text{th}} + S_{\text{fr}} + S_{\text{m}}} \quad (14)$$

The local and average Nusselt numbers are

$$Nu = \left(\frac{k_{\text{nf}}}{k_f} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=1} \right) \quad (15)$$

and

$$Nu_{\text{av}} = \int_0^1 \int_0^1 Nu \, dy \, dz \quad (16)$$

The effective properties (Table 1) of the CNT–nanofluid are^{24–29}

$$\rho_{\text{nf}} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (17)$$

$$C_{p,\text{nf}} = \frac{(1 - \phi)(\rho_f C_{p,f}) + \phi(\rho_{\text{CNT}} C_{p,\text{CNT}})}{\rho_{\text{nf}}} \quad (18)$$

$$\beta_{\text{nf}} = \frac{(1 - \phi)(\rho_f \beta_f) + \phi(\rho_{\text{CNT}} \beta_{\text{CNT}})}{\rho_{\text{nf}}} \quad (19)$$

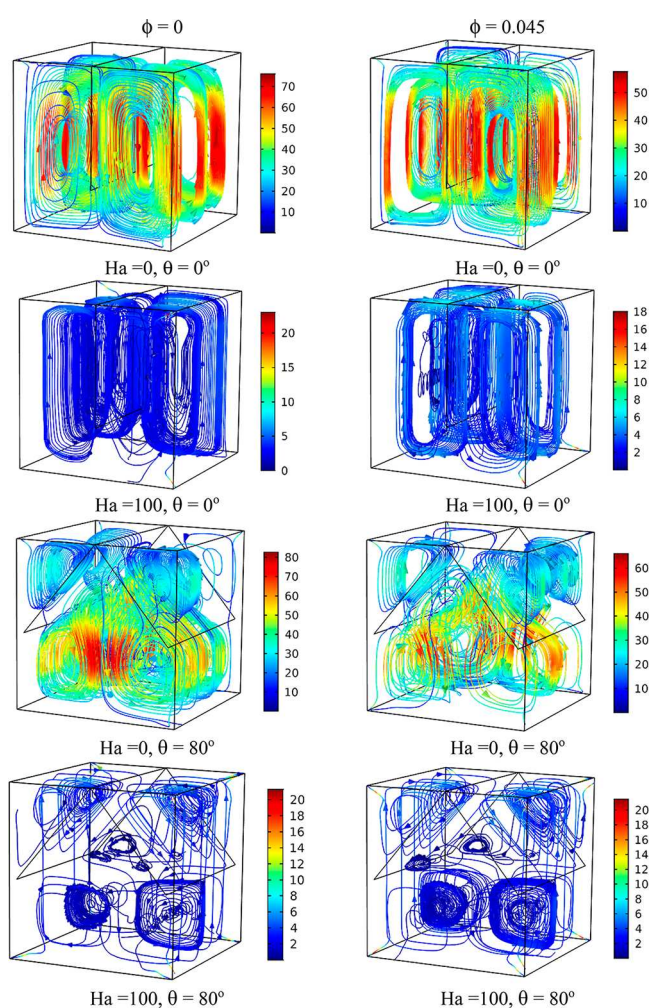


Figure 2. Flow field for different Ha numbers and inclination angle of the fins for $Ra = 10^5$.

$$\mu_{\text{nf}} = \mu_f (1 + a\phi + b\phi^2) \quad (20)$$

With $a = 13.5$ and $b = 904.4$ for tube shaped nanoparticles (Hamilton and Crosser model),

$$k_{\text{nf}} = k_f \frac{(1 - \phi) + 2\phi \frac{k_{\text{CNT}}}{k_{\text{CNT}} - k_f} \ln \frac{k_{\text{CNT}} + k_f}{2k_f}}{(1 - \phi) + 2\phi \frac{k_f}{k_{\text{CNT}} - k_f} \ln \frac{k_{\text{CNT}} + k_f}{2k_f}} \quad (21)$$

$$\sigma_{\text{nf}} = \sigma_f \left[1 + \frac{3 \cdot \phi \cdot \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_f} - 1 \right)}{\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_f} + 2 \right) - \phi \cdot \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_f} - 1 \right)} \right] \quad (22)$$

Numerical Method. The FEM method based on the Galerkin's Weighted Residual technique is employed to solve the set of the dimensionless governing eqs 6–10. The Lagrange polynomials are expressed as

$$g = \sum_{j=1}^{N_s} \Omega_j^s G_j$$

- Ω : shape function
- G : values at the nodes of the elements.
- Time dependent parts are treated by the backward differentiation formula (BDF)

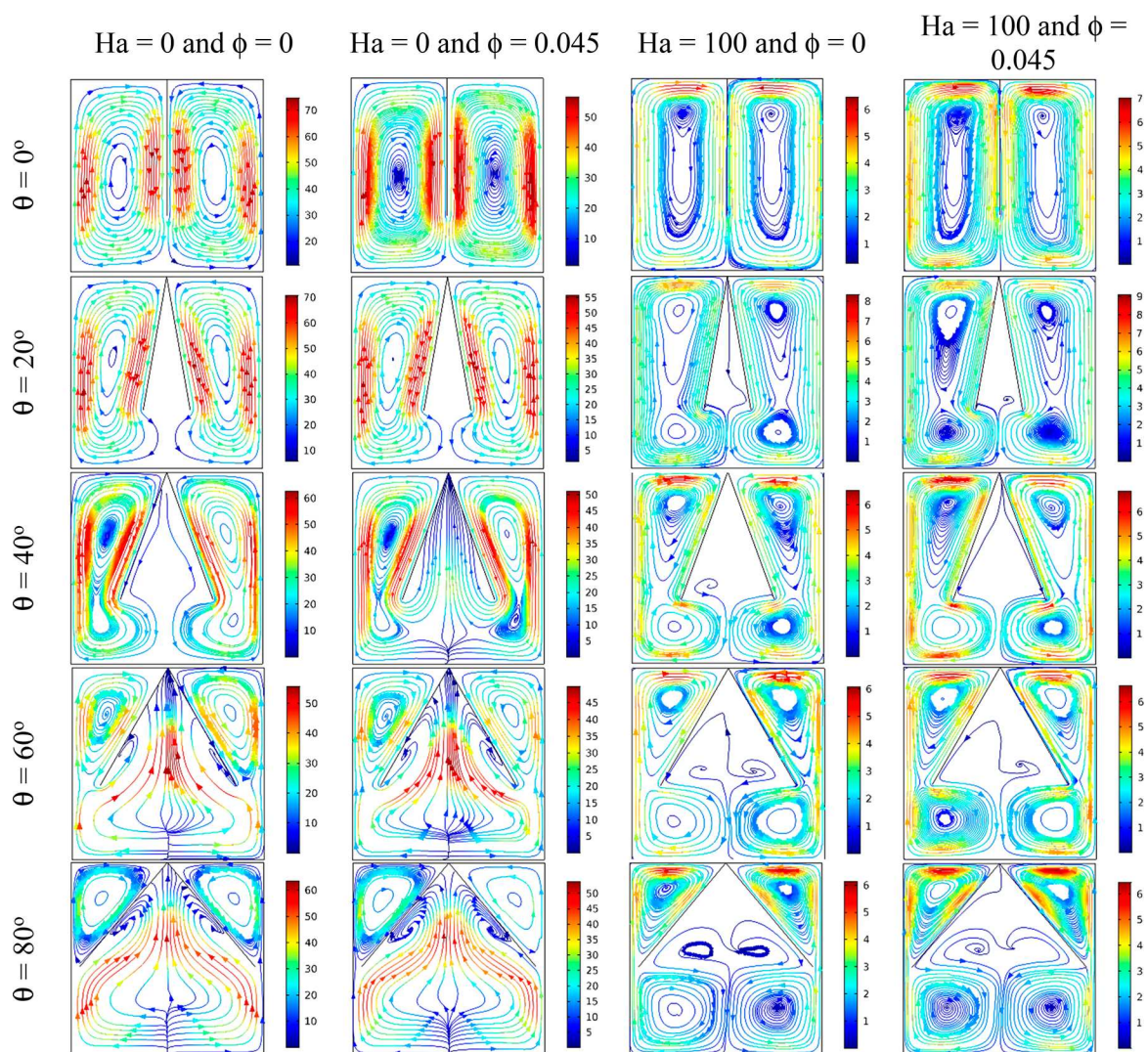


Figure 3. Effects of fin inclination angle for different nanoparticle volume fractions, Ha numbers, and inclination angles for $Ra = 10^5$.

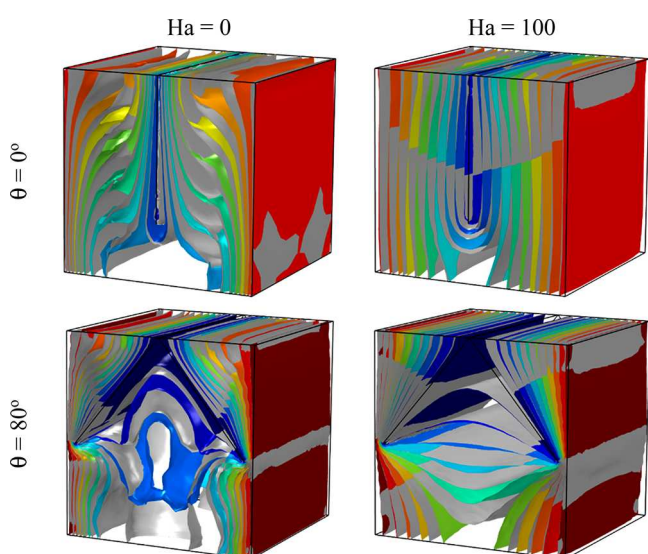


Figure 4. Temperature distribution for $Ra = 10^5$. Colors ($\phi = 0.045$) and gray ($\phi = 0$) indicate different angles between the fins.

- The convergence criterion is $\left| \frac{\Gamma^{n+1} - \Gamma^n}{\Gamma^{n+1}} \right| \leq 10^{-6}$

Model Verification and Grid Sensitivity Test. The verification of the present model (Table 2) is performed by comparison with the 3D findings of Ozoe and Okada.³³ The comparison shows a good agreement between the results.

To check the grid sensitivity (Table 3), the results of Nu_{av} are compared for three mesh element numbers, namely, E1, E2, E3, and E4, for $Ra = 10^5$, $\phi = 0.03$, $Ha = 50$, and $\theta = 40^\circ$. The difference between the result of the mesh E3 and that of mesh E4 is only 0.88%; thus, in order to get accurate results while saving the computation time, the mesh number E3 is opted for in all the numerical executions.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 illustrates the 3D flow structure for two the values of θ in the absence and presence of the magnetic field. From this figure it can be noticed that the flow structure is highly affected by the angle between the obstacles. In fact, a multivortex regime is created just by varying the θ angle from 0 to 80° . However, when the baffle was fixed at $\theta = 0^\circ$, the cavity gets divided into two parts, and each section behaves in one vortex; when it is fixed at $\theta = 80^\circ$, the flow becomes multicellular. In the absence of the magnetic field, the addition of a CNT ($\phi = 0.045$) reduces the flow intensity by 23.33% for $\theta = 0$ and 28.12% for $\theta = 80^\circ$.

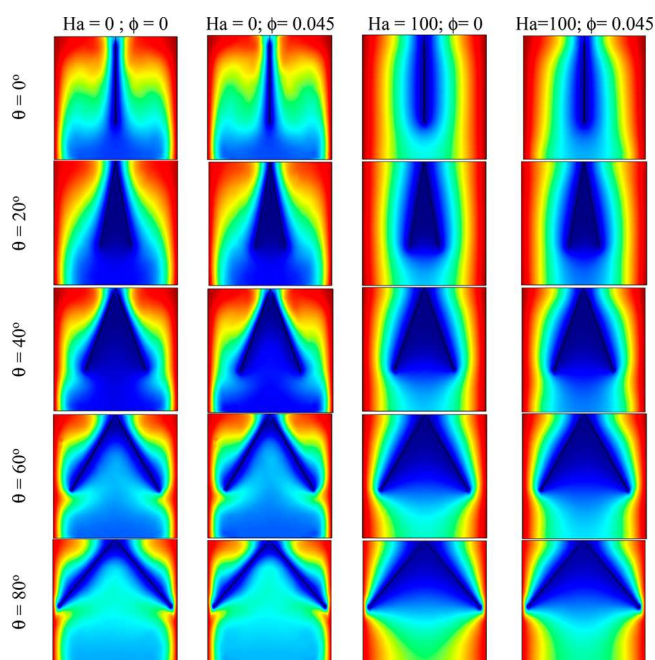


Figure 5. Temperature field at the $z = 0.5$ plane for $Ra = 10^5$ at different nanoparticle volume fractions and inclination angles of the fins.

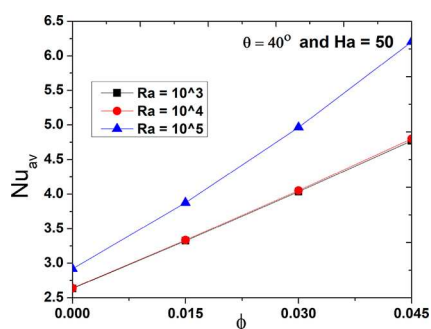


Figure 6. Nu_{av} versus CNT volume fraction for various Ra values at $\theta = 40^\circ$ and $Ha = 50$.

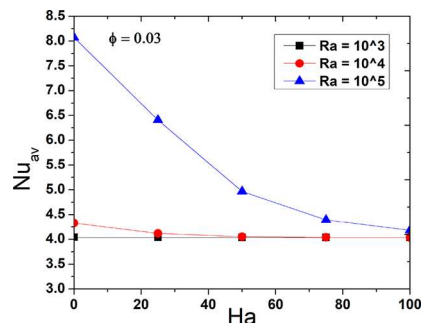


Figure 7. Nu_{av} versus Hartman number for various Ra values at $\phi = 0.03$.

This is due to the increase of the viscous dissipations. On the other hand, for $Ha = 100$, the flow intensity is slightly reduced 27.8% for $\theta = 0$ and remains quasi-constant for $\theta = 80^\circ$. The magnetic field has a flow damping effect due to the generated Lorentz force. It is also to be mentioned that, for all the cases, the flow has a 3D character with a complex structure, and in addition to the main flow, a transversal flow occurs toward the z -axis.

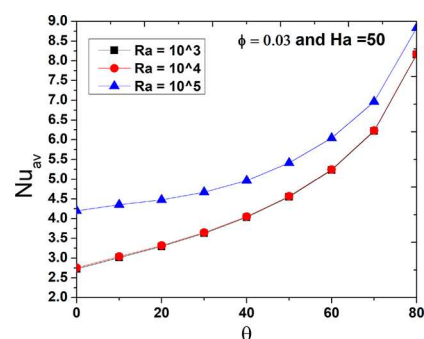


Figure 8. Nu_{av} versus the inclination between the fins for $Ha = 50$, $\phi = 0.03$, and various values of Ra .

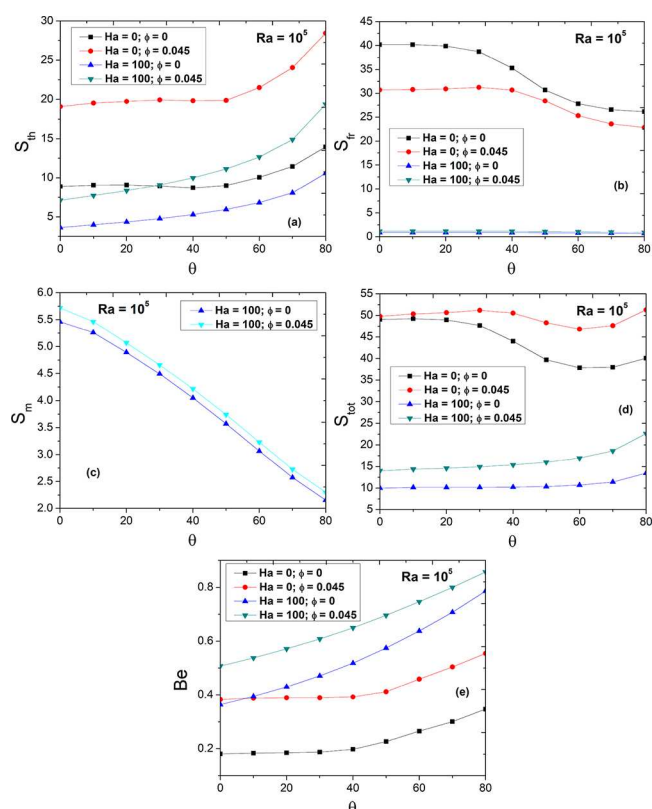


Figure 9. Effect of θ on the entropy generation for $Ra = 10^5$: (a) thermal, (b) viscous, (c) magnetic, (d) total, and (e) Bejan Number.

Thus, Figure 3 is presented for a better understanding of the flow behavior and cellular behavior.

Figure 3 illustrates the effects of the angle between the fins on the main central flow structure.

It is to be mentioned that, for all the considered cases, the addition of CNTs reduces the flow intensity due to the increase of the viscosity. As an illustration, for $Ha = 0$, the addition of nanoparticles causes a reduction of the magnitude of the velocity by about 35% for all the cases. Also, the application of the magnetic field causes a Lorentz force that opposes the thermal buoyancy and induces a square shaped flow near the walls.

For $\theta = 0$, the flow is composed of two counter-rotating vortices that rise up by applying the magnetic field. The increase of the angle between the cold fins causes the apparition of a multivortex structure, especially for higher CNT volume fraction and Hartman numbers.

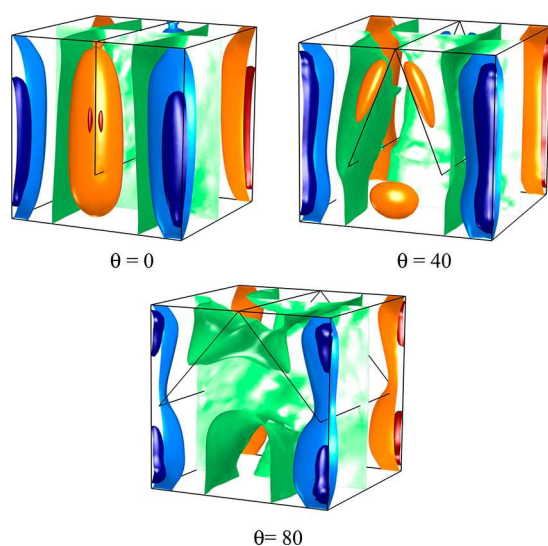


Figure 10. Electrical Potential for $Ra = 10^5$, $Ha = 50$, and $\phi = 0.045$.

