



**Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique**

PROJET DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité : Génie mécanique

Option : Énergétique

THEME

**Etude de l'Amélioration du Transfert thermique de l'huile moteur
10w40 grâce à l'ajout de nanoparticules $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$**

Par

AMALOU Amazigh

KRIDI Hamza

Soutenu le 25 / 06 / 2025 devant le jury composé

Dr. DAHMANE

Président

Université de Bouira

Pr. MAHFOUD Brahim

Encadrant

Université de Bouira

Dr. AGHBARI

Examineur

Université de Bouira



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) كروبي محمد الصفة: طالب، استاذ، باحث أكلج
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 102130055 والصادرة بتاريخ 30/12/2021
المسجل(ة) بكلية / معهد العلوم التطبيقية قسم هندسة ميكانيكية
والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها: Etude de l'amélioration du transfert thermique de l'huile
motor 10w40 grace à l'ajoute de nanoparticules Al₂O₃/Fe₂O₃
تحت إشراف الأستاذ(ة): م. فوز بن ابراهيم
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 21/06/2025

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

24,3 %

الامضاء:





نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،
السيد(ة).....أمالو أمانيج.....الصفة: طالب، استاذ، باحث.....طالب
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية:.....306582601.....والصادرة بتاريخ:.....29/09/2020
المسجل(ة) بكلية /.....معهد العلوم التطبيقية.....قسم.....هندسة ميكانيكية
والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها:.....Etude de l'amélioration du transfert thermique de l'huile
moteur 10w40 grace à l'ajout de nanoparticules AL₂O₃/Fe₂O₃
تحت إشراف الأستاذ(ة):.....م. محفوظ براهيم
أصرح بشرفي اني ألتم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:.....21/06/2025

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

% 24.3

الامضاء:



Remerciement

Avant d'écrire les premières lignes de ce mémoire, nous devons en écrire une d'une toute autre nature : merci.

Merci d'abord à Dieu le Tout-Puissant, source de lumière et de persévérance, qui nous a accordé l'énergie et la clarté d'esprit nécessaires pour franchir chaque étape de ce parcours, parfois semé d'incertitudes, souvent jalonné d'apprentissages.

Nous exprimons notre gratitude la plus sincère à Monsieur MAHFOUD Brahim, dont l'accompagnement n'a jamais été une simple supervision. Grâce à son écoute, sa rigueur, sa bienveillance et ses conseils avisés, ce travail a pu prendre forme avec exigence et sens. Il a su être à la fois guide, critique et source d'inspiration.

Nos remerciements s'étendent également à l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique de l'Université de Bouira, pour la richesse des connaissances transmises, leur engagement sans faille, et leur patience parfois silencieuse, mais toujours présente.

Un merci tout particulier à nos familles, qui ont su croire en nous même quand le doute s'invitait ; à nos amis, compagnons de stress, de café et de rigolade ; et à toutes ces personnes, discrètes ou visibles, qui ont apporté leur pierre à l'édifice, d'un mot, d'un sourire ou d'un geste.

Ce travail porte notre nom, mais il est le fruit de tant d'autres mains.

Dédicace

Je dédie ce PFE :

Je dédie ce mémoire à mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant tout au long de mon parcours.

À mes frères et sœurs, pour leur présence bienveillante et leurs encouragements.

À toute ma famille, qui a cru en moi et m'a toujours poussé à donner le meilleur de moi-même.

À tous ceux qui rêvent, doutent, tombent et se relèvent.

Que ce mémoire soit un modeste témoignage qu'avec persévérance et foi, chaque objectif est atteignable.

Amazigh.

Dédicace

Je dédie ce PFE :

Je dédie ce mémoire à mes parents bien-aimés, pour leur amour infini, leurs sacrifices silencieux et leur soutien indéfectible tout au long de ma vie.

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur confiance et leurs paroles réconfortantes dans les moments de doute.

À ma famille dans son ensemble, pilier solide de mon parcours, toujours présente dans les moments décisifs.

À tous ceux qui, malgré les obstacles, continuent de croire, de se relever et d'avancer.

Ce mémoire est le reflet d'un chemin semé d'efforts, de patience et de persévérance, et la preuve que chaque rêve est à portée de main quand on y met le cœur

Hamza.

ملخص

تبحث هذه الدراسة العددية في الأداء الحراري والهيدروليكي لزيت المحرك 10W 40 المعزز بجزيئات نانوية من الألومينا (Al_2O_3) والمغنيتايت (Fe_2O_3) في تدفق تايلور-كوييت، مع الأخذ بعين الاعتبار فجوة حلقيّة ضيقة ($R = 0.4$) ، وعدد رينولدز $Re = 400$ ، وعدد رايلي $Ra = 10^5$ تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج ANSYS Fluent اعتمادًا على طريقة الحجم المنتهية. تقيم الدراسة تأثير نوع السائل النانوي، وتكوينات دوران الأسطوانات ($S = -1, 0, 1$)، ونسبة الأبعاد $A = H/r_0$ على ديناميكيات دوامات تايلور وانتقال الحرارة. تُظهر النتائج أن السائل النانوي القائم على Fe_2O_3 يُحسن بشكل كبير عدد نوسلت (Nu) بنسبة تتراوح بين 15 و 30% ومعامل الاحتكاك (Cf) بنسبة تتراوح بين 10 و 25% مقارنةً بالزيت النقي، وذلك بفضل موصليته الحرارية الأعلى (0.172 واط/م.كلفن). أما الألومينا فتبدي تحسينات أكثر اعتدالًا. يؤثر نمط الدوران على بنية الدوامات ويزيد من خسائر الضغط دون تحسين ملحوظ في انتقال الحرارة.

الكلمات المفتاحية: السوائل النانوية، تايلور-كوييت، انتقال الحرارة، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، نسبة الأبعاد، ANSYS Fluent.

Résumé

Cette étude numérique examine les performances thermo-hydrauliques de l'huile moteur 10W40 enrichie en nanoparticules d'alumine (Al_2O_3) et d'hématite (Fe_2O_3) dans un écoulement de Taylor-Couette, en considérant un espace annulaire étroit ($r = 0,4$), un nombre de Reynolds $Re = 400$ et un nombre de Rayleigh $Ra = 10^5$. Les simulations sont réalisées avec ANSYS Fluent, utilisant la méthode des volumes finis. L'étude évalue l'influence du type de nanofluide, des configurations de rotation des cylindres ($S = -1, 0, 1$), et du rapport d'aspect $A = H/r_0$ sur la dynamique des tourbillons de Taylor et le transfert thermique. Les résultats montrent que le nanofluide à base de Fe_2O_3 améliore significativement le nombre de Nusselt (Nu) de 15 à 30 % et le coefficient de frottement (Cf) de 10 à 25 %, comparé à l'huile pure, en raison de sa meilleure conductivité thermique (0,172 W/m.K). L'alumine présente des gains moindres. Le mode de rotation modifie la structure tourbillonnaire et accroît les pertes de charge, sans amélioration significative du transfert thermique.

Mots-clés : nanofluides, Taylor-Couette, transfert thermique, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , rapport d'aspect, ANSYS Fluent.

Abstract

This numerical study investigates the thermo-hydraulic performance of 10W40 engine oil enhanced with alumina (Al_2O_3) and magnetite (Fe_2O_3) nanoparticles in a Taylor-Couette flow, considering a narrow annular gap ($R = 0.4$), a Reynolds number $Re = 400$, and a Rayleigh number $Ra = 10^5$. Simulations are conducted using ANSYS Fluent, based on the finite volume method. The study evaluates the influence of nanofluid type, cylinder rotation configurations ($S = -1, 0, 1$), and the aspect ratio $A = H/r_o$ on Taylor vortex dynamics and heat transfer. Results show that the Fe_2O_3 based nanofluid significantly improves the Nusselt number (Nu) by 15 to 30% and the skin friction coefficient (C_f) by 10 to 25%, compared to pure oil, due to its higher thermal conductivity ($0.172 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Alumina exhibits more moderate improvements. The rotation mode affects vortex structures and increases pressure losses without significantly enhancing heat transfer.