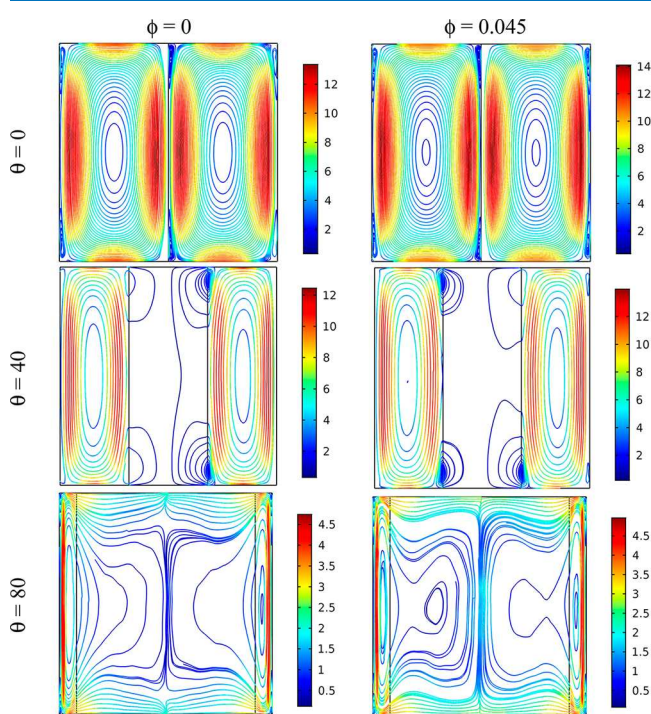


Figure 11. Current density at the central xz plane for $Ra = 10^5$ and $Ha = 50$.

Figures 4 and 5 present the temperature iso-surfaces and the temperature fields, respectively, for $Ra = 10^5$ at different angles between the fins. In the absence of the magnetic effect and due to the intensity of the flow, distortions and vertical stratifications of the iso-surfaces of temperature are encountered. These distortions and vertical stratifications become more important by adding the CNT. The magnetic effect reduces the distortions; the iso-surfaces of the temperature become parallel to the cold fins, and the temperature field becomes similar to that of a purely conductive regime due to the damping effect of the induced Lorentz force. It is also noticed that the temperature gradients close to the active walls are increased by adding the CNT and reduced by increasing Hartman number. This finding means that the heat transfer is enhanced by the increase of the

nanoparticle's concentration and damped by the presence of the magnetic field.

Figure 6 illustrates the effect of the CNT volume fraction on the heat transfer rate for $\theta = 40^\circ$ and $Ha = 50$. The increase of Ra is obviously found to increase Nu_{av} due to the increase of the buoyancy forces. The addition of nanoparticles ameliorates the properties of the nanofluid and consequently enhances the heat transfer. In fact, Nu_{av} is approximately doubled by increasing the CNT volume fractions from 0 to 0.045.

The effect of the applied external magnetic field on Nu_{av} is presented in Figure 7. For all the considered Ra values, Nu_{av} is significantly reduced by the applied magnetic field. For example, for $Ra = 10^5$ a reduction of about 43% occurs. This reduction is justified by the induced Lorentz force that opposes the convective flow and reduces the temperature gradient close to the active walls.

As presented in Figure 8 and in opposition with the effect of Ha , the increase of the angle between the fins causes a considerable enhancement of the heat transfer rate. In fact, the Nu_{av} number is doubled by increasing the angle from 0 to 80° . This is due to the fact that the hot and cold surfaces become closer, which causes the intensification of the thermal buoyancy in the created tight regions.

The effect of the angle between the fins on the irreversibility productions is depicted in Figure 9, for $Ra = 10^5$ and various Ha and ϕ values. It is to be mentioned that the irreversibility coefficient is fixed at $I_s = 10^{-4}$. The angle between the fins has different effects on the evaluated types of irreversibility. In fact, it increases the thermal entropy and decreases both the viscous and magnetic entropy generations. The increase of the thermal entropy production is due to an increase of the temperature gradients when the cold fins come close to the hot walls, while the viscous entropy generation decreases due to the opposition of fins to the flow when the angle between the fins is higher. The variation of the total entropy generation has different behaviors in the presence and in the absence of the magnetic field. In fact, it is decreasing and then increasing for $Ha = 0$ and is increasing for $Ha = 100$. It is also to be mentioned that the addition of CNT nanoparticles causes the increase of all the types of entropies and, in opposition, the application of the magnetic field reduces them. The variation of the Be number is also monotone, indicating that the increase of the angle between the fins favors the thermal entropy generation compared to the other kinds of entropies.

Figure 10 presents the iso-surface of the electrical potential for $Ra = 10^5$, $Ha = 50$, and $\phi = 0.045$ and various angles between the fins. The maximum and minimum values of the electrical potential are located at the corner and are mainly null in the core region of the cavity. The increase of the angle causes a distortion of these iso-surfaces.

Figure 11 illustrates the current density at the central xz -plane for $Ra = 10^5$ and $Ha = 50$. It is noticed that the current lines are closed due to electrical insulation of the walls with the apparition of counter-rotative cells at the corners. This is due to the dominance of the electrical potential ($-\vec{\nabla}\phi$) compared to the induced electrical current ($\vec{V} \times \vec{e}_B$). The increases of the angle between the fins reduce the size of the principal cells of the current density. It is also noticed that the addition of CNT causes an increase in the magnitude of the current density due to the enhancement of the electrical conductivity.

CONCLUSION

A 3D numerical simulation on the MHD convective heat transfer of CNTs dispersed in water in a cubic cavity equipped with two inclined fins is performed using the FEM. The main conclusions can be summarized as follows.

- The use of nanoparticles can enhance the heat transfer rate by 100% and augments the entropy production by 30%.
- The increase of the angle between the fins causes considerable changes in the flow and temperature fields.
- The application of the magnetic field allows a control of the flow and the heat transfer. A reduction of about 100% in the Nusselt number was recorded just by varying Ha from 0 to 100.
- The variation of the fin inclination from 0 to 80° intensifies the heat transfer by 218%.
- The electromagnetic variables are affected by the presence of the fins.
- For a strong magnetic field ($Ha = 100$), the viscous entropy is destroyed at the expense of the magnetic entropy.
- Increasing the fin angle decreases the viscous entropy but increases the thermal and magnetic entropy.
- The use of CNT reduces the flow intensity and causes an augmentation of the magnitude of the electrical current density.

AUTHOR INFORMATION

Corresponding Author

Walid Hassen – Laboratory of Metrology and Energy systems, Monastir, University of Monastir, 5000 Monastir, Tunisia; orcid.org/0000-0002-6779-2335; Email: hassen.walid@gmail.com

Authors

Soulayma Gal – Laboratory of Metrology and Energy systems, Monastir, University of Monastir, 5000 Monastir, Tunisia

Lioua Kolsi – Mechanical Engineering Department, College of Engineering, University of Ha'il, 81451 Ha'il City, Saudi Arabia

Naim Ben Ali – Department of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Ha'il, 81451 Ha'il City, Saudi Arabia

Nidhal Ben Khedher – Mechanical Engineering Department, College of Engineering, University of Ha'il, 81451 Ha'il City, Saudi Arabia

Ali J. Chamkha – Faculty of Engineering, Kuwait College of Science and Technology, Doha District 35004, Kuwait

Complete contact information is available at:

<https://pubs.acs.org/10.1021/acsomega.2c00923>

Notes

The authors declare no competing financial interest.

ACKNOWLEDGMENTS

This research has been funded by Scientific Research Deanship at University of Ha'il, Saudi Arabia, through Project Number RG-21 035.

NOMENCLATURE

\vec{B} dimensionless magnetic field ($= \vec{B}' / B_0$)

Be	Bejan number
C_p	specific heat capacity, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
\vec{e}_B	direction of the magnetic field
\vec{E}	dimensionless electric field
\vec{F}	dimensionless Lorentz force
\vec{g}	gravitational acceleration, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Ha	Hartmann number
I_s	irreversibility coefficient
J	dimensionless density of electrical current
K	thermal conductivity, $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Nu	Nusselt number
N_s	dimensionless local generated entropy
P	dimensionless pressure
Pr	Prandtl number
Ra	Rayleigh number
S'_{gen}	entropy generation, $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$
S_{tot}	dimensionless total generated entropy
T	dimensionless temperature
t	dimensionless time
\vec{V}	dimensionless velocity vector
x, y, z	dimensionless Cartesian coordinates

Greek Characters

α	thermal diffusivity, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
β	thermal expansion coefficient, K^{-1}
μ	dynamic viscosity, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
ν	kinematic viscosity, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
ρ	density of the fluid, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
σ	electric conductivity, $\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$

Subscripts

av	average
c	cold
fr	friction
h	hot
m	magnetic
nf	nanofluid
p	solid particle
th	thermal

ABBREVIATIONS

BDF	backward differentiation formula
CNTs	carbon nanotubes
FEM	finite element method
MHD	magnetohydrodynamics
MWCNTs	multiwall carbon nanotubes

REFERENCES

- (1) Gangawane, K. M.; Oztop, H. F.; Abu-Hamdeh, N. Mixed convection characteristic in a lid-driven cavity containing heated triangular block: Effect of location and size of block. *Int. J. Heat Mass Transfer* **2018**, *124*, 860–875.
- (2) Kolsi, L.; Oztop, H. F.; Abu-Hamdeh, N.; Alghamdi, A.; Naceur Borjini, M. Three dimensional analysis of natural convection and entropy generation in a sharp edged finned cavity. *Alexandria Eng. J.* **2016**, *55*, 991–1004.
- (3) Rathor, Y.; Aharwal, K. R. Heat transfer enhancement due to a staggered element using liquid crystal thermography in an inclined discrete rib roughened solar air heater. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* **2020**, *118*, 104839.
- (4) Du, R.; Gokulavani, P.; Muthtamilselvan, M.; Al-Amri, F.; Abdalla, B. Influence of the Lorentz force on the ventilation cavity having a centrally placed heated baffle filled with the $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ hybrid nanofluid. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* **2020**, *116*, 104676.
- (5) Bansal, S.; Chatterjee, D. Magneto-convective transport of nanofluid in a vertical lid-driven cavity including a heat-conducting

rotating circular cylinder. *Numer. Heat Transfer, Part A* **2015**, *68*, 411–431.

(6) Ray, S.; Chatterjee, D. MHD mixed convection in a lid-driven cavity including heat conducting circular solid object and corner heaters with Joule heating. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* **2014**, *57*, 200–207.

(7) Ray, S.; Chatterjee, D. MHD mixed convection in a lid-driven cavity including heat conducting solid object and corner heaters with Joule heating. *Numer. Heat Transfer, Part A* **2014**, *66*, 530–550.

(8) Chatterjee, D. MHD mixed convection in a lid-driven cavity including a heated source. *Numer. Heat Transfer, Part A* **2013**, *64*, 235–254.

(9) Chatterjee, D.; Mishra, R. Numerical investigation of transient magnetohydrodynamic mixed convection in a ventilated cavity containing two heated circular cylinders. *Heat Transfer Eng.* **2018**, *39*, 1052–1066.

(10) Chatterjee, D.; Kumar Gupta, S. Magnetohydrodynamic natural convection in a square enclosure with four circular cylinders positioned at different rectangular locations. *Heat Transfer Eng.* **2017**, *38*, 1449–1465.

(11) Chatterjee, D.; Halder, P. MHD mixed convective transport in square enclosure with two rotating circular cylinders. *Numer. Heat Transfer, Part A* **2014**, *65*, 802–824.

(12) Hassen, W.; Kolsi, L.; Ghachem, K.; Almeshaal, M. A.; Maatki, C.; Borjini, M. N. Numerical investigation of electro-thermo-convection in a square enclosure with incorporated hot solid body. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2021**, *143*, 2647–2661.

(13) Hassen, W.; Kolsi, L.; Mohammed, H. A.; Ghachem, K.; Sheikholeslami, M.; Almeshaal, M. A. Transient electrohydrodynamic convective flow and heat transfer of MWCNT-Dielectric nanofluid in a heated enclosure. *Phys. Lett. A* **2020**, *384*, 126736.

(14) Xiao, H.; Liu, P.; Liu, Z.; Liu, W. Performance analyses in parabolic trough collectors by inserting novel inclined curved-twisted baffles. *Renewable Energy* **2021**, *165*, 14–27.

(15) Ajeel, R. K.; Sopian, K.; Zulkifli, R. Thermal-hydraulic performance and design parameters in a curved-corrugated channel with L-shaped baffles and nanofluid. *J. Energy Storage* **2021**, *34*, 101996.

(16) Luan, N. T.; Phu, N. M. Thermohydraulic correlations and exergy analysis of a solar air heater duct with inclined baffles. *Case Stud. Therm. Eng.* **2020**, *21*, 100672.

(17) Torabi, M.; Keyhani, A.; Peterson, G. P. A comprehensive investigation of natural convection inside a partially differentially heated cavity with a thin fin using two-set lattice Boltzmann distribution functions. *Int. J. Heat Mass Transfer* **2017**, *115*, 264–277.

(18) Shahabadi, M.; Mehryan, S. A. M.; Ghalambaz, M.; Ismael, M. Controlling the natural convection of a non-Newtonian fluid using a flexible fin. *Appl. Math. Modell.* **2021**, *92*, 669–686.

(19) Yang, Y. T.; Tang, H. W.; Zeng, B. Y.; Wu, C. H. Numerical simulation and optimization of turbulent nanofluids in a three-dimensional rectangular rib-grooved channel. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* **2015**, *66*, 71–79.

(20) Promvong, P. Thermal performance in square-duct heat exchanger with quadruple V-finned twisted tapes. *Appl. Therm. Eng.* **2015**, *91*, 298–307.

(21) Li, Z.; Hussein, A. K.; Younis, O.; Afrand, M.; Feng, S. Natural convection and entropy generation of a nanofluid around a circular baffle inside an inclined square cavity under thermal radiation and magnetic field effects. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* **2020**, *116*, 104650.

(22) Arif, S.; Taweekun, J.; Ali, H. M.; Yanjun, D. A. I.; Ahmed, A. Feasibility study and economic analysis of grid connected solar powered net zero energy building (NZEB) of shopping mall for two different climates of Pakistan and Thailand. *Case Stud. Therm. Eng.* **2021**, *26*, 101049.

(23) Akram, M. A.; Khushnood, S.; Tariq, S. L.; Nizam, L. A.; Ali, H. M. The effect of grid generated turbulence on the fluidelastic instability response in parallel triangular tube array. *Ann. Nucl. Energy* **2021**, *158*, 108245.

(24) Abu-Nada, E.; Chamkha, A. J. Mixed convection flow in a lid-driven inclined square enclosure filled with a nanofluid. *Eur. J. Mech. B/Fluids* **2010**, *29*, 472–482.

(25) Basak, T.; Roy, S.; Pop, I. Heat flow analysis for natural convection within trapezoidal enclosures based on heatline concept. *Int. J. Heat Mass Transfer* **2009**, *52*, 2471–2483.

(26) Imtiaz, M.; Hayat, T.; Alsaedi, A.; Ahmad, B. Convective flow of carbon nanotubes between rotating stretchable disks with thermal radiation effects. *Int. J. Heat Mass Transfer* **2016**, *101*, 948–957.

(27) Selimefendigil, F.; Oztop, H. F. Control of natural convection in a CNT-water nanofluid filled 3D cavity by using an inner T-shaped obstacle and thermoelectric cooler. *Int. J. Mech. Sci.* **2020**, *169*, 105104.

(28) Hamilton, R. L.; Crosser, O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* **1962**, *1*, 187–191.

(29) Kolsi, L.; Alrashed, A. A.; Al-Salem, K.; Oztop, H. F.; Borjini, M. N. Control of natural convection via inclined plate of CNT-water nanofluid in an open sided cubical enclosure under magnetic field. *Int. J. Heat Mass Transfer* **2017**, *111*, 1007–1018.

(30) Benos, L. T.; Karvelas, E. G.; Sarris, I. E. A theoretical model for the magnetohydrodynamic natural convection of a CNT-water nanofluid incorporating a renovated Hamilton-Crosser model. *Int. J. Heat Mass Transfer* **2019**, *135*, 548–560.

(31) Al-Rashed, A. A.; Kalidasan, K.; Kolsi, L.; Aydi, A.; Malekshah, E. H.; Hussein, A. K.; Kanna, P. R. Three-dimensional investigation of the effects of external magnetic field inclination on laminar natural convection heat transfer in CNT-water nanofluid filled cavity. *J. Mol. Liq.* **2018**, *252*, 454–468.

(32) Job, V. M.; Gunakala, S. R. Unsteady MHD free convection nanofluid flows within a wavy trapezoidal enclosure with viscous and Joule dissipation effects. *Numer. Heat Transfer, Part A* **2016**, *69*, 421–443.

(33) Ozoe, H.; Okada, K. The effect of the direction of the external magnetic field on the three-dimensional natural convection in a cubical enclosure. *Int. J. Heat Mass Transfer* **1989**, *32*, 1939–1954.

Chapitre IV Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides, modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

IV.1	Introduction	136
IV.2	Problématique et hypothèses	136
IV.3	Formulation mathématique.....	138
IV.3.1	Équations électromagnétiques :.....	138
IV.3.2	Dynamique des fluides	140
IV.3.3	Conditions aux limites.....	140
IV.4	Méthodes numériques et outils de simulation	142
IV.5	Maillage et sélection des éléments	142
IV.6	Dépendance et validation du code numérique.....	143
IV.7	Résultats et discussion.....	145
IV.7.1	Analyse de convergence	145
IV.7.2	Influence du sens d'écoulement	145
IV.7.3	Effet de la configuration d'écoulement	147
IV.7.4	Effet du courant électrique (I)	149
IV.7.5	Effet du champs magnétique (B).....	155
IV.7.6	Effet de vitesse	160
IV.8	Conclusion.....	165
IV.9	Références	166

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente une étude approfondie de la convection mixte magnétohydrodynamique (MHD) dans un microéchangeur fonctionnant avec des nanofluides. L'objectif principal est d'analyser l'interaction entre les champs électromagnétiques et la dynamique des fluides dans un système de refroidissement innovant, tout en évaluant l'impact des nanofluides sur la performance thermique du microéchangeur par comparaison avec celle de l'eau pure.

L'étude se concentre sur un microéchangeur conçu pour exploiter l'effet combiné d'un champ magnétique et d'un courant électrique, dans le but d'optimiser les caractéristiques de transfert thermique. L'utilisation de nanofluides, dont les propriétés thermophysiques dépendent de la température et peuvent être influencées par un champ magnétique, est explorée afin de maximiser l'efficacité thermique du système. Les nanofluides étudiés sont ceux dont la caractérisation complète a été réalisée dans le deuxième chapitre.

Une modélisation tridimensionnelle du système est adoptée pour prendre en compte les effets du champ électromagnétique généré par un aimant placé au-dessus d'une structure munie d'électrodes. Ce champ influence l'écoulement du fluide et modifie les mécanismes de transfert thermique. Le modèle intègre plusieurs configurations d'écoulement laminaire ainsi que des zones d'interaction solide-fluide couplées, permettant une analyse approfondie des paramètres influençant la performance thermique.

Le modèle s'appuie sur un système d'équations couplées régissant les phénomènes d'électromagnétisme, de dynamique des fluides et de transfert thermique. La résolution numérique de ces équations est effectuée par la méthode des éléments finis (MEF), implémentée via le logiciel COMSOL Multiphysics. Une section dédiée abordera rigoureusement les procédures de validation du modèle numérique ainsi que son analyse de sensibilité paramétrique.

Les simulations permettent une évaluation quantitative de l'influence conjuguée de paramètres clés : densité de flux magnétique, intensité du courant électrique, profil de vitesses hydrodynamiques et propriétés thermophysiques des nanofluides. Ces résultats constituent une base décisionnelle pour la conception optimisée de microéchangeurs innovants, en explicitant les mécanismes multiphysiques qui gouvernent les transferts énergétiques. Les implications méthodologiques de cette étude concernent spécifiquement le développement de systèmes de refroidissement haute performance nécessitant un contrôle thermique actif.