Keywords: *nanofluids, Taylor-Couette, heat transfer, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , aspect ratio, ANSYS Fluent.*

.

Table des matières

Résumé.....	I
Abstract.....	II
Liste des figures	VI
Liste des tableaux.....	VIII
Nomenclature	IX
Symboles latins	IX
Symboles grecs	X
Indices.....	X
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités et revue bibliographique	3
I.1. Introduction	3
I.2. Revue bibliographique.....	3
I.3 Notions sur les modes de transfert.....	5
I.3.1 Echange thermique	5
I.4 Propriétés thermiques des matériaux	7
I.4.1 Conductivité thermique (λ).....	8
I.4.2 Conductivité électrique.....	8
I.5. Définition des nanoparticules	8
I.6. Définition des nanofluides.....	10
I.6.1 Les nanofluides hybrides	10
I.6.1 Procédé de fabrication des nanofluides	11
I.6.1.1 Méthode en deux étapes	11
I.6.1.2 Méthode en une seule étape.....	12
I.6.3 Champs d'application des nanofluides	13
I.6.4 Les mécanismes de transfert thermiques dans les nanofluides	16
I.7.2.1. Viscosité dynamique (μ) :.....	21
I.7.2.2 Relation température-viscosité :	22

I.7.3 Capacité thermique (C_p).....	22
I.7.4 Masse volumique (ρ) :	23
I.7.5 Coefficient de dilatation (β) :	24
I.8 Écoulement de Taylor-Couette	25
I.9 Conclusion	26
Chapitre II : Formulation mathématique	27
II.1 Introduction	27
II.2 Formulation mathématique	27
II.2.1 Description du problème étudié	27
II.2.2 Hypothèses simplificatrices	28
II.2.3. Équations de transport.....	30
➤ Equation de continuité.....	31
➤ Equation conservation de la quantité de mouvement :.....	31
➤ Équation de conservation de l'énergie	32
II.3. Les conditions aux limites.....	32
II.4 Outils d'analyse de l'écoulement	33
II.4 Conclusions	33
Chapitre III : Méthode Numérique	35
III.1 Introduction.....	35
III.2 Définition de la CFD.....	35
III.3 Présentation de logiciel ANSYS-Fluent.....	36
III.4 Principe de la méthode des volumes finis.....	36
III.5 Maillage	37
III.6 Résolution des équations algébriques	40
III.6.1 Introduction.....	40
III.6.2 Algorithme SIMPLER	40
III.7. Paramètres numériques utilisés dans cette étude	42

III.8 Conclusion	43
Chapitre IV : Résultats et discussion	43
IV.1 Introduction	43
IV.3 Effet de la rotation et du rapport d'aspect	44
IV.4. Importance du rapport d'aspect dans le système de Taylor-Couette	46
IV.3 Amélioration du transfert de chaleur et contrainte de cisaillement	52
IV.4. Évaluation comparative co-rotation et contre-rotation	53
IV.5 Analyse des effets du rapport de rotation sur les paramètres moyens	55
IV.6 La sédimentation des nanoparticules	56
Conclusions générales.....	57
Références.....	1

Liste des figures

Figure I. 1. Les mécanismes de transfert de chaleur.....	6
Figure I. 2. Nanoparticules d'oxyde de fer.....	9
Figure I. 3. Nanoparticules d'oxyde d'aluminium « alumine ».....	9
Figure I. 4. Applications des nanofluides.....	14
Figure I. 5. TCR and the enhancement in TC for different VFs.	20
Figure I. 6. Ecoulement newtonien dans un film d'huile [55]	21
Figure I. 7. Variation de la viscosité avec la température pour une huile minérale paraffinée.	22
Figure I. 8. Croquis de l'écoulement de Taylor-Couette.....	24
 Figure II. 1. Géométrie du problème	27
 Figure III. 1. Volume de contrôle principal tridimensionnel.....	37
Figure III. 2. Projection du volume fini dans le plan (r, θ)	38
Figure III. 3. Projection du volume fini dans le plan (r, z)	38
Figure III. 4. Projection du volume fini dans le plan (r, θ)	38
Figure III. 5. Maillage.....	39
Figure III. 6. Profils de nombre de Nusselt et vitess axiale pour diffrente grille ($A = 1$, r $=0.4$ and $Ra=10^5$).....	40

Figure IV. 1. Comparaison avec (a) le résultat numérique de Alsaedi et al. [62], montrant l'effet de ϕ sur Cf.	44
Figure IV. 2. Contours des vitesses axiale, radiale et azimutale pour $A=1 ; 1.5 ; 2 ; 2.5$ et 3. ...	48
Figure IV. 3. Contours des vitesses axiale, radiale et azimutale pour $S=0, S=1$ et $S=-1$ lorsque $A=3$	50
Figure IV. 4. Profil des vitesses axiale, radiale et azimutale pour $A = 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5$ et 3.	51
Figure IV. 5. (a) Frottement et (b) nombre de Nusselt à la paroi interne ($\theta=0.$) pour $S=0$	52
Figure IV. 6. (a) Frottement cutané et (b) nombre de Nusselt local à la paroi interne ($\theta=0.$) pour $S=-1$ (co-rotation).	53
Figure IV. 7. (a) Frottement et (b) nombre de Nusselt local à la paroi interne ($\theta=0.$) pour $S=-1$ (contre-rotation)	53
Figure IV. 8. (a) Coef Frottement et (b) nombre de Nusselt local à la paroi interne ($\theta=0.$) pour $S=-1, S=0$ et $S=-1$ et nanofluide ($10W40/Fe_2O_3$).	54
Figure IV. 9. (a) Frottement cutané moyen en fonction du rapport de rotation s : et (b) Nombre de Nusselt moyen en fonction du rapport de rotation s pour le fluide de base $10W40 ; (10w40/Fe_2O_3)$ et $(10w40/Al_2O_3)$	55

Liste des tableaux

Tableau I. 1. Paramètres physico-chimiques des nanoparticules Fe_2O_3 et Al_2O_3	10
Tableau II. 1. Propriétés du fluide de base et des nanoparticules Al_2O_3	29
Tableau II. 2. Propriétés du fluide de base et des nanoparticules Fe_2O_3	29
Tableau II. 3. Propriétés thermophysiques.	30
Tableau II. 4. Conditions aux Limites.	32
Tableau III. 1. Schéma de discrétisations.....	42
Tableau III. 2. Sous relaxation.	43
Tableau IV. 1. Caractéristique pour différents rapports d'aspect A.	46
Tableau IV. 2. Total de vortex.....	47

Nomenclature

Symboles latins

Symbole	Signification	Unité / Nature	Description
H	Hauteur du cylindre / cône	m	Longueur axiale de l'élément considéré (distance entre les extrémités du cylindre).
Nu	Nombre de Nusselt local	—	Rapport entre le flux de chaleur convectif et le flux de chaleur conductif local.
\bar{Nu}	Nombre de Nusselt moyen	—	Moyenne circonférentielle ou axiale du nombre de Nusselt, indicateur global d'efficacité du transfert thermique.
P	Pression adimensionnelle	—	Pression normalisée par la pression de référence choisie dans la mise à l'échelle.
Pr	Nombre de Prandtl	—	Rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique : $Pr = \nu/\alpha$.
R	Écart annulaire	m	Distance entre surfaces interne et externe d'un système annulaire.
r, θ , z	Coordonnées cylindriques adimensionnelles	—	Coordonnées radiale, azimutale (angle) et axiale normalisées par une longueur caractéristique.
Ri	Rayon interne	m	Rayon de la paroi interne du cylindre.
Ro	Rayon externe	m	Rayon de la paroi externe du cylindre.
Re	Nombre de Reynolds	—	Caractérise la convection forcée : $Re = \rho U L / \mu$.
Ra	Nombre de Rayleigh	—	Caractérise la convection naturelle : $Ra = g \beta \Delta T L^3 / (\nu \alpha)$.
T	Température	K	Température locale du fluide ou de la paroi.
u, v, w	Composantes de la vitesse adimensionnelle	—	Vitesses radiale (u), axiale (v) et azimutale (w), normalisées par une vitesse de référence.
U	Vecteur vitesse adimensionnel	—	Vecteur constitué des composantes (u, v, w).

Symboles grecs

Symbole	Signification	Unité / Nature	Description
α	Diffusivité thermique du fluide	m ² /s	$\alpha = \lambda / (\rho C_p)$, caractérise la propagation de la chaleur dans le fluide.
β	Coefficient de dilatation thermique	1/K	Variation relative de la densité du fluide avec la température (Boussinesq).
Θ	Température adimensionnelle	—	$\Theta = (T - T_{ref}) / \Delta T$, normalisation de la température.
ν	Viscosité cinématique du fluide	m ² /s	$\nu = \mu / \rho$, influence la diffusion de la quantité de mouvement.
μ	Viscosité dynamique du fluide	kg/(m·s)	Résistance interne du fluide à l'écoulement (loi de Newton).
λ	Conductivité thermique	W/(m·°C)	Capacité du fluide à conduire la chaleur.
ρ	Densité du fluide	kg/m ³	Masse volumique du fluide.
σ	Conductivité électrique	S/m	Conductivité pour le couplage MHD (magnetohydrodynamique).
Φ	Potentiel électrique adimensionnel	—	Utilisé dans l'analyse MHD pour caractériser la distribution du potentiel.
Ω	Vitesse angulaire	rad/s	Vitesse de rotation du cylindre ou du couvercle.
ϕ	Fraction volumique	—	Proportion volumique de nanoparticules dans la suspension.

Indices

Indice	Description
F	Fluide de base
P	Phase solide (nanoparticules)
Nf	Nanofluide (fluide + particules)
Hnf	Nanofluide hybride

Introduction Générale.

Introduction générale

L'optimisation du transfert thermique représente un enjeu fondamental dans de nombreux systèmes thermo-énergétiques modernes, en particulier ceux impliquant des configurations d'écoulements complexes. Dans ce contexte, l'amélioration des performances thermiques des fluides caloporteurs est devenue un axe prioritaire de recherche. Les fluides conventionnels tels que l'eau, l'éthylène glycol ou les huiles thermiques présentent une conductivité thermique relativement faible, limitant leur capacité à dissiper efficacement la chaleur dans les systèmes à forte densité énergétique.

Les nanofluides, obtenus par la dispersion de nanoparticules à haute conductivité thermique dans un fluide de base, offrent une alternative prometteuse. Leur capacité à améliorer le transfert de chaleur, même à de faibles concentrations, ouvre des perspectives intéressantes pour les applications nécessitant un refroidissement intensifié ou une gestion thermique rigoureuse.

Ce travail se concentre sur l'étude du transfert thermique dans un fluide caloporteur (huile 10W40) enrichi en nanoparticules d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3), circulant dans une configuration de type Taylor-Couette système annulaire formé entre deux cylindres coaxiaux en rotation. Cette géométrie est représentative de nombreuses applications industrielles telles que les échangeurs de chaleur, les réacteurs chimiques ou les dispositifs de refroidissement de composants mécaniques.

L'approche retenue repose sur une modélisation numérique rigoureuse, utilisant le logiciel ANSYS Fluent et la méthode des volumes finis. L'étude analyse les effets :

- Du type de nanoparticules (Al_2O_3 vs Fe_2O_3),
- Des configurations de rotation des cylindres (co-rotation, contre-rotation, rotation simple),
- Du rapport d'aspect géométrique ($A = H/r_0$),
- Et des paramètres de convection mixte ($\text{Re} = 400$, $\text{Ra} = 10^5$) modélisés via l'approximation de Boussinesq.

L'objectif principal est de quantifier l'amélioration du nombre de Nusselt (Nu), indicateur clé du transfert de chaleur, ainsi que l'évolution des contraintes pariétales, traduites par le coefficient de frottement (Cf), en fonction des différents paramètres étudiés.

Le mémoire est structuré en quatre parties. La première présente un état de l'art sur le transfert thermique dans les nanofluides. La deuxième expose la formulation mathématique du problème. La troisième partie détaille la méthode numérique utilisée. Enfin, la quatrième analyse les

Introduction générale

résultats et propose une discussion sur les effets des paramètres physiques et géométriques sur les performances thermiques globales du système.

Chapitre I

Généralités et revue bibliographique.

Chapitre I : Généralités et revue bibliographique

I.1. Introduction

La première partie de ce travail vise à poser les bases théoriques et contextuelles nécessaires à la compréhension de l'étude portant sur l'amélioration du transfert thermique de l'huile moteur 10W40 par l'ajout de nanoparticules d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3). Elle s'articule autour de deux objectifs essentiels : fournir une vue d'ensemble des concepts fondamentaux liés aux mécanismes de transfert de chaleur et aux nanofluides, et présenter une revue bibliographique des recherches récentes dans ce domaine.

On abordera tout d'abord les différents modes de transfert thermique (conduction, convection et rayonnement), ainsi que les propriétés thermiques des matériaux. Elle mettra ensuite en lumière les caractéristiques et avantages des nanoparticules et des nanofluides, en insistant sur leur potentiel à renforcer les capacités de transfert de chaleur des fluides conventionnels.

La revue bibliographique s'intéressera aux avancées scientifiques relatives aux nanofluides, en particulier leur comportement en convection naturelle et forcée, et leur interaction avec des phénomènes complexes tels que les champs magnétiques ou les écoulements tourbillonnants. Les travaux existants seront analysés afin d'identifier les approches adoptées, les résultats obtenus, ainsi que les limites encore présentes dans la littérature actuelle.

Ainsi, ce chapitre établit le socle scientifique et technique sur lequel repose notre étude numérique, tout en mettant en évidence la pertinence du recours aux nanofluides pour améliorer les performances thermiques dans les systèmes à géométrie annulaire tels que les écoulements de Taylor-Couette.

I.2. Revue bibliographique

Ces dernières années, les techniques de refroidissement ont connu une évolution rapide et un intérêt croissant, tant dans le domaine de la recherche que dans les applications industrielles. En conséquence, les systèmes de refroidissement sont devenus des éléments indispensables dans de nombreux procédés et dispositifs technologiques. Parmi les approches innovantes, les nanofluides, issus de la dispersion de nanoparticules dans un fluide de base, se distinguent par leurs performances thermiques accrues, notamment par une conductivité thermique améliorée. Cette capacité à optimiser le transfert de chaleur rend les nanofluides particulièrement adaptés aux systèmes impliquant des composants en rotation.

1. Nanofluides et convection naturelle

Godson et al. [1] présentent un aperçu des avancées dans le domaine du transfert de chaleur convectif à l'aide de nanofluides. Plusieurs travaux antérieurs ont mis en évidence l'influence du diamètre des nanoparticules et de leur concentration sur la convection naturelle [2–3]. Toutefois, bien que les nanofluides aient démontré un fort potentiel en matière d'amélioration thermique, la littérature souligne que les écoulements tourbillonnants de nanofluides demeurent encore peu explorés et nécessitent des études approfondies.

2. Nanofluides dans les écoulements en rotation

Quelques contributions récentes ont abordé la question des écoulements en rotation. Bachok et al. [4], en s'appuyant sur une version revisitée du modèle de Von Kármán proposée par Turkeyilmazoglu [5], ont étudié l'écoulement d'un nanofluide autour d'un disque en rotation. Ils ont mis en évidence que l'ajout de nanoparticules permettait une amélioration significative du transfert thermique. Les nanoparticules de cuivre (Cu), en particulier, ont montré un potentiel élevé dans ce domaine.

Dans une étude complémentaire, Talat et Mustafa [6] ont analysé un écoulement transitoire généré par la décélération d'un disque en rotation, en utilisant une approche de similitude. Leurs résultats montrent que les variations temporelles de la vitesse angulaire favorisent le transfert de chaleur. De son côté, Sheikholeslami [7] a utilisé la méthode numérique de Runge-Kutta d'ordre 4 pour étudier la dissipation thermique dans un écoulement rotatif de nanofluide. Il a été observé que l'augmentation des effets de thermophorèse et du mouvement brownien réduit l'épaisseur de la couche limite, ce qui modifie significativement les mécanismes de transfert thermique.