IV.2 Problématique et hypothèses

Cette étude numérique explore un système de refroidissement innovant basé sur l'interaction entre un champ électromagnétique et un écoulement fluide, tel qu'illustré dans la Figure IV.1 et décrit dans le Tableau IV.1. Un aimant, positionné au-dessus de la structure, génère un champ magnétique, tandis que deux électrodes, placées de part et d'autre du microéchangeur, appliquent un champ électrique. L'interaction de ces champs induit une force de Lorentz, influençant à la fois l'écoulement du fluide et les échanges thermiques.

Le microéchangeur comporte 11 canaux dédiés au fluide chaud et 10 au fluide froid, avec un écoulement laminaire. Les températures étudiées alignées sur celles des nanofluides caractérisés au Chapitre II, s'étendent de 283,15 à 313,15K. Les concentrations massiques étudiées varient entre 0.005 à 0.05 % en masse. L'étude compare les configurations *co-courant* et *contre-courant* afin d'identifier celle optimisant l'efficacité thermique. Quatre configurations distinctes sont analysées pour évaluer leurs performances thermiques et hydrodynamiques avant de sélectionner la plus performante :

- 1 ère configuration : Fluide froid (Eau) et fluide chaud (Eau)
- 2 ème configuration : Nanofluide froid (graphène / Eau) et nanofluide chaud (graphène / Eau)
- 3 ème configuration : Fluide froid (Eau) et nanofluide chaud (graphène / Eau)

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

- 4^{ème} configuration : Nanofluide hybride froid (graphène - Fe_3O_4 / Eau) et nanofluide chaud (graphène - Fe_3O_4 / Eau).

Les nanofluides utilisés, FLG/eau et FLG- Fe_3O_4 /eau, présentent des propriétés thermophysiques et rhéologiques détaillées au Chapitre II. La modélisation s'appuie sur les principes de la magnétohydrodynamique (MHD) pour décrire l'écoulement et quantifier l'influence des champs électromagnétiques sur les performances thermiques. Une pression constante est imposée en sortie des circuits afin de stabiliser l'écoulement et garantir des conditions reproductibles.

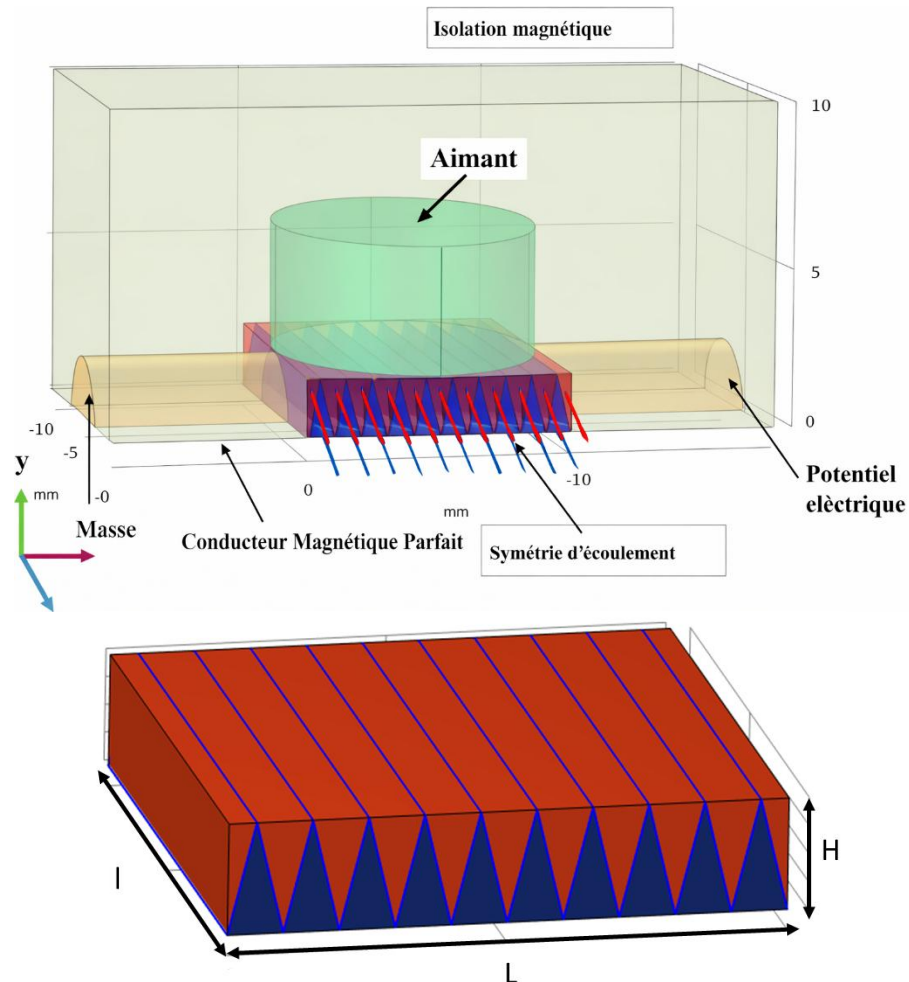


Figure IV.1. Configuration tridimensionnelle d'un système de refroidissement par interaction électromagnétique avec un fluide en circulation

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

Tableau IV.1. Paramètres de simulation

Densité de flux magnétique B [T]	$0,5 \leq B \leq 2$
Courant DC I [mA]	$0,2 \leq I \leq 0,5$
Température initiale T_0 [K]	293,15
Température chaude T_c [K]	313,15
Température froide T_f [K]	283,15
Vitesse d'entrée V (m/s)	$0,005 \leq V \leq 0,1$
L×l×H (mm)	(10×10×2)
Rayon de l'aimant	Rayon × Hauteur (mm) 5×4
Rayon de l'électrode	Rayon × Hauteur (mm) 2×7,5

IV.3 Formulation mathématique

Le modèle MHD repose sur trois systèmes d'équations principaux qui décrivent les interactions complexes entre un fluide et les champs électromagnétiques.

IV.3.1 Équations électromagnétiques

Ces équations caractérisent les interactions entre les champs électriques et magnétiques, notamment la création de la force de Lorentz, qui sera utile pour influencer l'écoulement du fluide.

Loi de Gauss pour le champ électrique

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{Eq IV.1}$$

Où ρ est la densité de charge électrique et ϵ est la permittivité du vide.

- **Loi de Gauss pour le champ magnétique**

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Eq IV.2}$$

- **Loi de Faraday**

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Eq IV.3}$$

- **Loi d'Ampère-Maxwell**

$$\nabla \times \vec{B} = \mu'_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{Eq IV.4}$$

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

- **L'équation d'induction magnétique**

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{B} = \frac{1}{\sigma \mu} \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{v} \quad \text{Eq IV.5}$$

- **Loi d'Ohm :**

$$\vec{J} = \sigma (-\nabla V' + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{Eq IV.6}$$

Le nombre de Reynolds magnétique est défini par :

$$\text{Re}_m = \mu_0 \sigma V L \quad \text{Eq IV.7}$$

Où, μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, σ est la conductivité électrique du fluide, V est la vitesse caractéristique de l'écoulement et L est la dimension caractéristique du domaine.

Cependant, dans le cadre de la simplification unidirectionnelle, et étant donné que le nombre de Reynolds magnétique est très faible ($\text{Re}_m \ll 1$), on peut supposer que le terme électrique domine largement le terme d'induction magnétique soit, $-\nabla V \gg v \times B$, donc le courant devient :

$$\vec{J} = \sigma (-\nabla V') \quad \text{Eq IV.8}$$

Cela permet de négliger la contribution du terme de vitesse croisée, facilitant la résolution séparée des équations de fluide et des équations électromagnétiques.

- **Force de Lorentz**

La force volumique agissant sur le fluide, due à l'interaction entre le courant et le champ magnétique, est donnée par :

$$F = \vec{J} \times \vec{B} \quad \text{Eq IV.9}$$

Soit $J=(J_x, J_y, J_z)$ les composantes du courant dans les directions x , y , et z , et $B=(B_x, B_y, B_z)$ les composantes du champ magnétique.

$$\vec{J} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ J_x & J_y & J_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

Où \vec{i} , \vec{j} , et \vec{k} sont les vecteurs unitaires dans les directions x , y , et z .

L'Eq IV. est donné par :

$$\text{Composante en } x : \quad F_x = J_y \cdot B_z - J_z \cdot B_y \quad \text{Eq IV.10}$$

$$\text{Composante en } y : \quad F_y = J_z \cdot B_x - J_x \cdot B_z \quad \text{Eq IV.11}$$

$$\text{Composante en } z : \quad F_z = J_x \cdot B_y - J_y \cdot B_x \quad \text{Eq IV.12}$$

IV.3.2 Dynamique des fluides

Ce système comprend l'équation de continuité et l'équation de la quantité de mouvement, qui définissent la physique de l'écoulement global des fluides.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad \text{Eq IV.13}$$

$$\rho_{nf}(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\nabla p + \mu_{nf}\nabla^2\vec{u} + \vec{F} + \rho_{nf}\vec{g}\beta_{nf}(T - T_{ref}) \quad \text{Eq IV.14}$$

Un nombre adimensionnel a été calculé pour identifier le type de convection. Il s'agit du nombre de Richardson :

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad \text{Eq IV.15}$$

- Ri \ll 1 : convection forcée dominante
- Ri \approx 1 : convection mixte
- Ri \gg 1 : convection naturelle dominante

IV.3.2.1.1 Equations thermiques

Les équations d'énergie dans un fluide conducteur et dans le solide s'écrivent généralement sous la forme suivante :

$$\rho_{nf}C_{p,nf}(\vec{u} \cdot \nabla T) = k_{nf}\nabla^2 T \quad (\text{dans le domaine fluide}) \quad \text{Eq IV.16}$$

$$\nabla^2 T = 0 \quad (\text{dans le domaine solide}) \quad \text{Eq IV.17}$$

IV.3.3 Conditions aux limites

Des conditions aux limites de température (T) et de vitesse constantes (u) sont prescrites à l'entrée des canaux. Une pression relative (p) nulle est imposée à la sortie de domaine, tandis qu'une condition de non-glissement est appliquée sur les parois internes. Les parois externes quant à elles, sont considérées comme adiabatiques. L'épaisseur de séparation entre les fluides est négligée, car très faible devant les dimensions caractéristiques du domaine. Ces conditions aux limites sont formulées sur le plan mathématique comme suit :

Entrées du fluide chaud

$$u_x = V ; u_y = u_z = 0 ; T = T_h \quad \text{Eq IV.18}$$

Sortie du fluide chaud

$$p = 0 ; \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{Eq IV.19}$$

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

Entrées du fluide froid

$$u_x = V ; u_y = u_z = 0 ; T = T_c \quad \text{Eq IV.20}$$

Sortie du fluide froid

$$p = 0 ; \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{Eq IV.21}$$

Paroi intérieure

$$\left[\frac{\partial T}{\partial n} \right]_{nf} = \frac{k_s}{k_{nf}} \left[\frac{\partial T}{\partial n} \right]_s \quad \text{Eq IV.22}$$

$$u_x = u_y = u_z = 0$$

Paroi extérieure

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \text{Eq IV.23}$$

Isolation magnétique : Utilisée sur toutes les surfaces sauf sur le plan xy.

$$n \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Eq IV.24}$$

$$\vec{B} = B_0 \cdot \vec{e}_y \quad \text{Eq IV.25}$$

Conducteur magnétique parfait : Appliqué sur le plan xy, permettant de confiner parfaitement le champ magnétique.

$$V_m = 0 \quad \text{Eq IV.26}$$

Isolation électrique : Imposée aux frontières non en contact avec les électrodes, pour empêcher toute fuite de courant

$$\vec{n} \cdot \vec{j} = 0 \quad \text{Eq IV.27}$$

Potentiel électrique :

$$V' = 0 \quad \text{Eq IV.28}$$

Densité de courant imposée :

$$J_0 = A \quad \text{Eq IV.29}$$

IV.3.3.1 Evaluation du transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est analysé au moyen du coefficient global de transfert de chaleur, complété par les nombres adimensionnels de Nusselt et de Reynolds. Le premier quantifie l'efficacité convective tandis que le second caractérise le régime hydrodynamique. Parallèlement le coefficient de frottement est déterminé pour évaluer les pertes de charges liées à l'écoulement.

- **Coefficient de transfert de chaleur :**

$$U = \frac{P_t}{(T_h - T_c)} \quad \text{Eq IV.30}$$

Où, P_t est la puissance totale échangée par unité de surface (W /m^2), et T_h et T_c représentent les températures chaudes et froides du fluide, respectivement en (K)

- **Nombre de Nusselt :**

$$Nu(x) = \frac{h_{moyen}(x) \cdot D_h}{k_{nf}} \quad \text{Eq IV.31}$$

Où h est le coefficient de transfert de chaleur convective, k_{nf} , est conductivité thermique du nanofluide, et $D_h = 0.000781$ m le diamètre hydraulique du microéchangeur calculer avec l'Eq IV. :

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P_e} \quad \text{Eq IV.32}$$

Avec : A est l'aire de la section transversale du canal (m^2) et P_e est le périmètre mouillé du canal (m).

- **Nombre de Reynolds :**

$$Re = \frac{\rho_{nf} \cdot V \cdot D_h}{\mu_{nf}} \quad \text{Eq IV.33}$$

- **Coefficient de frottement :**

$$f = \frac{DP \cdot D_h}{0,5 \cdot \rho_{nf} \cdot V^2 \cdot L} \quad \text{Eq IV.34}$$

Avec ρ_{nf} , est la densité du nanofluide, V est la vitesse d'entrée de nanofluide, L est la longueur de l'échangeur de chaleur et DP est la différence de pression entre l'entrée et la sortie du microéchangeur.

IV.4 Méthodes numériques et outils de simulation

Les méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis (MEF), les différences finies et les volumes finis, constituent des outils indispensables pour la résolution de problèmes complexes rencontrés en physique et en ingénierie. La MEF, en particulier, se distingue par sa capacité à traiter des géométries irrégulières et des phénomènes physiques complexes, offrant ainsi une évaluation précise des solutions. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel COMSOL Multiphysics afin de modéliser les interactions électromagnétique, hydrodynamique et thermique dans la géométrie et les configurations étudiées.

IV.5 Maillage et sélection des éléments

Afin d'évaluer l'indépendance du maillage (M) par apport à la solution, un test a été mené pour le nanofluide à base de graphène/eau, avec une concentration massique $\varphi_m = 0,01$ % en masse, une vitesse $V = 0,01$ m/s, un champ magnétique $B=1$ T et un courant $A=0,3$ A correspondant à la première configuration. Les résultats, présentés dans le Tableau IV.2, indique que l'écart relatif du coefficient de transfert thermique U entre les

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

maillages M4 et M5 ne dépasse pas 1,03 %. Cette observation valide que le maillage M4 constitue un compromis optimal entre la précision des résultats et le cout computationnel justifiant son adoption pour l'ensemble des simulations ultérieures. Ce maillage, présenté à la Figure IV.2, est composé de plusieurs types d'éléments dont les principales caractéristiques sont résumées dans le Tableau IV.3.

Tableau IV.2. Dépendance du coefficient de transfert thermique en fonction du maillage

	Nombre d'éléments	U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	Pourcentage de variation
M1	48476	588,2	-
M2	92126	565,62	3,84%
M3	207987	553,04	2,22%
M4	589521	547,12	1,07%
M5	1658579	540	1,03%

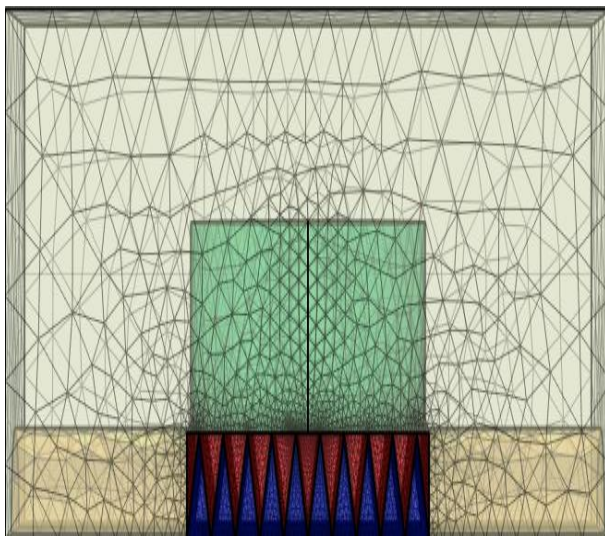


Figure IV.2. Configuration du maillage.

Tableau IV.3. Caractéristiques principales du maillage

Description	Valeur
Sommets du maillage	175 324
Tétraèdres	538 768
Pyramides	11 019
Prismes	148 084
Triangles	82 340
Quadrilatères	5 195
Eléments de bord	3 534
Eléments de sommet	92
Nombre total d'éléments	697 871

IV.6 Dépendance et validation du code numérique

Afin d'évaluer la précision du modèle numérique utilisé pour l'étude des performances thermiques du microéchangeur de chaleur en contre-courant avec un fluide caloporteur à base d'eau, une validation a été effectuée par une comparaison avec les données expérimentales de Huang et al. [1]. La Figure IV.3, présente l'évolution du coefficient de transfert thermique convectif en fonction de la vitesse d'écoulement $V(\text{m/s})$, montrant une excellente concordance avec les résultats expérimentaux. La Figure IV.4, compare l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds. Ces comparaisons confirment la fiabilité et la robustesse du modèle pour prédire le transfert thermique dans ces conditions. Une analyse complémentaire est illustrée par la Figure IV.5, qui confronte les résultats numériques du nombre de Nusselt aux corrélations établies par Maré et al. [2], Pantzali et al [3]., ainsi qu'à celles de Huang et al. [1]. L'étude révèle un alignement significatif entre les prédictions numérique et la corrélation proposée par Huang et al.[1], avec des écarts généralement inférieurs à $\pm 10\%$, ce qui valide la précision du modèle numérique utilisé. Les écarts plus importants observés avec Pantzali (supérieurs à $+40\%$) traduisent une sous-estimation du

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

transfert thermique dans leur étude. Quant aux résultats de Maré, bien qu'ils soient plus élevés, ils restent comparables, avec des écarts modérés (entre -15 % et -30 %). Ces comparaisons confirment la fiabilité du modèle développé dans COMSOL pour simuler les échanges thermiques en régime laminaire.

Dans la section suivante, les résultats des analyses menées sont présentés et discutés, en examinant l'impact du type de configuration, du courant électrique (I), de l'intensité du champ magnétique (B) et de la vitesse d'écoulement (V) sur les performances thermiques et hydrodynamiques d'un microéchangeur soumis à un champ magnétique uniforme.

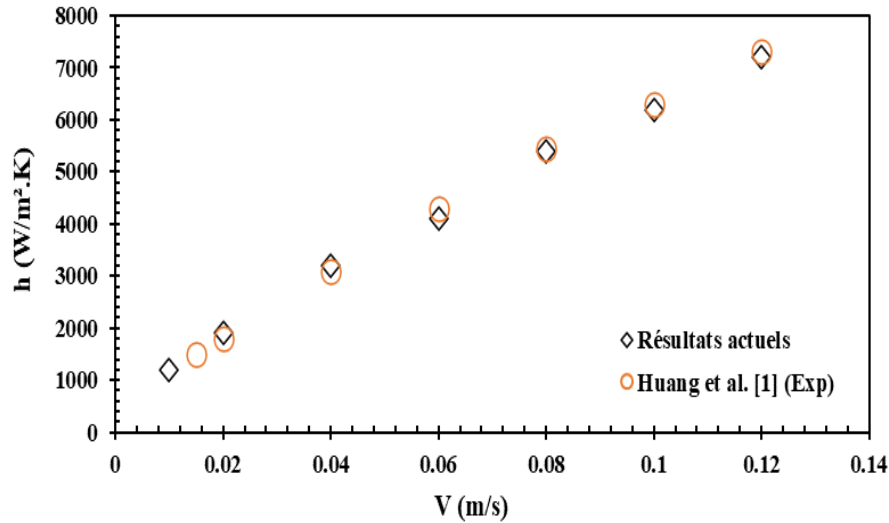


Figure IV.3. Coefficient de transfert thermique convectif en fonction de la vitesse (Comparaisons expérimentales).