3. Influence des champs magnétiques sur les nanofluides en rotation

L'étude de l'effet des champs magnétiques sur les nanofluides en rotation suscite également un intérêt croissant. Les revues proposées par [8–9] mettent en évidence que l'augmentation de la concentration en nanoparticules, combinée à une flottabilité accrue, intensifie les gradients thermiques, tandis qu'un champ magnétique intense tend à les atténuer.

L'application d'un champ magnétique dans des écoulements tourbillonnants, en particulier dans des configurations cylindriques de petite à moyenne taille, favorise la stabilisation électromagnétique [10–11]. Le mouvement d'un fluide électroconducteur dans un champ magnétique induit des courants électriques, lesquels engendrent des forces de Lorentz modifiant la structure de l'écoulement. À proximité d'un couvercle en rotation, un équilibre s'installe entre les forces centrifuges et visqueuses, créant une couche limite d'Ekman, qui est progressivement remplacée par une couche de Hartmann sous l'effet du champ magnétique [12–13]. Lorsque le

couvercle est électroconducteur, cette couche disparaît, et l'écoulement est alors principalement entraîné par l'inertie du disque inférieur [14].

Certaines études ont également montré que le champ magnétique permettait le passage d'un régime instable à oscillations vers un régime stable par bifurcation [15–16].

4. Cas spécifiques de convection naturelle en géométries complexes

Dans le cadre d'une convection naturelle en milieu rotatif, Ashorynejad et al. [17] ont étudié l'écoulement autour d'un cylindre étiré et ont conclu que les nanoparticules de cuivre offraient les meilleures performances thermiques. De leur côté, Sheikholeslami et al. [18] ont mis en évidence l'importance du choix du type de nanoparticules dans la dynamique thermique des écoulements rotatifs. Dans une étude parallèle, Sheikholeslami [19] a analysé l'effet de la dimension longitudinale et de la concentration en nanoparticules ϕ sur la convection naturelle dans un milieu poreux, observant qu'une augmentation des forces internes réduisait le gradient thermique.

Mustafa et al. [20], quant à eux, ont étudié un écoulement tridimensionnel rotatif et ont montré que le nombre local de Nusselt était significativement plus élevé dans un ferrofluide que dans l'eau pure, confirmant le rôle bénéfique des nanoparticules magnétiques.

Enfin, Sheikholeslami et Ganji [21] ont étudié le transfert thermique durant la fusion d'un nanofluide entre deux rouleaux circulaires. Ils ont observé que certains paramètres thermophysiques intensifient le gradient thermique, tandis qu'une augmentation du paramètre de fusion tend à le réduire.

Il convient de souligner que la majorité des recherches actuelles sur la convection naturelle de nanofluides se focalisent sur des géométries simples, comme les plaques verticales [22]. Peu d'études abordent des configurations plus complexes, telles que les écoulements entre cylindres concentriques en rotation, comme c'est le cas dans le système de Taylor-Couette étudié dans le présent travail.

I.3 Notions sur les modes de transfert

I.3.1 Echange thermique

Lorsqu'un fluide est en contact avec des parois à température différente, un échange d'énergie se produit sous forme de chaleur, résultant d'une différence de température entre ces deux milieux. Il existe trois principaux modes de transfert thermique :

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

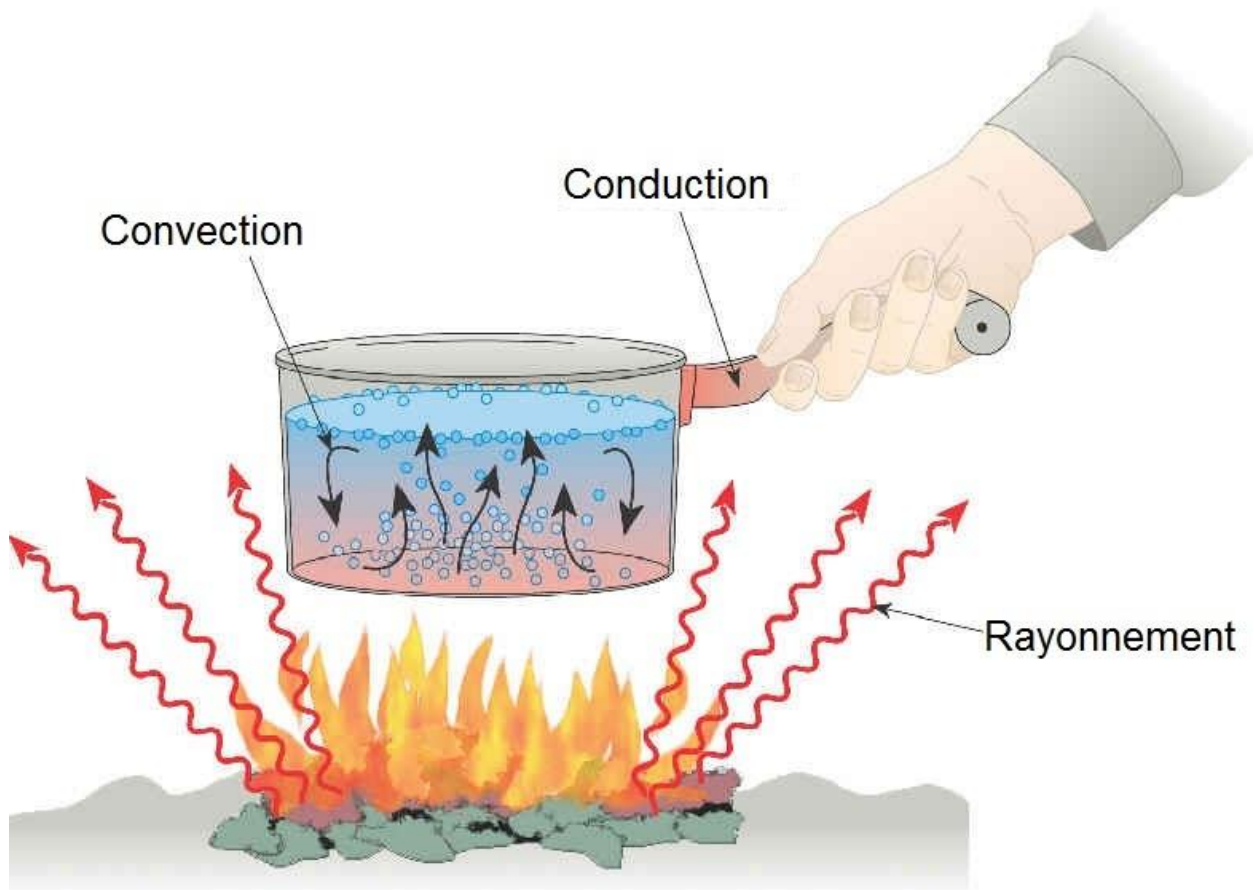


Figure I. 1. Les mécanismes de transfert de chaleur. [63]

I.3.1.1 Conduction

La conduction de la chaleur se produit dans un matériau sans mouvement de matière, et provient de phénomènes à l'échelle microscopique, tels que les vibrations des particules, l'agitation moléculaire ou la circulation des électrons. Ce processus peut être décrit comme un transfert d'énergie qui s'effectue des particules les plus excitées thermiquement (à forte vibration) vers celles moins énergétiques (froides, avec une vibration plus faible), provoqué par les collisions entre particules. Dans les solides, ce transfert peut également être facilité par le mouvement des électrons libres au sein du réseau cristallin, comme c'est le cas dans les Matériaux métalliques. De ce fait, une forte conductivité électrique s'accompagne souvent d'une bonne capacité à conduire la chaleur.

I.3.1.2 Rayonnement

Tout corps possède la faculté d'émettre et d'absorber de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce mécanisme de transfert thermique peut s'effectuer entre deux entités, même séparées par un vide ou un milieu faiblement absorbant, il s'effectue par le biais d'ondes électromagnétiques, sans nécessiter de support matériel. L'émission d'un corps

résulte de la conversion de son énergie interne liée à l'agitation thermique des électrons, proportionnelle à sa température en énergie rayonnante. À l'inverse, l'absorption correspond à la transformation de l'énergie rayonnée reçue en énergie interne. Inversement, l'absorption consiste en la conversion de cette énergie radiative en énergie interne du corps.

I.3.1.3 Convection

La convection désigne un processus de transfert thermique issu de l'interaction entre la conduction, le stockage d'énergie thermique et le déplacement du fluide. Elle constitue le principal mode d'échange de chaleur entre un fluide (liquide ou gaz) et une paroi solide. Lorsque la température d'une surface est supérieure à celle du fluide environnant, le transfert d'énergie par convection se déroule en plusieurs étapes. Dans un premier temps, la chaleur provenant de la surface solide est transmise aux particules du fluide situées à proximité immédiate par conduction thermique, avec d'autres molécules situées dans des zones plus froides, leur transférant une partie de leur énergie. Ainsi, l'écoulement du fluide transporte à la fois la matière et l'énergie, qui est stockée dans les molécules et déplacée par leur mouvement. Le transfert de chaleur par convection est classé en fonction du type d'écoulement du fluide : convection naturelle, convection forcée ou convection mixte [23 – 24]

I.4 Propriétés thermiques des matériaux

Les caractéristiques thermiques d'un matériau décrivent sa réaction face aux différents modes d'échange de chaleur. Elles permettent d'évaluer sa réponse lors de transferts thermiques en régime permanent comme la conductivité, la résistance thermique ou encore l'émissivité ainsi qu'en régime transitoire, à travers des grandeurs telles que la diffusivité et l'effusivité thermiques. Les paramètres intervenant dans les phénomènes de conduction et de convection sont également désignés sous le terme de (propriétés de transport) car elles sont liées à l'agitation des atomes et des molécules du milieu qui « transportent » la chaleur. Les propriétés thermiques se rapportent aussi à la capacité du matériau à absorber de l'énergie thermique. Cette énergie thermique peut être absorbée pour élever la température du matériau ou pour le transformer (changement des propriétés physiques ou d'état du matériau) : capacité thermique, enthalpie de fusion (ou autre transformation), coefficient de dilatation thermique.

Les propriétés thermiques des matériaux varient en fonction de leur nature et de leur température. Leur évaluation nécessite donc une mesure précise de la température ainsi qu'une bonne connaissance du matériau concerné, notamment en ce qui concerne son homogénéité et son isotropie. Les valeurs de chaque propriété sont donc affichées en donnant la nature du

matériau la température à laquelle elles sont mesurées ou, à défaut, la loi qui décrit leur évolution en fonction de la température. [25]

I.4.1 Conductivité thermique (λ)

Cette propriété traduit la facilité avec laquelle la chaleur se propage à travers un matériau soumis à un gradient thermique de 1 K/m. Elle s'exprime en watts par mètre-kelvin $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ et permet d'évaluer la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur. Plus cette valeur est élevée, plus le matériau est un bon conducteur thermique ; à l'inverse, une faible conductivité indique un bon isolant, c'est-à-dire une faible aptitude à la conduction de la chaleur [25]

I.4.2 Conductivité électrique

La conductibilité électrique est l'aptitude d'un matériau à faire circuler librement des charges électriques libres dont le courant électrique. Elle dépend de plusieurs facteurs : nombre d'électron de valence du matériau, la concentration du matériau, la température, etc. Dans les faits, plus il y a de charges libres dans le matériau pour transporter le courant, plus le matériau est conducteur. [26]

I.5. Définition des nanoparticules

Les nanoparticules regroupent un ensemble d'atomes de quelques centaines à quelques milliers et présentent au moins une dimension nanométrique, c'est-à-dire entre 1 et 100 nanomètres. Elles se trouvent à l'interface entre le monde microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. De par leur taille et leurs propriétés uniques, elles suscitent un grand intérêt, tant sur le plan fondamental qu'appliqué. Aujourd'hui, Ces structures nanométriques sont au cœur de nombreux travaux de recherche : leur élaboration est assurée par des chimistes et des physiciens, tandis que d'autres experts s'attachent à en explorer leurs caractéristiques physiques, de plus qu'elles trouvent aussi un usage en biologie, notamment comme agents de marquage cellulaire. Leur composition chimique varie selon les besoins : métaux, oxydes, nitrures, carbures ou encore matériaux carbonés.

I.5.1 L'oxyde de fer Fe_2O_3 :

Également connu sous le nom d'hématite, est un composé inorganique naturellement présent dans les roches. Il résulte de l'oxydation du fer et joue un rôle important dans divers processus biologiques. Ce composé est insoluble dans l'eau, mais se dissout dans les acides forts tels que l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique. Son PH est neutre, autour de 7. Sous forme pulvérulente, il présente une couleur allant de l'ocre à la rouille, tandis qu'à l'état cristallin, sa

teinte varie du gris au noir et brun rouge (**Figure II.1**). Les propriétés des nanoparticules de Fe_2O_3 sont résumées dans le **tableau II.1**.



Figure I. 2. Nanoparticules d'oxyde de fer. [64]

I.5.2 L'oxyde d'aluminium Al_2O_3 :

L'alumine (Al_2O_3) est le deuxième oxyde métallique le plus abondant dans la croûte terrestre, après la silice. Il se présente sous forme d'une poudre blanche très stable (voir **Figure I.3**). L'alumine est insoluble dans la plupart des composés chimiques courants et possède une faible conductivité électrique. Elle se distingue par une température de fusion élevée, légèrement supérieure à 2000 °C. Les propriétés des nanoparticules d' Al_2O_3 sont dans le **tableau I.1**.



Figure I. 3. Nanoparticules d'oxyde d'aluminium « alumine ». [65]

Tableau I. 1. Paramètres physico-chimiques des nanoparticules Fe_2O_3 et Al_2O_3 .

Propriété	Fe_2O_3	Al_2O_3
Couleur	Brun rouge	Blanc
Pureté	98	99+ %
Chaleur spécifique (j/kg.k)	104	880
Densité (g/cm ³)	5.24	3.95 – 4.1
Structure	Sphérique	Presque sphérique
Dimençons (nm)	10-100	1-100
Surface spécifique (m ² /g)	20-150	50 à 300

I.6. Définition des nanofluides

Les nanofluides sont conçus en dispersant des nanoparticules (d'une taille moyenne inférieure à 100 nm) dans des fluides caloporteurs classiques tels que l'eau, l'huile ou l'éthylène glycol. Même en faible quantité, ces nanoparticules, lorsqu'elles sont uniformément réparties et stabilisées dans le fluide de base, permettent d'améliorer considérablement ses propriétés thermiques. Le concept de "nanofluide", défini pour la première fois par Choi en 1995, désigne une suspension de nanoparticules dans un fluide de base. Cette nouvelle génération de fluides caloporteurs, issue des avancées en nanotechnologies, se distingue par des performances thermiques nettement supérieures à celles des fluides traditionnels ou des suspensions contenant des particules de taille micrométrique. La recherche sur les nanofluides constitue un domaine interdisciplinaire à l'interface entre les nanosciences, la science des matériaux et l'ingénierie thermique, a connu un essor majeur au cours de la dernière décennie. Son objectif est d'obtenir les propriétés thermiques optimales avec les plus faibles concentrations possibles (idéalement inférieure à 1 % en volume), par le biais d'une répartition uniforme et d'une stabilité durable des nanoparticules dans le fluide de base (de préférence de taille inférieure à 10 nm). Pour atteindre cet objectif, il est essentiel de comprendre les mécanismes par lesquels l'ajout de nanoparticules optimise le transfert thermique dans les fluides. [27]

I.6.1 Les nanofluides hybrides

Ils représentent une classe innovante de fluides de refroidissement, offrant des performances thermiques supérieures à la fois aux nanofluides à nanoparticules simples et aux fluides traditionnels (comme les mélanges eau-glycol). De nombreuses études ont analysé leur synthèse et leur stabilité, confirmant leur importance croissante dans divers domaines industriels et technologiques.

La sélection des nanoparticules est un facteur clé pour concevoir un nanofluide hybride à la fois efficace et durable. Les types de nanoparticules les plus couramment utilisés incluent :

- Métalliques (Ag, Cu).
- Oxydes métalliques (Al_2O_3 , CuO, Fe_2O_3).
- Matériaux carbonés.
- Carbures et nitrures métalliques.