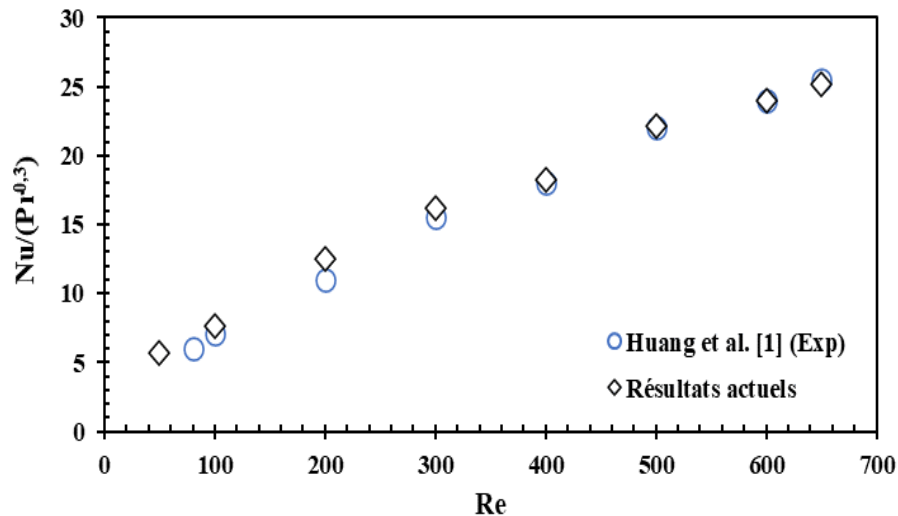


Figure IV.4. Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds (Comparaison expérimentale).

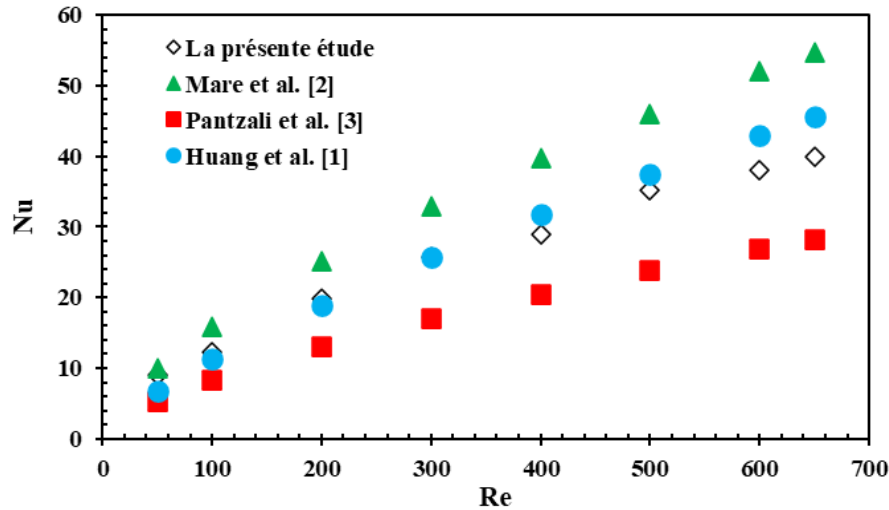


Figure IV.5. Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds (Comparaison avec les corrélations de Mare et al. [2], Pantzali et al. [3] et Huang et al.[1]).

IV.7 Résultats et discussion

IV.7.1 Analyse de convergence

L'analyse de la convergence évaluée à partir de l'Eq IV., met en évidence une diminution progressive de l'erreur jusqu'à l'obtention d'un seuil asymptotique. Pour les courants électriques, l'erreur relative s'élève à $\varepsilon \approx 10^{-16}$, reflétant une précision numérique exceptionnelle. Les champs magnétiques, la pression et la vitesse convergent vers $\varepsilon \approx 10^{-12}$, garantissant une exactitude satisfaisante, bien que légèrement inférieure à celle des courants. En revanche, la température affiche une erreur de l'ordre de $\varepsilon \approx 10^{-10}$, montrant une convergence plus lente ou une tolérance numérique moins strictes. Ces résultats confirment l'efficacité du solveur ségrégué dans la réduction des erreurs, avec des performances variant selon les équations traitées.

$$\varepsilon = \frac{|X_{n+1} - X_n|}{|X_n|} \tag{Eq IV.35}$$

Où, X_n est la valeur de la grandeur d'intérêt pour le maillage n , X_{n+1} est la valeur pour le maillage affiné, ε est l'erreur relative. Cette formule s'applique aux courants électriques, aux champs magnétiques, à la pression, à la vitesse, ainsi qu'à la température.

IV.7.2 Influence du sens d'écoulement

L'étude présentée dans cette section débute par une analyse de l'effet intrinsèque du nanofluide sur les performances thermiques du microéchangeur en l'absence de tout champ magnétique ou électrique. Cette approche vise à isoler l'influence des propriétés thermophysiques du fluide (conductivité thermique, viscosité, capacité calorifique) sur les échanges thermiques, indépendamment des effets électromagnétiques.

Des simulations ont été menées en configuration contre-courant, en utilisant un nanofluide à base de graphène comme fluide de travail de part et d'autre de l'échangeur (côté chaud et côté froid), à une vitesse d'écoulement de 0,01 m/s. Les concentrations massiques considérées sont de 0,005 %, 0,01 %, 0,02 % et

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

0,05 %. Les résultats, présentés à la Figure IV.6, révèlent une performance thermique maximale pour une concentration de 0,01 %. Cette valeur optimale résulte d'un équilibre favorable entre l'amélioration de la conductivité thermique et une augmentation encore modérée de la viscosité dynamique. Bien que les concentrations massiques utilisées dans la présente étude (jusqu'à 0,05 %) soient nettement inférieures à celles étudiées par Agromayor et al. [4] (jusqu'à 1,00 %), une tendance similaire est observée dans les deux cas : le transfert thermique atteint un maximum à une concentration donnée, puis diminue lorsque la fraction massique continue d'augmenter. Cela suggère que, indépendamment des valeurs absolues, une concentration optimale existe, au-delà de laquelle l'augmentation de la viscosité compromet les gains apportés par la conductivité thermique.

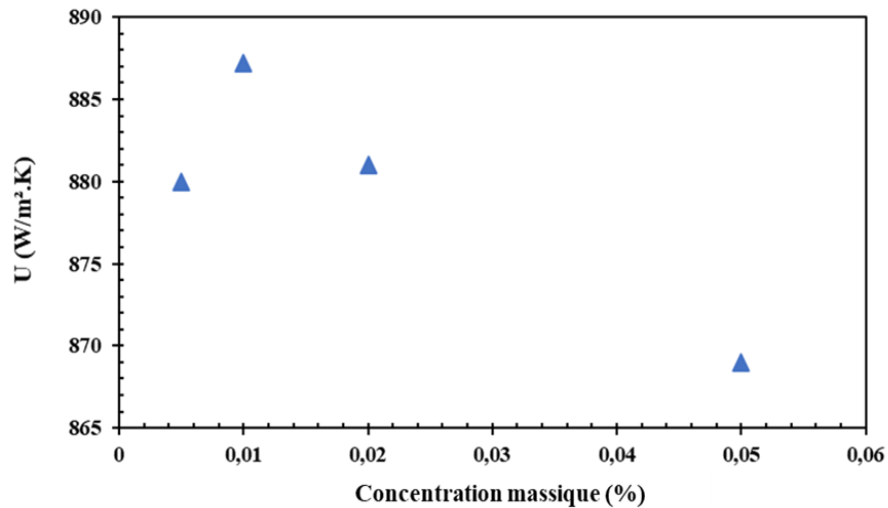


Figure IV.6. Évolution des coefficients de transfert thermique en fonction de la concentration massique de graphène

Afin de compléter cette analyse, une comparaison entre les configurations co-courant et contre-courant, réalisée en l'absence de champ magnétique (Figure IV.7), révèle un avantage significatif en faveur du contre-courant. À une vitesse de 0,005 m/s, le coefficient de transfert présente un accroissement de 18,5 % contre 13,19 % à 0,01 m/s. Pour des vitesses supérieures, cet effet s'atténue progressivement avec des gains de 3,9 % à 0,05 m/s et 2,4 % à 0,1 m/s. Compte tenu de l'avantage significatif du mode contre-courant aux faibles vitesses, et en vue d'optimiser les performances thermiques dans cette plage d'écoulement, la suite de l'étude se concentre exclusivement sur cette configuration. Pour les vitesses plus élevées, l'écart inférieur à 4 %, rend l'influence du sens d'écoulement négligeable.

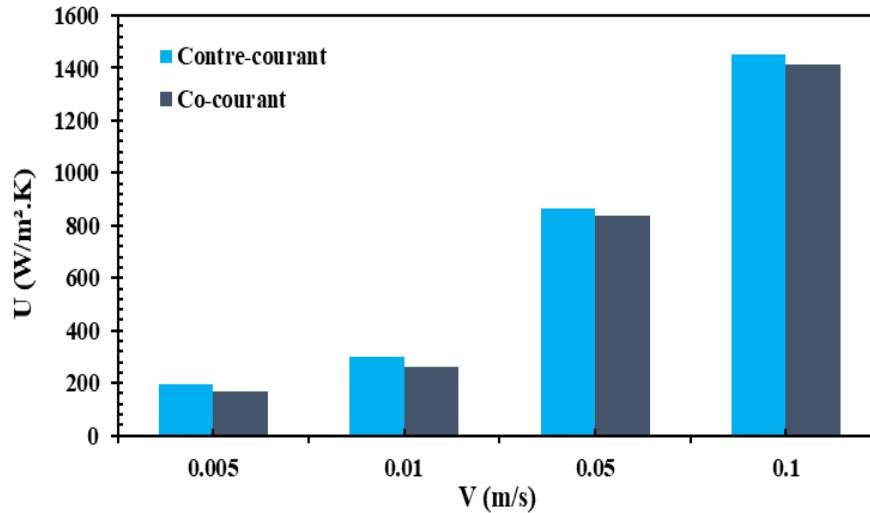


Figure IV.7. Évolution du coefficient de transfert thermique d'écoulement pour les configurations co-courant et contre-courant pour le nanofluide à base de graphène

La configuration contre-courant ayant démontré les meilleures performances thermiques, et la concentration massique de 0,01 % s'étant révélée optimale pour les nanofluides à base de graphène, la suite de l'étude se concentre sur cette configuration de référence. L'analyse est menée en fixant une vitesse d'écoulement représentative du régime laminaire, afin d'évaluer l'influence du champ magnétique et du courant électrique sur les performances thermiques pour différentes configurations de fluide.

IV.7.3 Effet de la configuration d'écoulement

Pour cette étude, la vitesse d'entrée du fluide a été fixée à $V=0,01$ m/s, afin de garantir un écoulement laminaire, caractéristique des microcanaux. Le champ magnétique maximal appliqué est $B=2$ T, une valeur réaliste permettant d'observer l'effet magnétohydrodynamique. Dans ces conditions, le coefficient de transfert de chaleur U et le nombre de Nusselt moyen (Nu_{moy}) ont été évalués en fonction de l'intensité du courant électrique A , pour chaque configuration d'écoulement illustrée dans Figure IV.8.

Les résultats révèlent que la configuration eau/eau subit une diminution progressive du coefficient U lorsque I augmente, ce qui traduit une atténuation du gradient thermique. À l'inverse, l'emploi de nanofluides à base de graphène (FLG) montrent des améliorations thermiques significatives. Ainsi, la configuration graphène affiche les performances optimales, avec une augmentation relative du coefficient U de 82 % à $I=0,2$ A, 96 % à $I=0,3$ A, 103 % à $I=0,4$ A et 106 % à $I=0,5$ A, comparée à la configuration de référence eau. La configuration hybride (FLG/ Fe_3O_4) affiche également des gains notables de 78 %, 92 %, 99 % et 103 % respectivement. Quant à la configuration graphène/eau, elle présente une progression plus modérée, avec des augmentations de 25 %, 39 %, 50 % et 58 % pour les mêmes valeurs de I . Ces résultats soulignent que l'intégration de nanofluides à base de graphène (FLG) et hybride (FLG/ Fe_3O_4), associée à un contrôle précis du champ magnétique et du courant électrique, optimise les performances thermiques du microéchangeur.

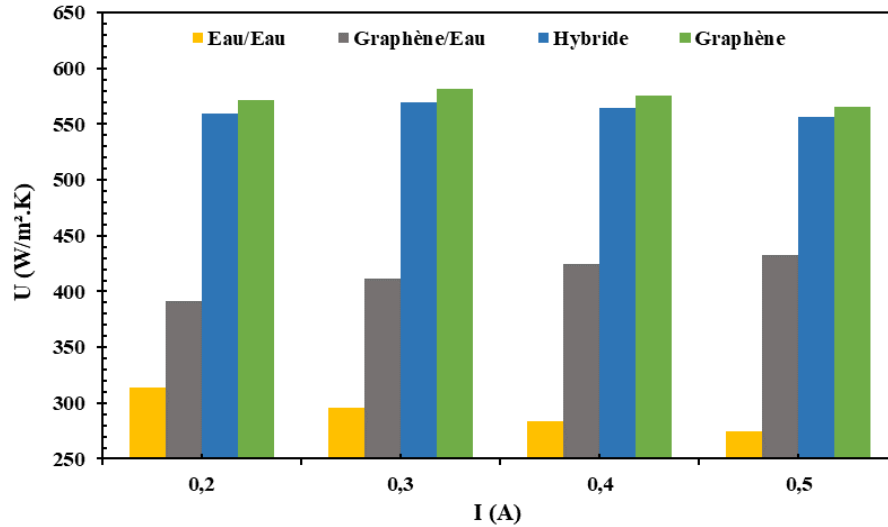


Figure IV.8. Variation du coefficient de transfert thermique U en fonction du courant électrique pour différentes configurations de fluides avec champ magnétique appliqué.

L'analyse des résultats dans la Figure IV.9, représentant le nombre de Nusselt moyen révèle une augmentation continue avec l'intensité du courant électrique pour toutes les configurations. Cette tendance traduit un renforcement du transfert thermique sous l'effet combiné du champ magnétique et du courant électrique. La configuration à base de graphène offre les meilleures performances, avec des augmentations respectives de 227 %, 346 %, 450 % et 546 % par rapport à l'eau pur pour des intensités de 0,2 A, 0,3 A, 0,4 A et 0,5 A. Ce résultat confirme l'efficacité thermique maximale de la configuration symétrique qui exploite pleinement l'effet magnétohydrodynamique. La configuration hybride (graphène-Fe₃O₄) se classe ensuite enregistrant des hausses de 208 %, 287 %, 358 % et 432 % pour les memes intensités, illustrant également un effet bénéfique, bien que légèrement inférieur à celle de graphène. La configuration (graphène/eau) montre quant à elle des gains plus modérés de 45 %, 57 %, 69 %, 84 %. À inverse, la configuration eau/eau demeure la moins performante, avec des valeurs de Nusselt moyen faible et une amélioration limitée.

Ces observations valident l'intérêt des nanofluides à base de graphène, particulièrement en configurations symétriques sous champs magnétique, pour optimiser le transfert thermique dans les microéchangeurs. Cette avancée ouvre des perspectives pour la conception de systèmes compacts à haute efficacité. La suite de l'étude, portera sur l'analyse des effets du champs magnétique B, du courant électrique I et de la vitesse V sur les principaux indicateurs clés de performance thermohydraulique, à savoir le coefficient global de transfert de chaleur, le nombre de Nusselt, la temepérature moyenne de sortie du fluide chaud et le facteur de frottement. Une approche multidimensionnelle permettra d'identifier les conditions opératoires optimales de fonctionnement du microéchangeur, en équilibrant l'amélioration de l'efficacité thermique et la maîtrise des pertes de charge, garantissant ainsi un fonctionnement à la fois performant et écoénergétique.

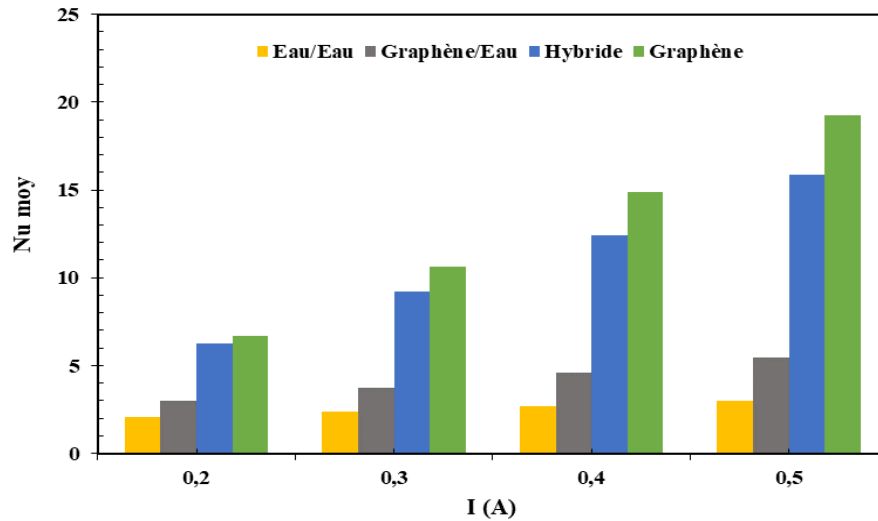


Figure IV.9. Impact de l'intensité du courant électrique sur le nombre de Nusselt moyen pour différentes configurations de nanofluides.

IV.7.4 Effet du courant électrique (I)

Cette section vise à caractériser l'impact du courant électrique (I) sur la distribution axiale (x) du potentiel dans un microéchangeur. Les paramètres sont maintenus constants à une induction magnétique de $B = 1$ T et une vitesse d'écoulement de $V = 0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La configuration analysée compare le comportement de nanofluides à base de graphène et celle hybride circulant dans les circuits chaud et froid du microéchangeur.

La Figure IV.10, montre l'évolution spatiale du potentiel électrique pour des intensités de courant variant de 0,2 à 0,5 A. L'amplitude maximale du potentiel augmente de manière quasi linéaire, atteignant $1,57 \times 10^5$ V à 0,2 A et $3,91 \times 10^5$ V à 0,5 A. Spatialement, le potentiel présente un gradient axial marqué : les valeurs minimales (zone bleue) se situent à l'entrée, tandis que les valeurs maximales (zone rouge) sont localisées à la sortie, avec une transition progressive (zones verte-jaune) dans la région intermédiaire. Cette répartition, constante quelle que soit l'intensité le courant, devient plus contrastée avec l'augmentation de celle-ci. La concentration du courant aux extrémités du microéchangeur conduit à une dissipation énergétique non uniforme. Ce profil permet ainsi d'identifier les zones critiques sur le plan énergétique et de guider ainsi l'optimisation du dispositif.

Les isothermes de température obtenue par simulation numérique, présentées dans la Figure IV.11, illustrent l'évolution des distributions thermiques dans un microéchangeur soumis à un courant électrique et un champ magnétique uniforme. Le cas (a), en absence de champ magnétique, sert de référence pour analyser l'influence de l'intensité du courant électrique sur la distribution thermique. Dans la Figure IV.11.(a), on observe une stratification thermique nette, caractérisée par un front de chaleur se propageant de manière régulière dans le sens de l'écoulement. L'absence de perturbation hydrodynamique limite le transfert thermique à des mécanismes conductifs et convection naturelle, avec un mélange transversal négligeable. Cette configuration entraîne une accumulation de chaleur sur la surface supérieure, ce qui indique une efficacité réduite du transfert thermique.

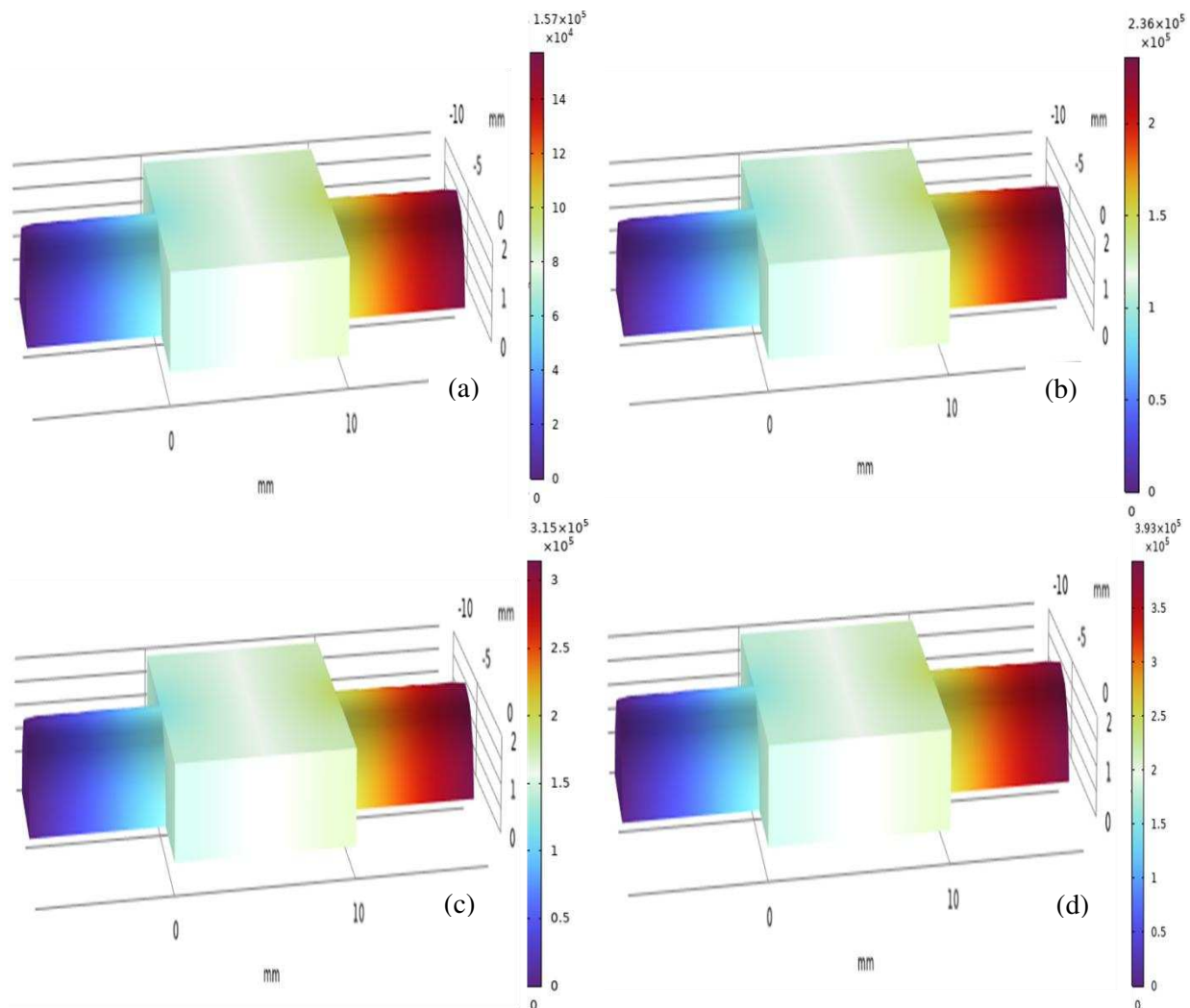
Dans les Figure IV.11. (b) - (e), on observe une influence croissante du courant électrique (de 0,2 A à 0,5 A), sur la dynamique thermique. Sous l'effet de l'augmentation de l'intensité, les isothermes subissent une perturbation progressive, attribuée à la force de Lorentz générée par l'interaction entre le champ magnétique

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

et le courant induit (selon la loi de Laplace). Cette force agit perpendiculairement à la fois au champ magnétique appliqué et au courant induit, conformément à la loi de Laplace. Cette force, orthogonale au champ magnétique et au courant, induit des mouvements transversaux dans le fluide, amplifiant ainsi le mélange convectif. Pour la :

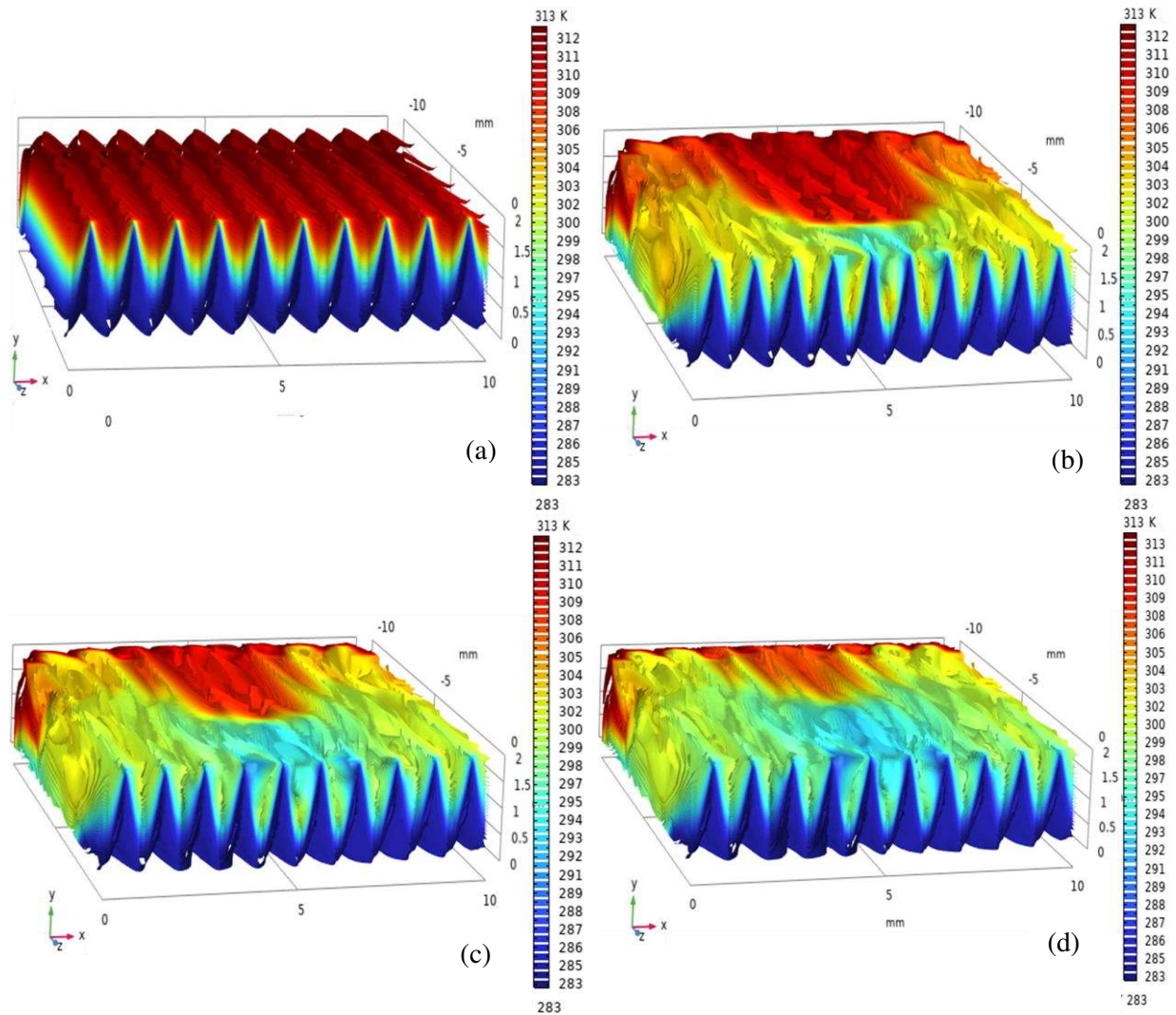
- **Figure IV.11.b ($I = 0,2$ A) :** Des zones de recirculation de faible amplitude émergent, marquant l'initiation du mélange thermique.
- **Figure IV.11.c ($I = 0,3$ A) :** Les isothermes présentent une irrégularité accrue, révélant une intensification du mélange transversal.
- **Figures IV.11.d ($I = 0,4$ A) et e ($I = 0,5$ A) :** Les perturbations atteignent leur amplitude maximale. La distribution de température présente une homogénéisation marquée, tandis que le front thermique progresse significativement. Ces phénomènes confirment le renforcement du transfert thermique par convection forcée sous l'effet magnétohydrodynamique (MHD).

L'application simultanée du champ magnétique et du courant électrique permet d'exploiter les forces électromagnétiques pour améliorer la dissipation thermique. Cette méthode induit une réduction de la résistance thermique globale, une homogénéisation de la température et un gain net en efficacité thermique, ce qui est particulièrement important pour les systèmes compacts soumis à de fortes densité de puissance.



Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

Figure IV.10. Évolution spatiale du potentiel électrique dans le microéchangeur pour différentes intensités de courant (a) $I=0,2A$; (b) $I=0,3A$; (c) $I=0,4A$; (d) $I=0,5A$



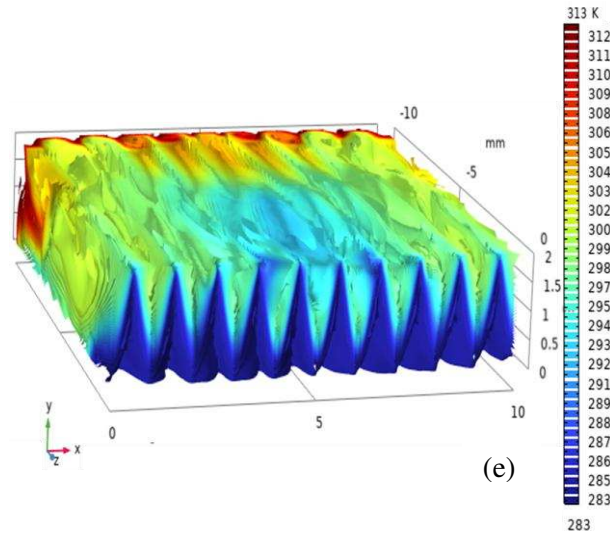


Figure IV.11. Isotherme de température en fonction de l'intensité du courant électrique (A) et de la présence du champ magnétique ; (a) Sans champ magnétique ; (b) $I=0,2A$; (c) $I=0,3A$; (d) $I=0,4A$; (e) $I=0,5A$.

La Figure IV.12, illustre la variation du coefficient global de transfert thermique (U) en fonction de l'intensité du courant électrique (I) pour la première configuration, dans laquelle un nanofluide à base de graphène est utilisé comme fluide chaud et fluide froid., sous une induction magnétique de $B=1T$ et une vitesse d'écoulement de $V=0,01m/s$. Une tendance générale à l'augmentation de U est observée avec une croissance dans l'intervalle $[0,2 A ; 0,3 A]$, indiquant une forte sensibilité du transfert thermique aux faibles variations du courant. Cependant, au-delà de $0,3 A$, l'augmentation de U tend à se stabiliser, suggérant une saturation progressive des effets électromagnétiques sur le transfert thermique. Ce phénomène pourrait résulter d'un équilibre entre les forces de Lorentz, l'inertie du fluide et les résistances visqueuses, limitant l'efficacité marginale de l'augmentation du courant électrique. Comparativement à l'absence de champ magnétique ($U = 299,03 W/m^2 \cdot K$), l'amélioration du coefficient U atteint $67,5 \%$ à $I = 0,2 A$, $83,0 \%$ à $I = 0,3 A$, $91,1 \%$ à $I = 0,4 A$ et $94,1 \%$ à $I = 0,5 A$.

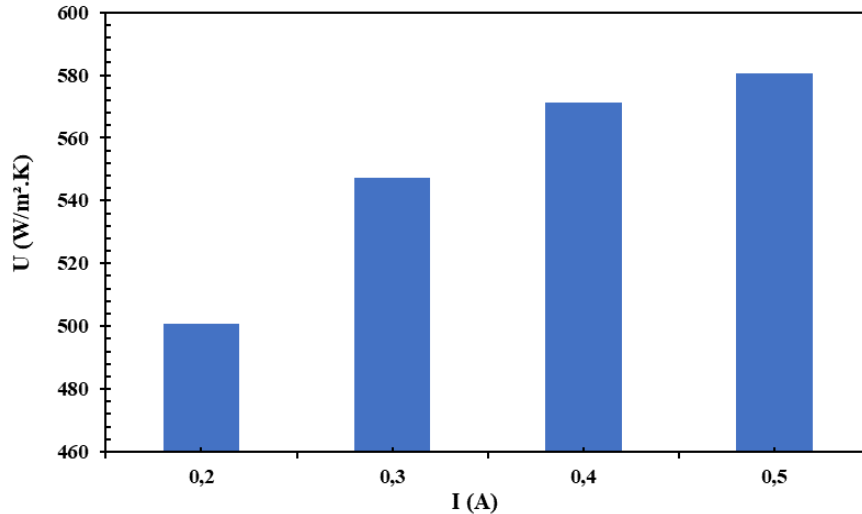


Figure IV.12. Évolution du coefficient de transfert thermique (U) en fonction de l'intensité du courant électrique (I)

La Figure IV.13, illustre la distribution longitudinale du nombre de Nusselt (Nu) dans le microéchangeur en fonction du courant électrique (I). L'analyse révèle une corrélation positive entre l'augmentation du courant (I) et l'intensification de la force de Lorentz, avec des effets variables selon les zones du dispositif. Aux extrémités du microéchangeur, une augmentation marquée de Nu est observée, notamment à $x = 1,5$ mm et $x = 9,5$ mm, où une hausse relative de 130% est enregistrée entre $I = 0,2$ A et $I = 0,5$ A. De même, à $x = 2,5$ mm et $x = 8,5$ mm, des augmentations respectives de 176% sont notées, confirmant une amélioration significative du transfert thermique près des points d'entrée et de sortie du courant. Dans la zone centrale, $x = 5,5$ mm, une stabilisation relative est apparue avec une augmentation modérée de Nu (127%). Des améliorations, dépassant 122%, sont également observées à $x = 3,5$ et $7,5$ mm, traduisant l'influence étendue du champ magnétique. Cependant, dans la région centrale élargie ($x = 4,5$ mm à $6,5$ mm), l'augmentation du Nu se limite à 103,7%, ce qui pourrait signaler une stabilisation de l'écoulement et une atténuation de l'effet magnétohydrodynamique. Cette distribution hétérogène du nombre de Nusselt le long du microéchangeur met en évidence une variation spatiale de l'impact du courant électrique sur le transfert thermique. En effet les extrémités présentent des gains plus importants que la région centrale. Cette différence s'explique par des variations locales de l'écoulement et des effets MHD, incluant la formation de zone de recirculation et la réduction progressive de la force de Lorentz vers le centre du canal.

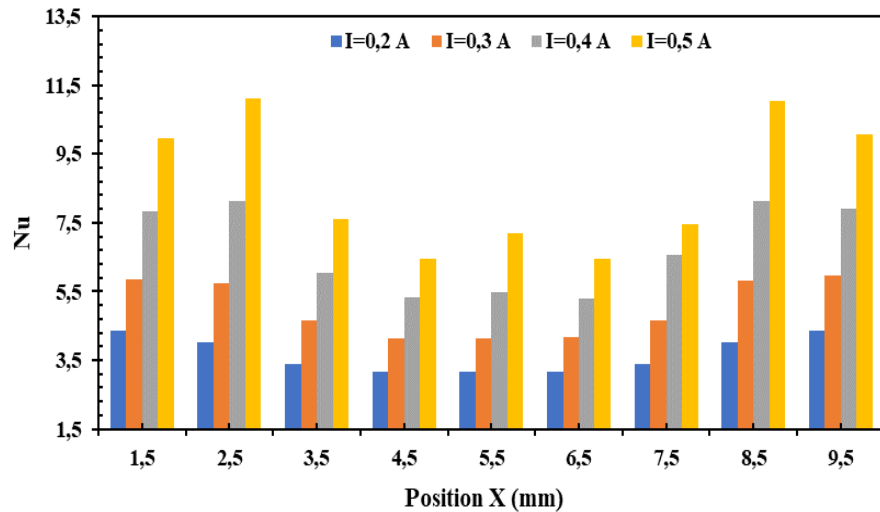


Figure IV.13. Distribution longitudinale du nombre de Nusselt (Nu) dans le microéchangeur en fonction de l'intensité du courant électrique

L'analyse de la température moyenne du fluide chaud à la sortie (T_{cs}), en fonction de la position (X) et du courant électrique (I), présentée dans la Figure IV.14, met en évidence une diminution progressive de T_{cs} à mesure que le courant électrique augmente. Cette réduction thermique indique une amélioration de l'efficacité du refroidissement. La baisse relative de T_{cs} par rapport à la température d'entrée du fluide chaud (313,15K) varie de 6 % à $I = 0,2$ A jusqu'à 6,43 % à $I = 0,5$ A pour les positions $X = 0,5$ mm et $X = 10$ mm. Aux positions $X = 4,5$ mm et $X = 6,5$ mm, la diminution de la température oscille entre 5,4 % et 6,59 % pour la même plage de courant. Les oscillations de la courbe $T_{cs}(X)$ reflètent les variations spatiales du transfert de chaleur le long du microéchangeur. L'amplitude de ces fluctuations décroît avec l'intensité du courant, indiquant une uniformisation progressive du refroidissement. Cette analyse démontre que l'augmentation du courant électrique améliore systématiquement le refroidissement du fluide, bien que son efficacité spatiale présente des variations localisées le long du dispositif. La corrélation entre paramètre électrique et performance thermique apparaît ainsi clairement établie.