L'optimisation de la conductivité thermique dépend également de critères tels que :

- La nature chimique des nanoparticules
- Leurs dimensions et leur morphologie
- Le pourcentage volumique des particules dispersées dans le fluide porteur

Ces paramètres influencent directement les performances du nanofluide hybride, notamment dans des contextes à fortes contraintes, tels que le refroidissement de moteurs ou les systèmes d'échange thermique.

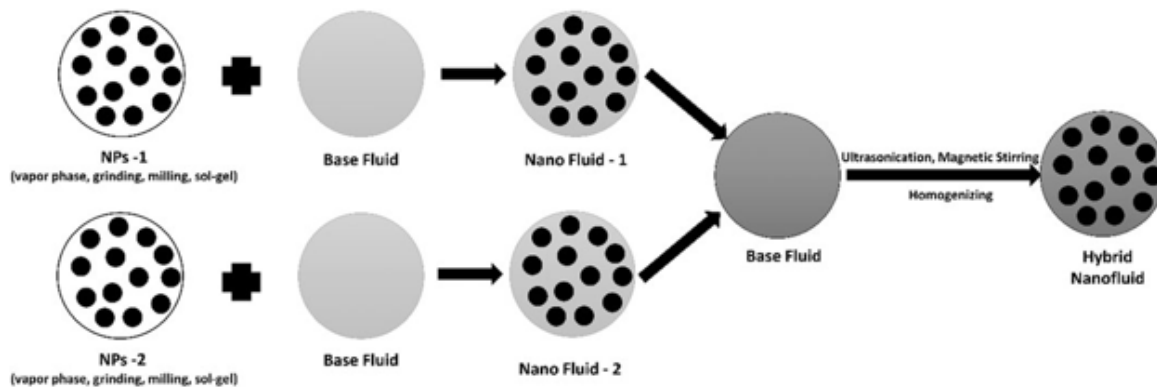


Figure 0.1. Illustration schématique de la méthode de synthèse en deux étapes. [66]

I.6.1 Procédé de fabrication des nanofluides

La production des nanofluides peut être réalisée selon deux méthodes principales :

I.6.1.1 Méthode en deux étapes

La méthode dite "en deux étapes" est la plus fréquemment employée pour élaborer des nanofluides. Elle consiste d'abord à synthétiser les nanoparticules, nanofibres, nanotubes ou autres nanomatériaux sous forme de poudres sèches, par des procédés chimiques ou physiques. Dans un second temps, ces poudres sont dispersées dans le fluide de base afin d'obtenir une suspension homogène, à l'aide de techniques telles que l'agitation magnétique intense, l'agitation

par ultrasons, le mélange à cisaillement élevé, ou encore l'homogénéisation. La méthode à deux étapes constitue l'option la plus rentable pour la fabrication de nanofluides à l'échelle industrielle, car les procédés de production des nanopoudres sont déjà bien développés dans l'industrie. Néanmoins, en raison de leur surface spécifique importante et de leur réactivité élevée, les nanoparticules ont une forte tendance à se regrouper, formant des agglomérats. L'utilisation de surfactants constitue une solution importante pour améliorer leur stabilité dans les fluides. Toutefois, la performance de ces agents tensioactifs à haute température demeure une préoccupation majeure, notamment pour les applications en environnement thermique sévère. En raison des difficultés à obtenir des nanofluides stables par la méthode en deux étapes, plusieurs techniques avancées ont été développées, parmi lesquelles figure la méthode en une étape. Cette dernière sera détaillée dans la section suivante. [28]

I.6.1.2 Méthode en une seule étape

Consiste à synthétiser les nanoparticules directement dans le fluide porteur. Cela permet de limiter à la fois leur agglomération et leur oxydation. En supprimant les phases de séchage, de stockage, de transport et de redispersions, le risque de regroupement des particules est considérablement diminué, ce qui contribue à améliorer la stabilité du nanofluide. Toutefois, cette technique présente une limite : elle n'est compatible qu'avec les fluides ayant une faible pression de vapeur. [28]

I.6.2 Les atouts et les limites des nanofluides [29]

I.6.2.1 Les atouts

- **Un transfert de chaleur optimisé grâce à une grande aire d'échange entre les particules et le fluide** : grâce à la taille nanométrique des particules, la surface de contact est considérablement augmentée, ce qui améliore l'efficacité du transfert thermique.
- **Une dispersion homogène et une bonne stabilité du nanofluide, favorisées par le mouvement brownien prédominant des nanoparticules** : les nanoparticules restent bien dispersées dans le fluide grâce au mouvement brownien, ce qui évite la sédimentation et assure une stabilité à long terme.
- **Les caractéristiques comme la conductivité thermique et la mouillabilité peuvent être finement contrôlées par la variation de la concentration en nanoparticules**, permettant d'adapter le nanofluide aux exigences spécifiques de chaque usage

I.6.2.2 les limites

- **Les données expérimentales :**

Issues de diverses études présentent des divergences notables, traduisant un manque de cohérence dans l'évaluation des propriétés des nanofluides.

- **Une compréhension théorique encore incomplète :**

Les mécanismes physiques à l'origine des modifications des propriétés des nanofluides, notamment l'amélioration de la conductivité thermique, ne sont pas encore pleinement élucidés, ce qui limite la prédiction et l'optimisation de leurs performances.

- **Mauvaise caractérisation des nanoparticules :**

Une caractérisation insuffisante ou imprécise des nanoparticules (taille, forme, distribution, etc.) peut conduire à des résultats incohérents et affecter la reproductibilité des études.

- **Viscosité élevée et faible chaleur spécifique :**

Les nanofluides ont tendance à présenter une viscosité plus élevée que les fluides de base, ce qui peut augmenter les pertes de charge et réduire l'efficacité énergétique. De plus, leur capacité thermique spécifique est souvent plus faible, ce qui peut limiter leur efficacité dans certaines applications.

- **Coût élevé des nanofluides :**

La production et l'utilisation des nanoparticules sont coûteuses, ce qui rend les nanofluides moins attractifs pour des applications à grande échelle ou à faible budget.

- **Difficultés dans le processus de production :**

La fabrication des nanofluides nécessite des techniques sophistiquées pour assurer une dispersion homogène et stable des nanoparticules, ce qui peut être complexe et à coût élevé.

I.6.3 Champs d'application des nanofluides

Grâce à leurs propriétés thermiques renforcées, les nanofluides sont employés pour intensifier le transfert de chaleur et accroître l'efficacité énergétique des dispositifs dans divers systèmes thermiques. Quelques exemples d'applications seront présentés à cet effet.

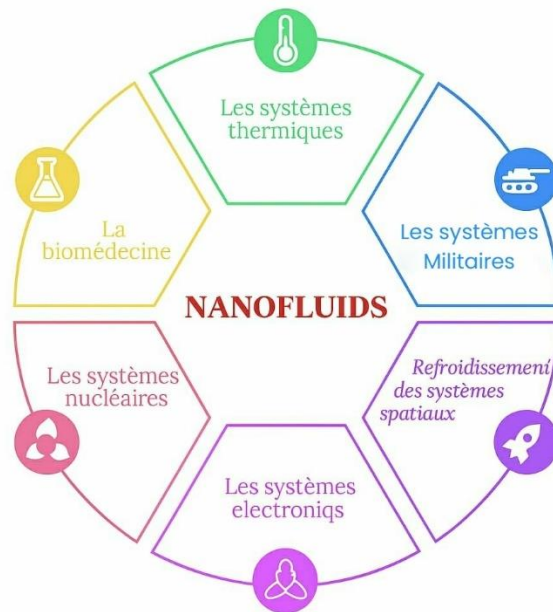


Figure I. 4. Applications des nanofluides.

I.6.3.1 Les systèmes thermiques

Le mélange eau/éthylène-glycol est largement utilisé comme fluide de refroidissement dans les moteurs de véhicules. L'incorporation de nanoparticules dans ce mélange permet une amélioration notable de l'efficacité du refroidissement. Ce comportement a fait l'objet de nombreuses recherches. À titre d'exemple, **Tzeng et al. [30]** ont étudié l'effet de la dispersion de nanoparticules de CuO et d' Al_2O_3 dans un fluide de refroidissement utilisé pour un moteur de transmission, mettant en évidence une amélioration significative des performances thermiques. Dans une autre étude, **Zhang et al. [31]** ont exploré l'utilisation de nanoparticules pour réduire l'usure par lubrification. Ils ont observé une amélioration des propriétés tribologiques, notamment une meilleure résistance à l'usure et une réduction du frottement entre les composants mécaniques en mouvement.

I.6.3.2 Les systèmes électroniques

Dans le secteur des composants électroniques, les nanofluides sont de plus en plus étudiés comme des liquides de refroidissement très efficaces. Par exemple, **Tsai** et ses collègues **[32]** ont utilisé un nanofluide à base d'eau pour refroidir le processeur d'un micro-ordinateur, ce qui a permis de mieux évacuer la chaleur. De leur côté, **Ma** et son équipe ont observé que l'utilisation d'un nanofluide dans un système de transfert thermique appelé caloduc oscillant permettait de réduire la différence de température entre les deux extrémités. Avec seulement 1 % de nanoparticules et une puissance de 80 W, ils ont mesuré une différence de 16,6 °C, preuve de l'efficacité du procédé.

I.6.3.3 Les systèmes militaires

Dans le domaine de la défense, les nanofluides sont envisagés comme des alternatives innovantes pour le refroidissement thermique, en particulier dans les équipements d'électronique de puissance et les armes à énergie dirigée. Ces systèmes sont soumis à des charges thermiques très importantes (environ 500 à 1000 W/cm²), ce qui exige l'utilisation de technologies de dissipation thermique hautement efficaces. Les nanofluides se sont révélés performants pour répondre à ces exigences. On retrouve également leur utilisation dans divers équipements militaires, notamment les véhicules blindés, les sous-marins et les diodes laser à haute puissance.

I.6.3.4 Refroidissement des systèmes spatiaux

Dans le domaine spatial, plusieurs études, notamment celles de **You et al. [33]** et **Vassallo et al. [34]**, ont souligné le rôle essentiel que joue l'introduction de nanoparticules dans les fluides de refroidissement dédiés aux systèmes électroniques embarqués. Ces nanoparticules jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des performances thermiques, en particulier dans les environnements où la concentration de puissance atteint des niveaux très élevés.

I.6.3.5 Les systèmes nucléaires

Le Massachusetts Institute of Technology (MIT) a mis en place un centre de recherche interdisciplinaire dédié aux avancées en nanotechnologie, avec un intérêt particulier pour les nanofluides appliqués au domaine de l'énergie nucléaire. Les travaux en cours portent notamment sur l'évaluation de l'influence des nanofluides sur la sûreté neutronique ainsi que sur l'efficacité économique des installations nucléaires.

I.6.3.6 La biomédecine

Les nanofluides ainsi que les nanoparticules offrent un large éventail d'applications dans le domaine biomédical. À titre d'exemple, des nanoparticules à base de fer ont été exploitées comme vecteurs de médicaments afin d'atténuer certains effets indésirables liés aux thérapies anticancéreuses conventionnelles. Par ailleurs, dans le but d'améliorer la sécurité des interventions chirurgicales par un refroidissement localisé et contrôlé de la zone opérée, **Jordan** et ses collaborateurs ont mené des recherches significatives dans ce domaine. **[35]** ont mené une étude suggérant que les nanofluides pourraient être utilisés pour élever la température autour des tumeurs, permettant ainsi de détruire les cellules cancéreuses tout en préservant les cellules saines avoisinantes.

I.6.3.7 D'autres applications

Les nanofluides trouvent également leur utilité dans divers contextes où l'optimisation du transfert thermique influence directement la qualité, le rendement ou les coûts associés à un produit ou un procédé. Dans le secteur des énergies renouvelables, par exemple, ils sont employés pour renforcer l'échange thermique entre les capteurs solaires et les systèmes de stockage, tout en contribuant à une augmentation de la densité énergétique. Par ailleurs, les réfrigérants formulés à base de nanofluides montrent un fort potentiel d'application dans de nombreuses industries de transformation, notamment dans les domaines des matériaux, de la chimie, de l'agroalimentaire, ainsi que dans les secteurs pétrolier et gazier [36].

I.6.4 Les mécanismes de transfert thermiques dans les nanofluides

La convection constitue un mécanisme de transfert thermique impliquant simultanément la conduction, le transport d'énergie par le fluide en mouvement, ainsi que l'accumulation locale de chaleur. Elle constitue le principal mécanisme de transfert thermique entre une paroi solide et un fluide, qu'il soit liquide ou gazeux. Lorsqu'une surface est à une température plus élevée que celle du fluide environnant, le transfert thermique par convection s'effectue en plusieurs phases. Dans un premier temps, la chaleur est transmise par conduction depuis la surface solide vers les couches de fluide immédiatement adjacentes. Cette énergie transmise augmente leur température ainsi que leur énergie interne. Par la suite, les particules de fluide chauffées entrent en mouvement et interagissent avec celles situées dans des régions à plus basse température, assurant ainsi un transfert partiel de leur énergie thermique. Cette énergie, désormais emmagasinée dans les particules en mouvement, est transportée au sein du fluide grâce à la dynamique de celui-ci.

I.6.4.1 Type de convection

Le transfert de chaleur par convection peut être classé en fonction du mode d'écoulement du fluide : convection libre, forcée ou mixte. La convection est dite naturelle ou libre lorsque le mouvement du fluide est induit exclusivement par les gradients de densité engendrés par des différences de température. À l'inverse, lorsque l'écoulement du fluide est provoqué par une force extérieure, telle qu'une pompe ou un ventilateur, on parle alors de convection forcée. Lorsque les deux mécanismes naturel et forcé interviennent simultanément, et qu'aucun ne peut être négligé par rapport à l'autre, on parle alors de convection mixte.

La convection naturelle

La convection naturelle désigne un mécanisme de transfert thermique qui se produit entre une surface solide et un fluide, en raison d'un écart de température entre les deux milieux. Ce phénomène repose sur la diffusion thermique entre ces deux milieux. Les différences de température génèrent des variations de densité au sein du fluide, provoquant une force verticale, à savoir la poussée d'Archimède liée à l'expansion locale du fluide. Puisque le champ de vitesse du fluide dépend directement des variations de température au sein de celui-ci, l'étude de la convection naturelle requiert une analyse conjointe des aspects mécaniques et thermiques. Cette interaction est régie par les propriétés thermodynamiques du fluide, les différences de température en présence, ainsi que la configuration géométrique du système étudié. A notre connaissance, les travaux expérimentaux consacrés à la convection naturelle dans les nanofluides demeurent relativement rares. **Khanafer et al. [37]** ont étudié numériquement ce phénomène dans une cavité chauffée, en prenant en compte l'effet de la dispersion des nanoparticules. Ils ont établi une corrélation exprimant le nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Grashof et de la fraction volumique des nanoparticules, mettant ainsi en évidence leur influence sur le transfert thermique.

Putra et al. [38] ont étudié la convection naturelle dans des nanofluides à base d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3 -eau) et d'oxyde de cuivre (CuO -eau), confinés dans un cylindre horizontal dont les parois verticales étaient soumises à des températures constantes mais différentes. Pour des nombres de Rayleigh compris entre 10^6 et 10^9 , les résultats ont montré qu'une augmentation de la concentration volumique en nanoparticules entraînait une réduction du transfert thermique. Cela indique une dégradation de l'efficacité thermique du système.

Roy et al. [39], à travers une simulation numérique portant sur un système de refroidissement radial utilisant un nanofluide (Al_2O_3 + eau), ont montré qu'une concentration volumique de 10 % en Al_2O_3 pouvait doubler le transfert de chaleur comparé au fluide de base seul.

Wen et al. [40] ont rapporté une baisse du transfert thermique en convection naturelle pour un nanofluide (TiO_2 + eau) lorsque la fraction volumique augmente, en particulier pour des nombres de Rayleigh inférieurs à 10^6 , confirmant ainsi la tendance à la dégradation du transfert pour de faibles régimes convectifs.