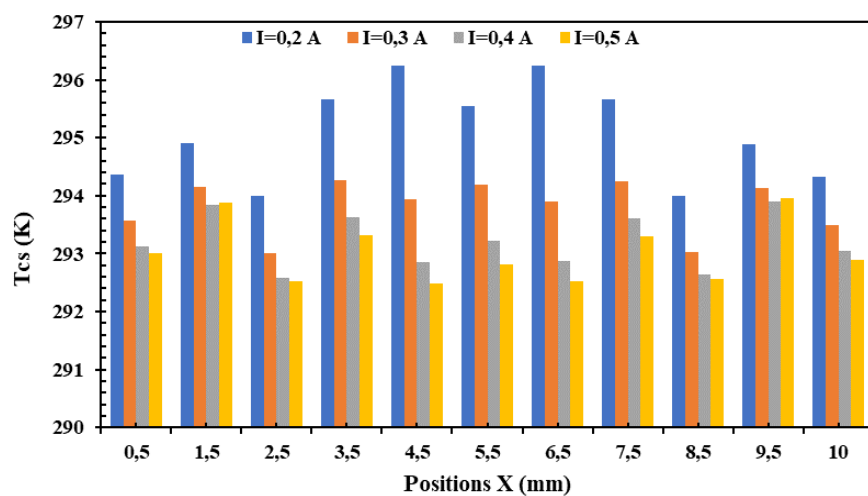


Figure IV.14. Variation de la température moyenne du fluide chaud à la sortie (T_{cs}) en fonction de la position (X) et du courant électrique (I)

La Figure IV.15, présente l'analyse du facteur de frottement (f) en fonction du courant (I), montrant une augmentation significative de la résistance hydraulique sous l'effet du champ électromagnétique. Lorsque (I), passe de 0,2 A à 0,5 A, f_f et f_c augmentent respectivement de 161,8 % et 143 %, avec une croissance moyenne de 37 % pour le fluide froid et de 32 % pour le fluide chaud à chaque palier de courant. Par ailleurs, l'écart initial entre f_c et f_f , qui était de 29,3 % à $I = 0,2$ A, diminue progressivement pour atteindre 19,9 % à $I = 0,5$ A, indiquant une homogénéisation des contraintes hydrodynamiques sous l'action du champ appliqué. Ce phénomène apparaît plus marqué pour le fluide froid, dont la viscosité plus élevée amplifie la réponse aux forces électromagnétiques, tandis que le fluide chaud, présentant une viscosité réduite à haute température, montre une augmentation plus modérée du facteur de frottement.

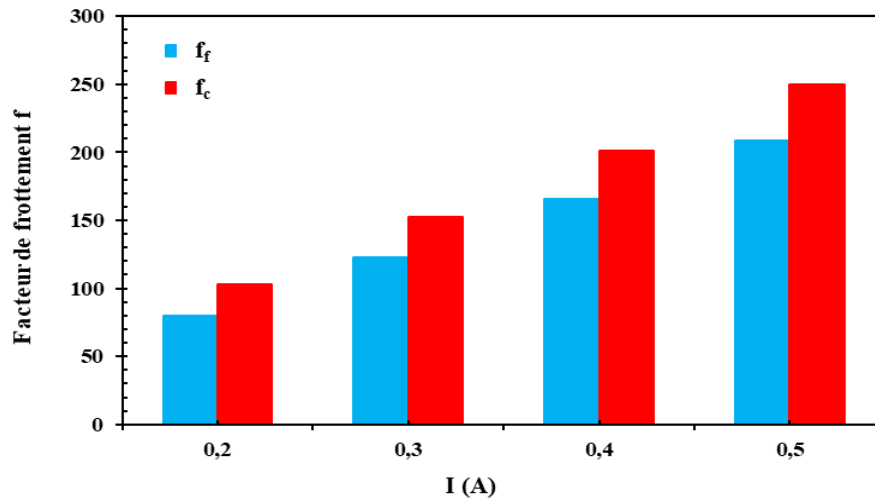


Figure IV.15. Variation du facteur de frottement (f) en fonction du courant (I) pour les fluides chaud (f_c) et froid (f_f).

IV.7.5 Effet du champs magnétique (B)

Cette section explore l'impact du champ magnétique sur les performances d'un microéchangeur thermique. L'analyse porte plus particulièrement sur ses effets sur la distribution du flux magnétique et le transfert thermique en fonction de la position axiale x . Les paramètres étudiés incluent un courant électrique fixe $I = 0,3$ A et une vitesse d'écoulement $V = 0,01$ m·s⁻¹.

La Figure IV.6, présente la distribution spatiale de la densité du flux magnétique dans un microéchangeur thermique pour différentes intensités de champ magnétique (0,5 T, 1 T, 1,5 T et 2 T). Le champ magnétique se concentre autour de la région active du dispositif, avec des lignes de champ symétriques typiques d'une configuration dipolaire. Pour $B = 0,5$ T, l'espacement des lignes de champ reflète une faible intensité du flux magnétique et une interaction magnétodynamique réduite, induisant un effet modéré de la force de Lorentz sur le fluide conducteur. À mesure que l'intensité du champ augmente (de 1 T à 2 T), les lignes de champ se densifient, particulièrement aux extrémités du canal, signalant une amplification locale du flux magnétique et une augmentation corrélative de la force de Lorentz. Bien que l'intensité du champ magnétique croisse, la topologie globale du champ demeure identique, tandis que l'amplitude maximale du flux augmente significativement, comme le révèlent les échelles colorimétriques variant de 2,5 T à 10 T. Cette observation suggère une réponse quasi-linéaire du champ appliqué, avec un effet amplifié dans les zones de recirculation ou présentant des discontinuités géométriques.

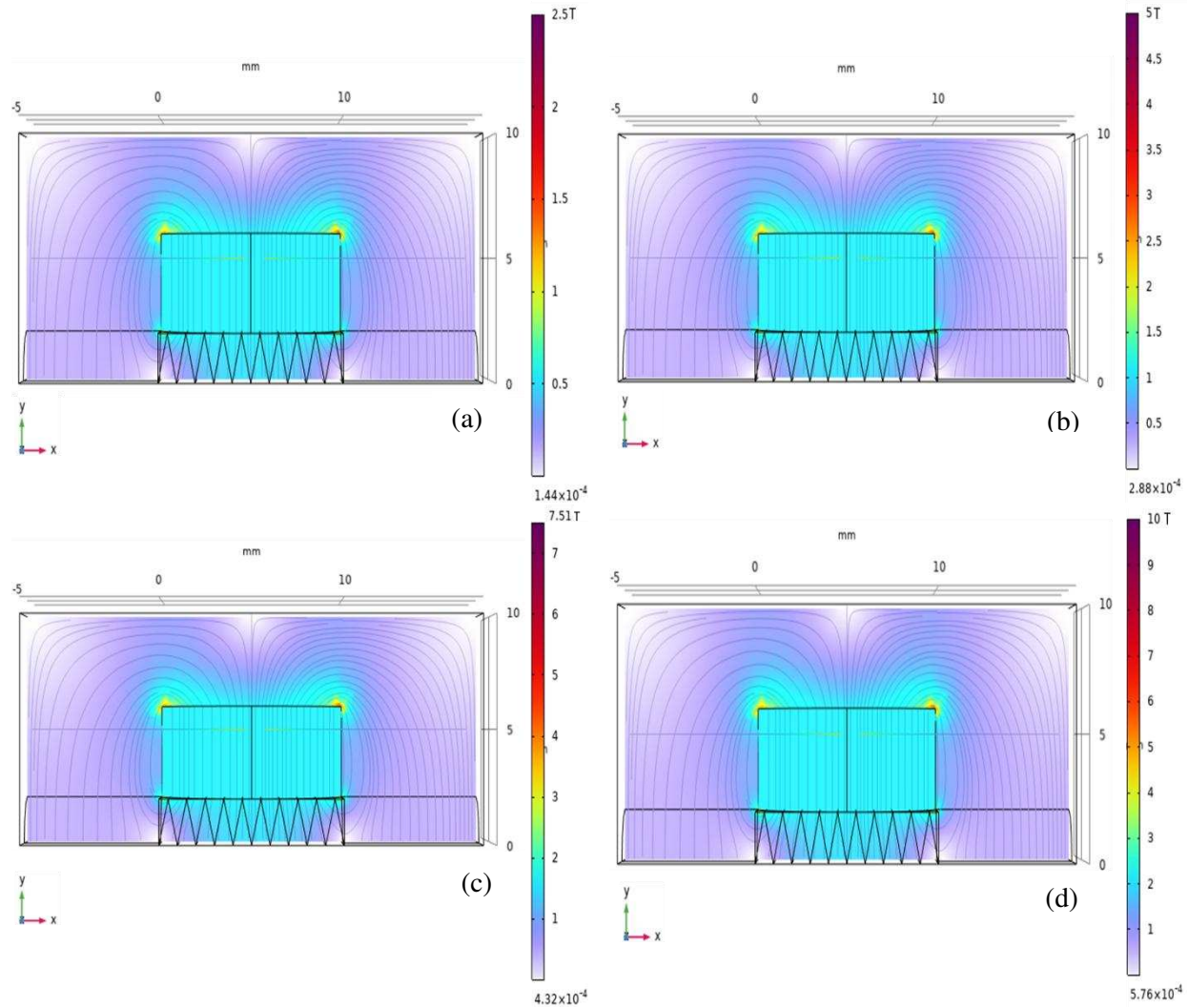


Figure IV.16. Distribution de la densité de flux magnétique dans le microéchangeur thermique pour différentes intensités de champ magnétique (a) $B=0,5$ T, (b) $B=1$ T, (c) $B=1,5$ T et (d) $B=2$ T.

Les surfaces isothermes présentée dans la Figure IV.17 révèlent un comportement thermique fortement influencé par les forces magnétoconvectives. Les résultats montrent qu'à faible intensité ($B=0,5$ T) la température présente une distribution hétérogène avec des zones de surchauffe prononcées. Lorsque l'intensité augmente jusqu'à $B=2$ T, la répartition thermique devient nettement plus homogène tandis que la température maximale diminue de manière significative. Cette évolution démontre que le champ magnétique améliore l'efficacité thermique du système en favorisant la dispersion de la chaleur. Ce phénomène s'explique par les effets magnétocaloriques et combinés aux forces de Lorentz qui induisent des mouvements convectifs secondaires dans le fluide. Ces mécanismes conjugués atténuent les gradients thermiques et optimisent la fiabilité des dispositifs thermique intégrés.

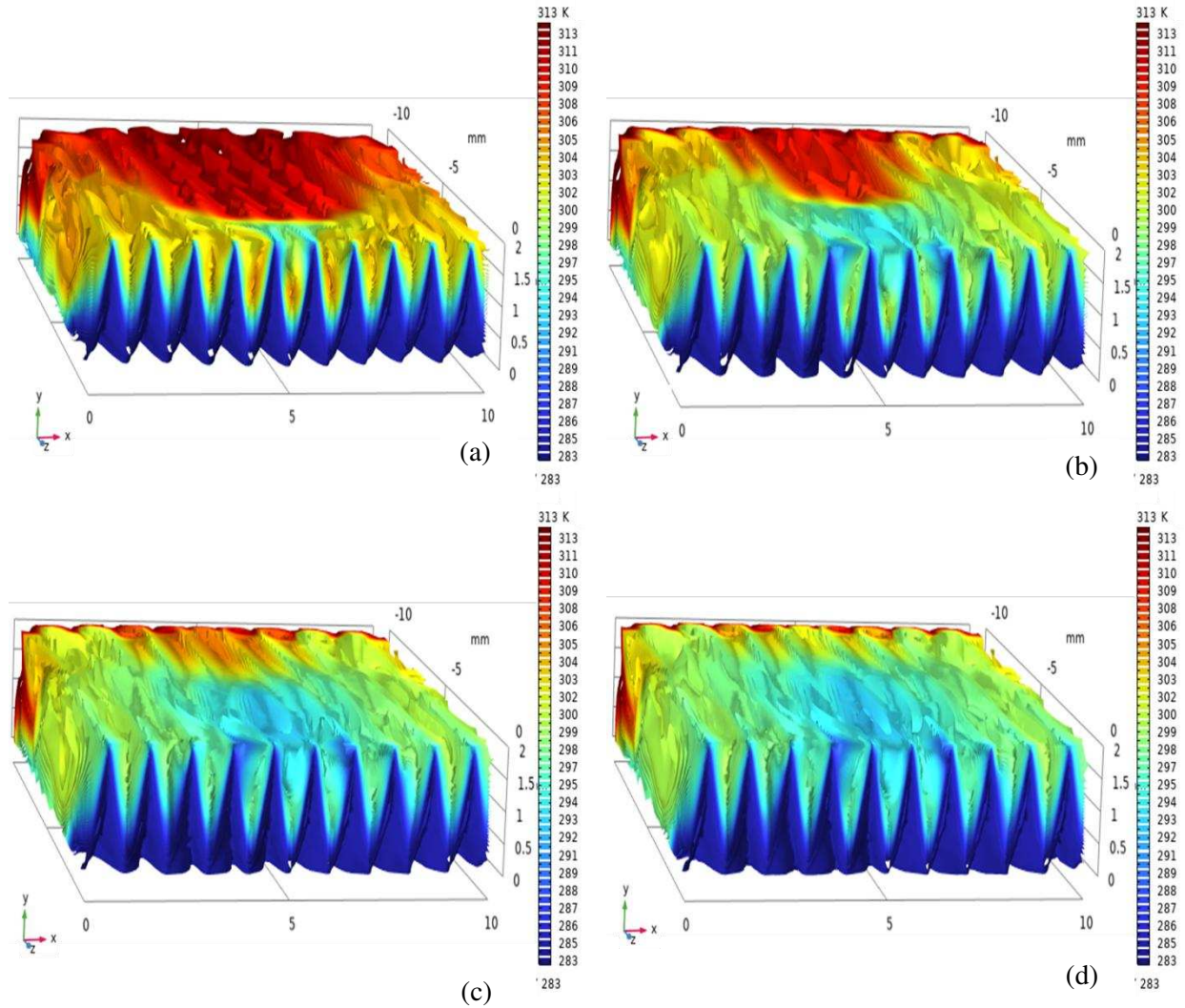


Figure IV.17. Distribution de la température dans le microéchangeur en fonction de l'intensité du champ magnétique (B) ; (a) B = 0,5 T, (b) B = 1 T, (c) B = 1,5 T, (d) B = 2 T.

L'analyse de l'évolution du coefficient de transfert thermique global U ($W/m^2 \cdot K$) en fonction de l'intensité du champ magnétique B (T), présentée dans la Figure IV.18, montre une amélioration notable des performances thermiques du microéchangeur sous l'effet du champ magnétique appliqué. Pour une intensité de courant constante de 0,3 A et une vitesse d'entrée du fluide fixée à 0,01 m/s, l'augmentation de B de 0,5 T à 2 T entraîne une croissance significative du coefficient U , passant de 466,93 $W/m^2 \cdot K$ à 581,64 $W/m^2 \cdot K$, soit une amélioration de 24,6 %.

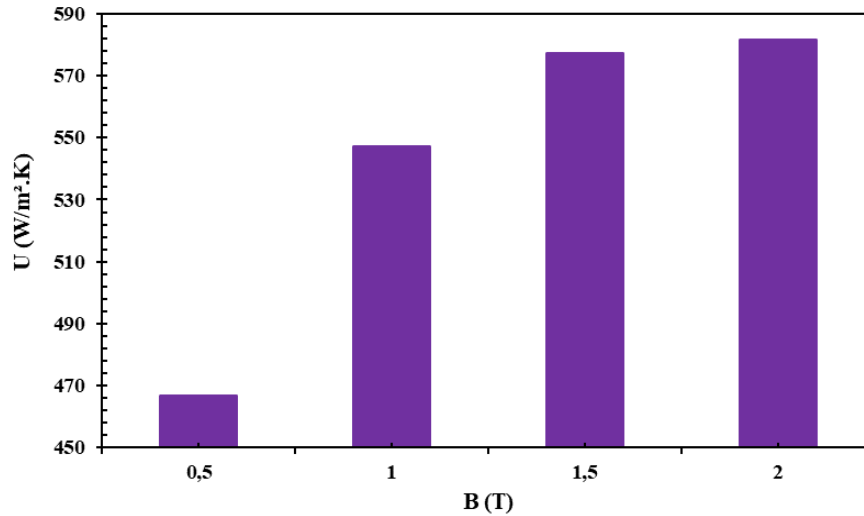


Figure IV.18. Évolution du coefficient de transfert thermique global en fonction de l'intensité du champ magnétique (B).

La Figure IV.19, met en évidence l'impact significatif du champ magnétique sur le nombre de Nusselt (Nu) le long du microéchangeur. L'augmentation de l'intensité magnétique de 0,5 T à 2 T provoque une augmentation marquée de Nu sur toute la longueur du canal, traduisant un renforcement du transfert thermique convectif sous l'effet des forces de Lorentz. Aux positions $X = 1,5$ mm et $X = 9,5$ mm, Nu augmente de 230 %, tandis qu'aux abscisses $X = 2,5$ mm et $X = 8,5$ mm, l'accroissement atteint 329 %. Ces mécanismes locaux s'expliquent par les effets de bord et les perturbations de l'écoulement aux extrémités du canal. La zone centrale ($X = 4,5$ mm à $X = 6,5$ mm) montre une progression plus modérée, de l'ordre de 175 %, traduisant un équilibre entre les phénomènes convectifs et dissipatifs dans cette région. Ces résultats confirment le potentiel du champ magnétique comme levier de modulation active des transferts thermiques dans les microcanaux. Cette approche ouvre la voie à un contrôle spatial précis des échanges énergétiques offrant des perspectives intéressantes pour l'optimisation des performances des systèmes de refroidissement miniaturisé.

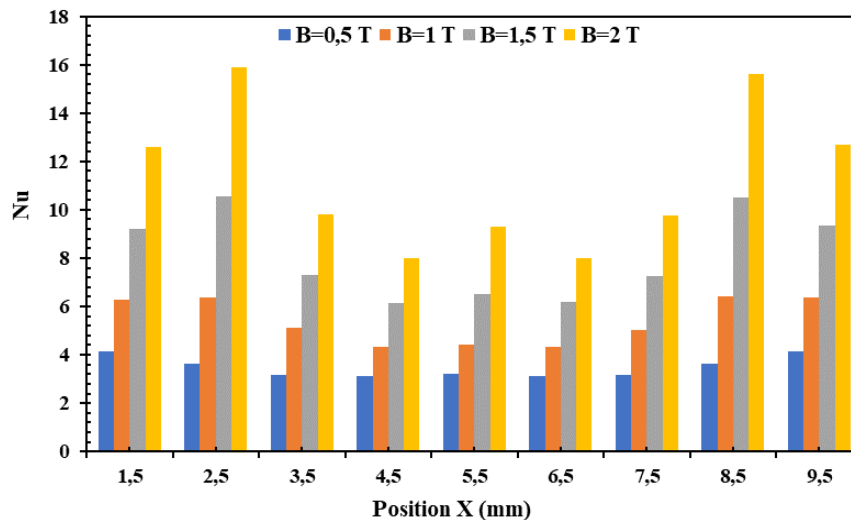


Figure IV.19. Évolution du nombre de Nusselt en fonction de l'intensité du champ magnétique (B) à différentes positions longitudinales.

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

La Figure IV.20, illustre l'impact du champ magnétique (B) sur la température moyenne de sortie du fluide chaud (T_{cs}), pour une température d'entrée (T_{ce}) fixée à 313,15 K. Les résultats indiquent que T_{cs} reste inférieure à T_{ce} , avec un écart variant de 15 K à 21 K, ce qui correspond à une diminution de la température de 4,79 % à 6,71 %. Plus précisément, l'écart entre T_{cs} et T_{ce} est de 15 K (réduction de 4,79 %) pour une combinaison de $X = 4,5$ et $B(T) = 0,5$, tandis que l'écart maximal atteint 21 K (réduction de 6,71 %) pour certaines configurations telles que $X = 2,5$ ou $4,5$ et $B(T) = 2$. Ces résultats soulignent l'efficacité du champ magnétique pour favoriser le refroidissement du fluide chaud dans le microéchangeur.

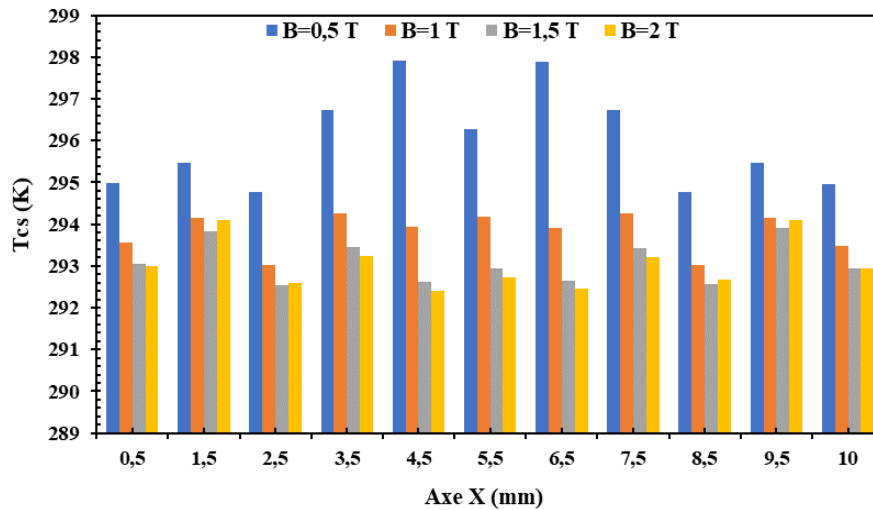


Figure IV.20. Influence de l'intensité du champ magnétique (B) sur la température moyenne du fluide chaud en sortie (T_{cs}).

La Figure IV.21, met en évidence l'effet du champ magnétique (B) sur le facteur de frottement pour les fluides chaud (f_c) et froid (f_f) dans un système magnétohydrodynamique (MHD), à courant et vitesse constants ($A=0,3$ A), ($V=0,01$ m/s). Lorsque l'intensité du champ magnétique augmente de 0,5 T à 2 T, une augmentation significative des facteurs de frottement est observée pour les deux fluides, ce qui reflète l'impact des forces électromagnétiques sur la dynamique des écoulements. Pour le fluide froid, le facteur de frottement (f_f) augmente de 332% lorsque B passe de 0,5 T à 2. De manière similaire, le facteur de frottement du fluide chaud (f_c) à présente une augmentation de 282%. Ces résultats montrent que l'effet du champ magnétique est légèrement plus prononcé sur le fluide froid que sur le fluide chaud.

Cette augmentation du facteur de frottement résulte de l'effet MHD induit par la force de Lorentz. L'application d'un champ magnétique amplifie les interactions entre le fluide conducteur et les parois du canal, augmentant ainsi la résistance au mouvement. Ce phénomène se traduit par une croissance progressive des valeurs de f_f et f_c avec B . Par exemple, lorsque B augmente de 0,5 T à 1 T, f_f passe de 58,12 à 122,55 (+111%), tandis que f_c évolue de 78,87 à 153,20 (+94%). Une tendance similaire est observée pour les autres intervalles d'intensité magnétique étudiés.

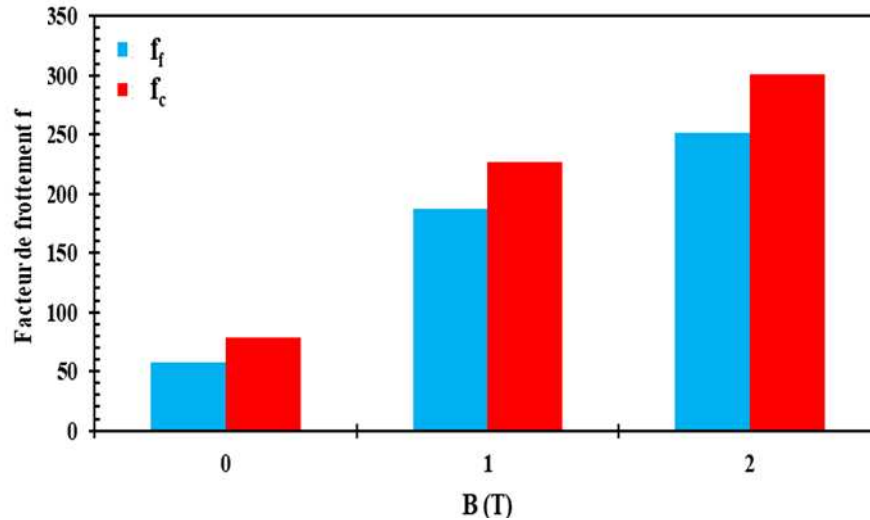


Figure IV.21. Impact de l'intensité du champ magnétique (B) sur le facteur de frottement des fluides chaud (f_c) et froid (f_f).

IV.7.6 Effet de vitesse

Dans cette section, nous étudierons l'effet de la vitesse d'écoulement sur les performances du microéchangeur thermique, en analysant son influence sur la distribution du flux et le transfert thermique en fonction de la position axiale (x). Les paramètres sont fixés avec un courant électrique de $I = 0,3$ A et un champ magnétique de $B = 1$ T. La configuration étudiée utilise des nanofluides (FLG/Eau) froids et chauds.

L'analyse des Figure IV.22 et Figure IV.23, révèle l'influence de la vitesse du fluide et du champ magnétique sur le champ thermique d'un microéchangeur. En l'absence de champ magnétique, une augmentation de la vitesse d'entrée de 0.005 m/s à 0.1 m/s modifie significativement la répartition de la chaleur. À faible vitesse, le temps de contact prolongé entre le fluide chaud et les parois favorise un échange thermique optimal. Cependant, à des vitesses supérieures, l'amélioration du brassage fluide est contrebalancée par la réduction du temps de séjour, limitant le transfert de chaleur et compromettant l'efficacité du refroidissement. L'application d'un champ magnétique ($B = 1$ T, $I = 0.3$ A) améliore globalement les échanges thermiques, particulièrement pour des vitesses faibles à modérées (0.005 m/s à 0.05 m/s). Les forces électromagnétiques modifient la dynamique de l'écoulement, intensifiant les mouvements convectifs et optimisant ainsi le transfert de chaleur. Ce phénomène se traduit par un refroidissement plus efficace du fluide. Cependant, à haute vitesse ($0,1$ m/s), l'effet du champ magnétique s'atténue, et le processus de transfert thermique est principalement régulé par l'écoulement. Ces résultats soulignent l'importance d'un compromis entre vitesse d'écoulement et contrôle magnétique pour maximiser l'efficacité thermique dans des conditions opératoires spécifiques.

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

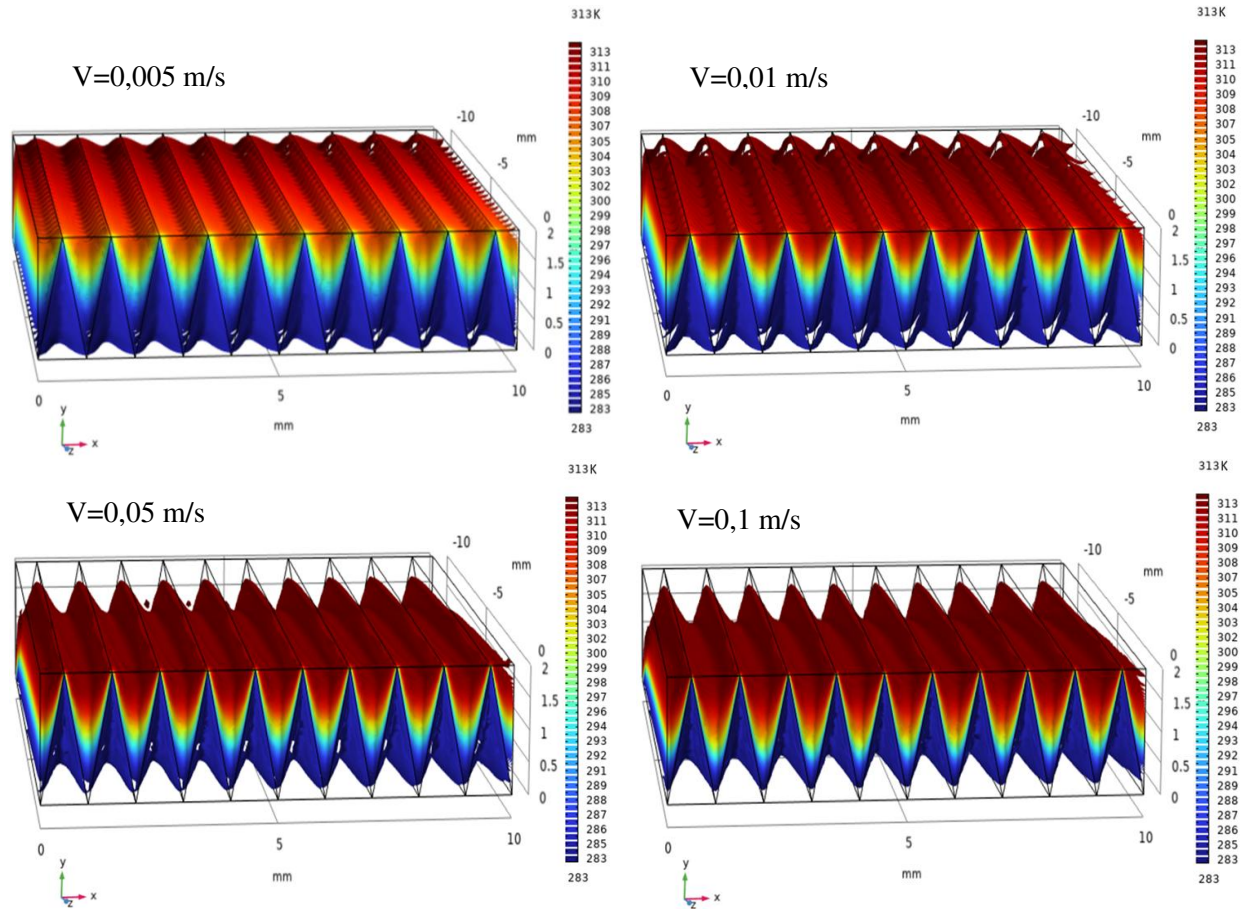
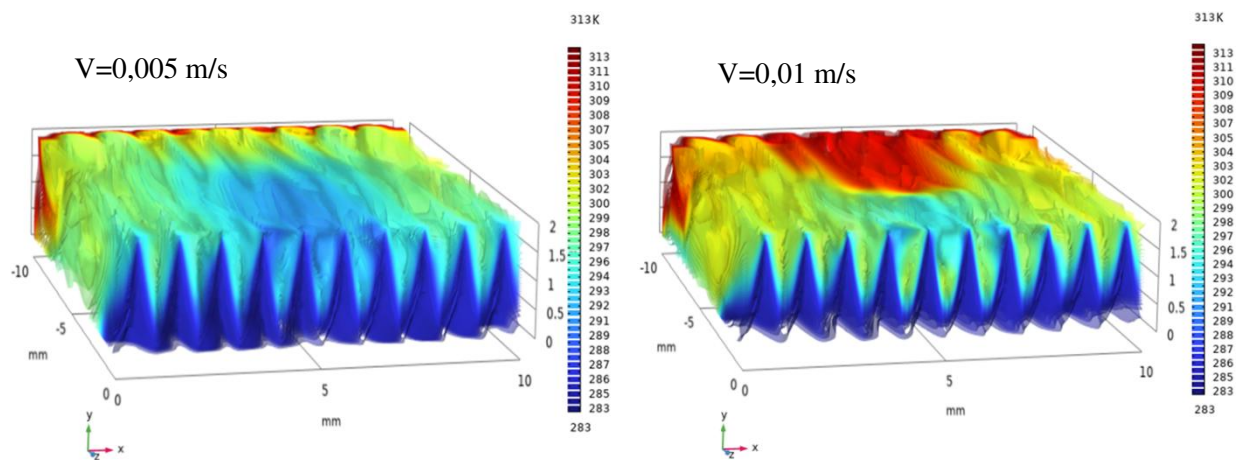


Figure IV.22. Distribution de température dans le microéchangeur thermique sans champ magnétique pour différentes vitesses d'écoulement.



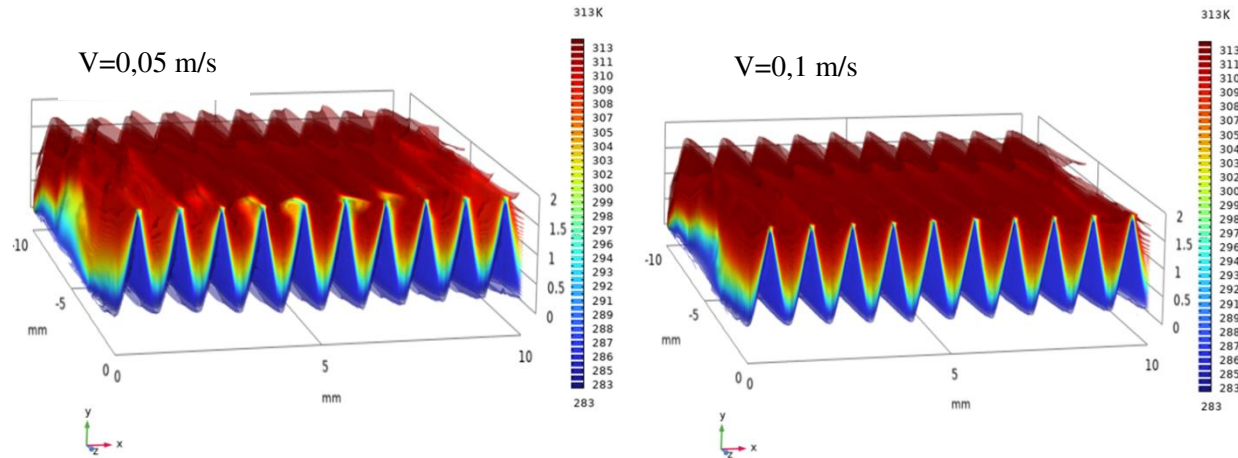


Figure IV.23. Distribution de température dans le microéchangeur thermique avec champ magnétique ($B = 1\text{T}$, $A = 0.3\text{A}$) pour différentes vitesses d'écoulement.

Le coefficient de transfert thermique U en fonction de la vitesse d'écoulement V est présenté dans la Figure IV.24. On observe une augmentation marquée du transfert thermique avec la vitesse d'écoulement V . U s'accroît de 66 % entre $V = 0,005\text{ m/s}$ et $V = 0,01\text{ m/s}$, puis de 107 % entre $V = 0,01\text{ m/s}$ et $V = 0,05\text{ m/s}$, et enfin de 43 % entre $V = 0,05\text{ m/s}$ et $V = 0,1\text{ m/s}$. Cette progression résulte de l'intensification de la convection forcée aux vitesses élevées, qui réduit la résistance thermique du fluide au voisinage des parois. Cette réduction résulte des effets électromagnétiques qui structurent l'écoulement jusqu'à ce que les forces d'inertie limitent leur influence prépondérante.

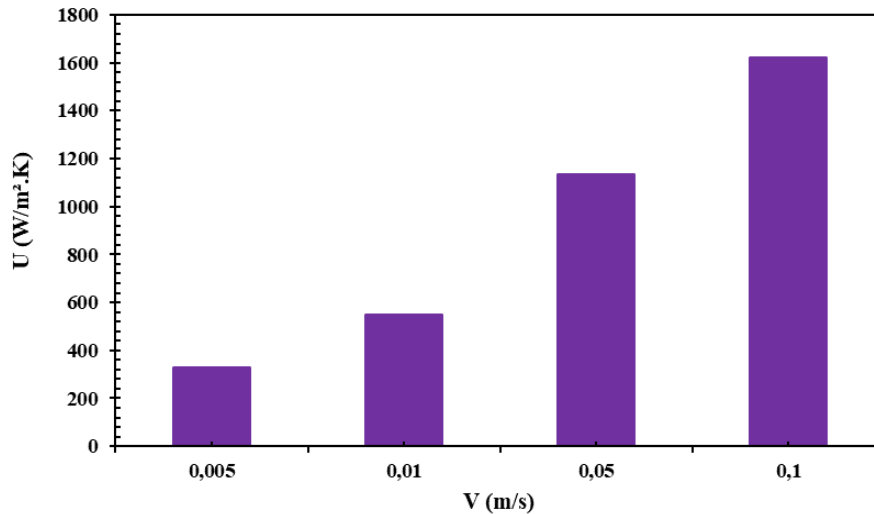


Figure IV.24. Évolution du coefficient de transfert thermique U en fonction de la vitesse d'écoulement V .

L'évolution du nombre de Nusselt (Nu) en fonction de la position longitudinale X et de la vitesse d'écoulement V , illustrée dans la Figure IV.25, met en évidence l'effet combiné du champ magnétique ($B = 1\text{ T}$) et de la vitesse sur le transfert thermique le long du microéchangeur. À faible vitesse ($V = 0,005\text{ m/s}$), l'application du champ magnétique induit une amélioration notable du transfert thermique, atteignant 185 % à $X = 2,5\text{ mm}$ et $X = 8,5\text{ mm}$, et 130 % à $X = 1,5\text{ mm}$ et $X = 9,5\text{ mm}$ par rapport à $V = 0,01\text{ m/s}$. Cet

Chapitre IV. Étude de la convection mixte magnétohydrodynamique dans un microéchangeur à nanofluides : modélisation, simulation et optimisation des performances thermiques

accroissement, contre-intuitif au regard des lois classiques de la convection forcée, s'explique par la prédominance des forces de Lorentz à basse vitesse : en l'absence d'inertie significative, ces forces perturbent efficacement l'écoulement, renforçant les gradients thermiques et favorisant la convection.

À mesure que la vitesse augmente, l'effet du champ magnétique s'atténue progressivement : l'amélioration se limite alors à environ 67 % aux extrémités ($X = 1,5$ mm et $X = 2,5$ mm) et 47 % dans la zone centrale ($X = 4,5$ mm à $X = 6,5$ mm) pour $V = 0,05$ m/s. À $V = 0,1$ m/s, le gain thermique devient marginal, avec des augmentations comprises entre 11 % et 15 % par rapport à $V = 0,01$ m/s, ce qui traduit la domination croissante des forces d'inertie sur les effets électromagnétiques.

La distribution spatiale du transfert thermique observe un caractère non uniforme. Les améliorations restent plus marquées aux extrémités ($X = 2,5$ mm et $X = 8,5$ mm) qu'au centre ($X = 4,5$ mm à $X = 6,5$ mm), conformément aux effets de bord et aux perturbations hydrodynamiques locales. Ces résultats confirment qu'en régime magnétohydrodynamique, l'efficacité du champ magnétique pour intensifier la convection est maximale à faible vitesse et près des parois, lorsque les forces de Lorentz surpassent les effets inertiels.

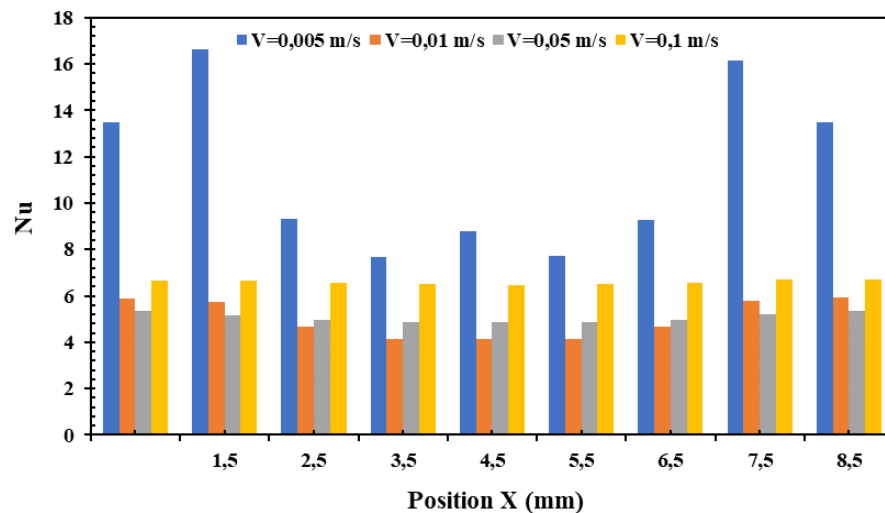


Figure IV.25. Variation du nombre de Nusselt selon la position longitudinale X et la vitesse d'écoulement V .

La Figure IV.26, analyse l'impact de la vitesse d'écoulement sur la température moyenne du fluide chaud (T_{cs}) le long de la position axiale (X) à la sortie du microéchangeur. À faible vitesse ($V = 0,005$ m/s), T_{cs} reste inférieure à la température d'entrée chaude (T_{ce}), avec un écart atteignant ses valeurs maximales, comprises entre 20 et 22 K. Ce résultat indique une efficacité de refroidissement optimale accompagnée d'une distribution homogène des températures sur toute la longueur du microéchangeur.

Lorsque la vitesse augmente légèrement ($V = 0,01$ m/s), l'écart de température diminue pour osciller entre 18,9 et 20,12 K, traduisant une réduction modérée de l'efficacité du refroidissement. À une vitesse plus élevée ($V = 0,05$ m/s), cet écart se réduit davantage avec des valeurs comprises entre 9,51 et 11,37 K, reflétant dégradation accentuée des performances thermiques. Enfin, à grande vitesse ($V = 0,1$ m/s), l'écart atteint ses minima (8,92 à 9,34 K) signant un refroidissement nettement moins efficace.

L'influence du champ magnétique appliqué sur la température moyenne de sortie de fluide chaud dépend fortement de la vitesse d'écoulement : son effet reste négligeable aux vitesses élevées, mais devient significatif aux faibles vitesses où il améliore l'efficacité du refroidissement.

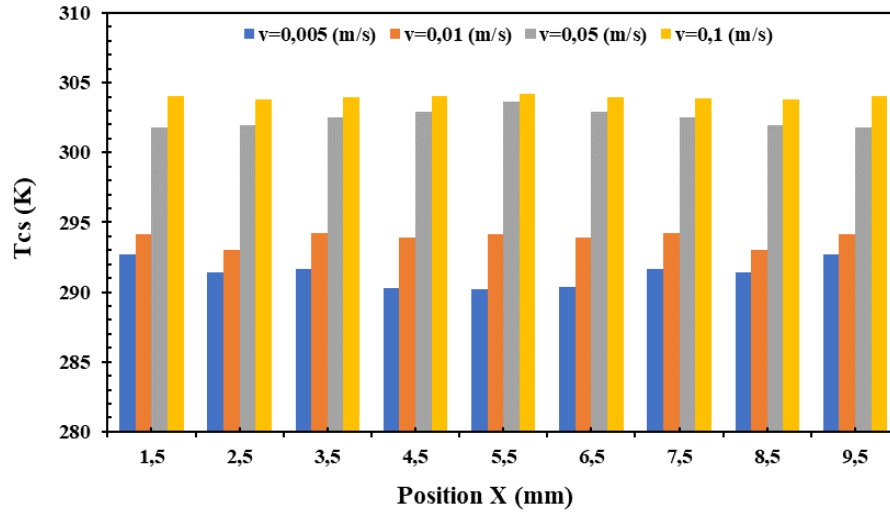


Figure IV.26. Température moyenne du fluide chaud en fonction de la vitesse d'écoulement dans le microéchangeur thermique.

La Figure IV.27, présente l'évolution des facteurs de frottement f_f (fluide froid) et f_c (fluide chaud) en fonction de la vitesse. Une diminution significative des deux facteurs apparaît avec l'augmentation de vitesse. Pour le fluide froid, le facteur f_f diminue de 76,6 % entre 0,005 et 0,01 m/s, puis de 96,9 % entre 0,01 et 0,05 m/s, avant une réduction supplémentaire de 86,2 % entre 0,05 et 0,1 m/s. Concernant le fluide chaud, le facteur f_c connaît une baisse de 79,7 % dans la plage 0,005-0,01 m/s, suivie d'une diminution de 95,5 % entre 0,01 et 0,05 m/s, puis de 70,7 % entre 0,05 et 0,1 m/s. L'analyse révèle que l'atténuation des facteurs de frottement s'avère plus prononcée aux faibles vitesses, le fluide chaud présentant des réductions relativement plus importantes que le fluide froid dans ce régime de vitesse.

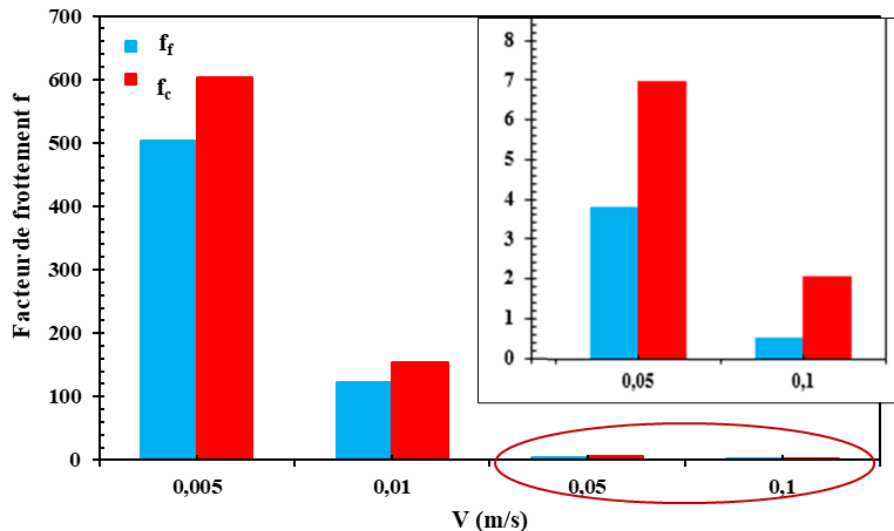


Figure IV.27. Évolution des facteurs de frottement F_f et F_c en fonction de la vitesse pour les fluides froid et chaud.

IV.8 Conclusion

Ce chapitre traite l'impact de la convection mixte magnétohydrodynamique (MHD) sur les performances thermiques d'un microéchangeur utilisant des nanofluides à base de graphène. Grâce à une modélisation tridimensionnelle détaillée et des simulations numériques sous COMSOL Multiphysics, nous avons mis en évidence les interactions complexes entre champs électromagnétiques, dynamique des fluides et transfert thermique.

Les principaux résultats de résumé ainsi :

Configuration d'écoulement : L'étude a confirmé qu'à une concentration massique de 0.1% en masse, la configuration à contre-courant présente une efficacité thermique supérieure à la configuration co-courant, notamment aux faibles vitesses d'écoulement. L'augmentation du coefficient de transfert thermique atteint 18,5 % à 0,005 m/s et de 13,9 % à 0,01 m/s. Cet écart diminue progressivement avec la vitesse (3,9 % à 0,05 m/s et 2,4 % à 0,1 m/s).

Effet des nanofluides : Les nanofluides à base de graphène améliorent significativement les performances thermiques. Comparée à la configuration eau/eau, la configuration graphène a permis une augmentation de 106 % du coefficient de transfert thermique et de 546% du Nusselt moyen. La configuration hybride (graphène/Fe₃O₄) montre des gains comparables (103% pour U et 432% pour Nu_{moy}). La configuration graphène/eau présente des gains plus progressifs, tandis que la configuration eau/eau demeure la moins efficace. Ces résultats valident le potentiel des nanofluides avancés pour optimiser le transfert thermique, en particulier dans les configurations symétriques où l'effet magnétohydrodynamique est pleinement exploité.

Influence du courant électrique : L'intensification du courant électrique (0,2 à 0,5 A) améliore le coefficient de transfert thermique (67,5-94,1 %) et le nombre de Nusselt, avec des variations longitudinales dans le microéchangeur. Cet effet s'accompagne néanmoins d'une augmentation du facteur de frottement.

Effet du champ magnétique : L'application d'un champ magnétique (0,5-2 T) améliore la distribution thermique et les transferts, particulièrement aux extrémités. Le nombre de Nusselt augmente jusqu'à 204 %, avec un écart thermique maximal de 21 K mesuré à 2 T entre l'entrée du fluide chaud et la température moyenne de sortie.

Vitesse d'écoulement : L'augmentation de vitesse d'écoulement améliore initialement les transferts thermiques : +66 % du coefficient de transfert entre 0,005 m/s et 0,01 m/s. Cet effet s'atténue aux vitesses élevées (0,05-0,1 m/s), où l'écart de température ΔT chute de 20-22 K à 9-9,34 K, indiquant une réduction de l'efficacité de refroidissement.

IV.9 Références

- [1] D. Huang, Z. Wu et B. Sunden, « Pressure drop and convective heat transfer of Al₂O₃/water and MWCNT/water nanofluids in a chevron plate heat exchanger », *Int. J. Heat Mass Transf.*, pp. 620–626, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.082.
- [2] T. Maré, S. Halelfadl, O. Sow, P. Estellé, S. Duret et F. Bazantay, « Comparison of the thermal performances of two nanofluids at low temperature in a plate heat exchanger », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, pp. 1535–1545, 2011, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.07.004.
- [3] M. N. Pantzali, A. A. Mouza et S. V. Paras, « Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE) », *Chem. Eng. Sci.*, pp. 3290–3300, 2009, doi: 10.1016/j.ces.2009.04.004.
- [4] R. Agromayor, D. Cabaleiro, A. A. Pardinás, J. P. Vallejo, J. Fernandez-Seara et L. Lugo, « Heat transfer performance of functionalized graphene nanoplatelet aqueous nanofluids », *Materials*, 9, 455, 2016, doi: 10.3390/ma9060455.

Conclusion générale

Cette thèse de doctorat a porté sur l'intensification du transfert de chaleur par des nanofluides à base de graphène (graphène/eau) et hybrides (graphène-Fe₃O₄ (70 : 30) /eau), sous l'influence d'un champ magnétique externe. L'objectif principal était de caractériser expérimentalement ces nanofluides, d'évaluer leur stabilité, leurs propriétés thermiques et rhéologiques, puis de simuler leur comportement thermique et hydraulique à l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel développé sous COMSOL Multiphysics, dans des configurations de convection naturelle et mixte influencées par un champ magnétique, pour quantifier leur efficacité dans ses configurations.

L'ensemble du travail a été structuré en quatre chapitres principaux.

Le premier chapitre a présenté une revue bibliographique détaillée sur les nanofluides à base de graphène. Il a couvert leurs méthodes de fabrication, leur caractérisation, la question de leur stabilité, ainsi que les facteurs influençant leurs propriétés thermophysiques : concentration en nanoparticules, dispersion, qualité du graphène, et usage de tensioactifs. Une attention particulière a été portée aux nanofluides ferromagnétiques et hybrides, qui combinent les avantages thermiques et magnétiques pour les applications de transfert thermique. Ce chapitre a aussi introduit les bases de la magnétohydrodynamique (MHD) et son impact sur les mécanismes de convection, ainsi que les approches numériques pertinentes pour modéliser le transfert thermique sous champ magnétique. Enfin, une synthèse des travaux récents a permis de situer cette étude dans le contexte de l'intensification du transfert thermique par nanofluides sous champ magnétique, avec un accent particulier sur les nanofluides à base de graphène et hybrides.

Le deuxième chapitre a détaillé la préparation et la caractérisation des nanofluides (graphène/eau) et (graphène-Fe₃O₄/eau). Des tests expérimentaux ont été réalisés sur une gamme de concentrations massique allant de 0,005 à 0,2 % en masse pour le graphène, et jusqu'à 1 % en masse pour le nanofluide hybride, dans une plage de températures de 283,15 à 323,15 K. La méthode d'exfoliation liquide, assistée par agitation mécanique et l'usage de surfactant(s), a permis d'obtenir un graphène à quelques couches, de taille contrôlée, et de grande qualité. La stabilité des nanofluides a été démontrée par un potentiel Zeta élevé, gage d'une meilleure dispersion et d'un comportement plus stable à long terme. D'un point de vue thermique, une amélioration maximale de la conductivité thermique a été obtenue : 20 % à 0,2 % en masse pour le graphène, et 6 % à 0,1 % en masse pour l'hybride à 283,15 K. En revanche, une légère diminution de la capacité calorifique isobare a été observé avec l'ajout de nanoparticules : 1,9 % pour le graphène et 2,4 % pour l'hybride. La densité des nanofluides a montré une diminution modérée avec la température, tandis que l'effet de concentration massique de nanoparticule a entraîné une augmentation de 0,25 % pour le FLG à 0,2 % en masse contre 0,10 % pour l'hybride à 0,1 % en masse.

Sur le plan rhéologique, un comportement Newtonien a été observé pour le graphène, avec une baisse de viscosité de 50 % entre 283,15 K et 313,15 K ; l'hybride adopte un comportement non Newtonien à partir de 0,025 % en masse. Les modèles de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) et de Vallejo et al. [] se sont montrés précis pour de faibles concentrations, mais leur précision s'est dégradée à fortes concentrations en particules. Par conséquent, une nouvelle corrélation empirique linéaire a été développée et permet une modélisation fiable, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9985$. En ce qui concerne la conductivité électrique, les résultats ont révélé un comportement non linéaire pour le FLG, avec un maximum à 0,1 % en masse, tandis que le nanofluide hybride, qui suit la même tendance, a montré une augmentation exceptionnelle de plus de 330 % à 0,02 % en masse, grâce à l'effet des nanoparticules Fe₃O₄ comme porteurs de charge. Enfin, les

mesures de tension superficielle, réalisées uniquement sur les nanofluides hybrides, ont mis en évidence une réduction allant jusqu'à 41,7 %, amplifiée par l'utilisation de tensioactifs. Cette propriété a pu être prédite avec une bonne précision par une corrélation linéaire (écart moyen de 2,48 %).

Le troisième chapitre a présenté une étude numérique paramétrique de la convection naturelle magnétohydrodynamique (MHD) dans une cavité tridimensionnelle remplie d'un nanofluide à base de nanotubes de carbone, et équipée d'une source froide inclinée. À l'aide de simulations sous COMSOL Multiphysics, l'effet de plusieurs paramètres tels que le nombre de Rayleigh, le nombre de Hartmann, la fraction volumique des nanoparticules et l'angle d'inclinaison de la paroi froide a été systématiquement analysé.

Les résultats ont montré que l'ajout de nanoparticules permet d'augmenter le taux de transfert de chaleur jusqu'à 100 %, au prix d'une élévation de la génération d'entropie d'environ 30 %. L'angle d'inclinaison de la paroi froide s'est révélé être un paramètre clé : une variation de 0° à 80° peut intensifier le transfert thermique de plus de 200 %, en modifiant significativement les structures d'écoulement et les gradients de température. L'application d'un champ magnétique externe, quant à elle, permet un contrôle actif du transfert de chaleur : une augmentation du nombre de Hartmann (de 0 à 100) induit une réduction importante du nombre de Nusselt, traduisant une inhibition du mouvement convectif sous l'effet des forces de Lorentz. Cette étude confirme ainsi que la combinaison d'un champ magnétique, d'un nanofluide et d'une géométrie optimisée constitue une stratégie efficace pour moduler et intensifier le transfert thermique dans les systèmes fermés.

Le quatrième chapitre a approfondi, par simulation numérique, l'étude du transfert thermique dans un microéchangeur à contre-courant utilisant deux types de nanofluides : graphène/eau et graphène-Fe₃O₄/eau. L'impact de plusieurs paramètres tels que la vitesse d'écoulement, l'intensité du champ magnétique, le courant électrique, la configuration d'écoulement, et le type de nanofluide a été systématiquement analysé. Les résultats ont montré que pour le nanofluide à base de graphène, la configuration à contre-courant améliore l'efficacité thermique, notamment à faible vitesse, avec un gain maximal de 18,5 % à 0,005 m/s.

L'application d'un courant électrique a montré un effet significatif sur le transfert thermique : le nombre de Nusselt a augmenté de 67,5 % à 0,2 A et jusqu'à 94,1 % à 0,5 A, bien que cela s'accompagne d'un accroissement du facteur de frottement. Le champ magnétique a renforcé la distribution thermique dans le microéchangeur, avec une augmentation du nombre de Nusselt atteignant 204 % entre 0,5 T et 2 T. Un écart de température maximal de 21 K a été observé à B = 2 T entre l'entrée du fluide chaud et la sortie moyenne. Concernant la vitesse d'écoulement, une amélioration thermique de 66 % a été observée lors du passage de 0,005 m/s à 0,01 m/s. Toutefois, à des vitesses plus élevées, le gain diminue et la variation de température du fluide chaud chute à environ 9 K, signalant une efficacité thermique moindre. Enfin, l'utilisation des nanofluides s'est révélée bénéfique à toutes les vitesses, à 0,01 m/s, les nanofluides graphène/eau et graphène-Fe₃O₄/eau ont permis d'accroître le transfert thermique de 66,1 % et 66,2 %, respectivement. graphène-Fe₃O₄/eau a également permis d'atteindre les écarts de température de sortie les plus élevés, confirmant l'avantage des formulations hybrides.

Au final, cette thèse a apporté plusieurs contributions originales :

- L'élaboration et la caractérisation complète de nouveaux nanofluides stables et performants à base de graphène et hybride ferromagnétique ;
- La mise en évidence d'effets synergiques du champ magnétique sur le transfert thermique ;
- Le développement de modèles de simulation couplés fiables, validés par des données expérimentales ;

- Des corrélations empiriques robustes pour prédire les propriétés thermiques et rhéologiques.

Perspectives futures

- L'ensemble des données expérimentales obtenues pour les deux familles de nanofluides constitue une base de données qui pourra être exploitée dans d'autres configurations et simulations numériques.
- Étude sur la température : Une étude plus approfondie sur l'effet de la température sur le comportement des nanofluides permettrait d'étendre ces résultats à une gamme de conditions industrielles.
- Optimisation des formulations hybrides : L'exploration de nouvelles combinaisons de nanoparticules dans les nanofluides hybrides en explorant des formulations hybrides à ratios variables (par exemple 50 :50 ou 80 : 20), pourrait conduire à des solutions encore plus performantes pour le transfert thermique.
- Validation expérimentale : La validation des résultats numériques par des tests expérimentaux reste cruciale pour confirmer les prédictions théoriques et affiner les modèles numériques. Il serait intéressant de développer le dispositif microéchangeur et de le tester en condition réelle.
- L'étude numérique pourrait être complétée avec des formes et dimensions de canaux différentes pour optimiser les performances du microéchangeur.