Kim et al. [41] ont mené une analyse théorique de l'apparition de la convection naturelle dans une couche horizontale infinie contenant un nanofluide. À cette occasion, ils ont introduit un facteur de stabilité noté f , défini comme le rapport entre les nombres de Rayleigh du nanofluide et du fluide de base $f = \frac{Ra_{nf}}{Ra_{bf}}$, et exprimé en fonction des propriétés thermophysiques

du fluide ainsi que de la concentration en nanoparticules. Leurs résultats indiquent une amélioration du transfert par convection naturelle avec l'augmentation de f , mais cette amélioration reste valable uniquement pour de grands nombres de Rayleigh, comme nous le verrons par la suite.

Wang et al. [42] ont effectué une simulation numérique de la convection naturelle au sein d'une cavité bidimensionnelle chauffée par la base, en analysant l'influence de différents nombres de Grashof sur le comportement thermique et dynamique du fluide, et différentes concentrations en nanoparticules. Ils ont observé une augmentation de 30 % du transfert thermique pour un nanofluide (Al_2O_3 + eau) avec une concentration de 10 %, et jusqu'à 80 % pour un nanofluide à base de cuivre. Une amélioration de l'ordre de 100 % du transfert thermique a été observée pour un nanofluide composé de nanotubes de carbone dispersés dans de l'huile, et ce, avec une concentration en nanoparticules aussi faible que 1 %.

En 2006, **Rong Yan Jou et al. [43]** ont utilisé le modèle de Khanafer pour simuler la convection naturelle dans une cavité différentiellement chauffée remplie de nanofluide. Ils ont étudié l'influence du nombre de Rayleigh ($10^3 \leq \text{Ra} \leq 10^6$) et du rapport d'aspect (1/2, 1, 2) sur le comportement de l'écoulement. Leurs résultats ont montré une amélioration du transfert thermique avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.

Tiwari et al. [44] ont analysé numériquement l'écoulement convectif dans une cavité rectangulaire à parois verticales mobiles, remplie d'un nanofluide (Cu + eau). En modélisant le nanofluide comme un fluide newtonien homogène possédant des propriétés thermophysiques équivalentes, ils ont démontré que l'orientation du mouvement des parois, ainsi que la valeur du nombre de Richardson, exercent une influence significative sur le transfert de chaleur et sur la dynamique de l'écoulement.

Hwang et al. [45] ont examiné la convection naturelle dans une cellule rectangulaire de type Rayleigh-Bénard en utilisant un nanofluide à base d'eau et d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). En s'appuyant sur les modèles de Globe & Dropkin pour estimer le coefficient d'échange thermique, ils ont étudié l'influence de plusieurs paramètres, tels que la concentration en nanoparticules, leur taille et la température. Deux formulations de la viscosité ont été prises en compte : celle proposée par Einstein et celle de Pak & Choi. Les résultats ont montré que, selon le modèle adopté, l'augmentation de la fraction volumique pouvait conduire soit à une amélioration (modèle d'Einstein), soit à une diminution (modèle de Pak & Choi) des performances thermiques.

La convection forcée

En convection forcée, l'écoulement du fluide est généré par une action mécanique externe, telle qu'un ventilateur, une pompe ou un compresseur, indépendamment des gradients de température. Le mouvement des particules est ainsi provoqué par des gradients de pression imposés. L'étude du transfert thermique par convection est donc étroitement couplée à celle de la dynamique des fluides.

Mahfoud et al. [46] ont réalisé une étude approfondie sur l'écoulement d'un nanofluide hybride en rotation dans un espace annulaire formé par deux cylindres coaxiaux. Ce travail se distingue par l'analyse conjointe de la rotation et de l'influence d'un champ magnétique appliqué, combinée à l'utilisation d'un nanofluide hybride (Cu-Al₂O₃/eau), dans le but d'optimiser le transfert thermique au sein de configurations cylindriques complexes. Les résultats obtenus mettent en évidence une amélioration significative du transfert de chaleur sous l'effet conjugué du champ magnétique axial et de la rotation différentielle des cylindres, soulignant l'influence du nombre de Hartmann et de la concentration volumique

De son côté, **Mahfoud [47]** a mis en évidence dans son étude numérique les bénéfices thermiques apportés par l'utilisation d'un couvercle conducteur électriquement dans un écoulement tourbillonnant de nanofluide. L'étude démontre que la conductivité électrique du couvercle favorise le transfert thermique, en modulant les lignes de courant induites par le champ magnétique appliqué. La simulation réalisée met en lumière la synergie entre l'induction électromagnétique et les structures tourbillonnantes internes, suggérant des applications pertinentes dans les systèmes de refroidissement à haute performance. Dans la continuité de ces travaux [48, 49, 50, 52] ils approfondissent l'impact de la conductivité électrique des parois cylindriques sur les performances thermiques des nanofluides. En particulier, l'article [48] introduit une interaction complexe entre les propriétés des parois, le champ magnétique, et les caractéristiques du nanofluide, révèle une augmentation significative du nombre de Nusselt pour des matériaux à haute conductivité. L'étude [50] affine ces observations dans le contexte d'un écoulement tourbillonnant, soulignant que la distribution asymétrique de température dépend fortement de la nature conductrice des surfaces de confinement.

Enfin, dans [51], Mahfoud explore par simulation l'effet isolé du champ magnétique sur le transfert thermique dans un écoulement tourbillonnant de nanofluide, sans intervention directe de parois conductrices. Ce travail offre une compréhension fine des mécanismes MHD dans des géométries cylindriques, et met en avant l'importance du contrôle paramétrique (nombre de Hartmann, rapport de rotation) pour maximiser les échanges thermiques.

I.7.1. Conductivité thermique (K) :

La capacité d'un fluide à transférer la chaleur dépend essentiellement de sa conductivité thermique (CT), d'où la préférence pour l'utilisation de fluides possédant une CT élevée. L'ajout de nanoparticules hybrides permet d'améliorer significativement cette conductivité grâce à plusieurs mécanismes : le mouvement brownien, les interactions entre les nanoparticules et le fluide de base, la conductivité intrinsèque élevée des solides par rapport aux liquides, ainsi que la formation de structures stables à l'échelle nanométrique. Le taux d'augmentation de la conductivité thermique dans ces nanofluides hybrides dépend principalement de deux paramètres : la température et la fraction volumique (FV) des particules solides [53].

En pratique, plusieurs observations peuvent être faites :

- Une augmentation de la fraction volumique des particules entraîne simultanément une élévation de la conductivité thermique et de la viscosité dynamique du fluide.
- L'effet sur la capacité calorifique massique dépend de la nature du fluide de base utilisé.
- Une élévation de la température tend à accroître la conductivité thermique tout en réduisant la viscosité dynamique.

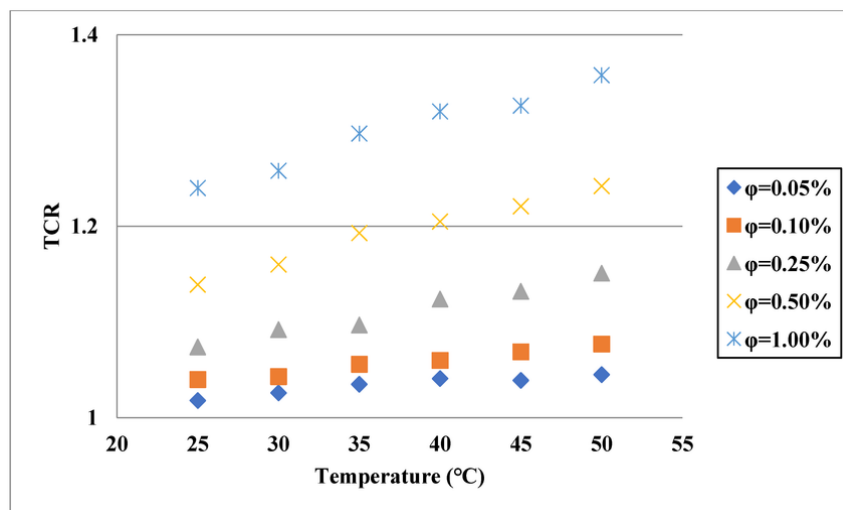


Figure I. 5. TCR and the enhancement in TC for different VFs. [67]

I.7.2. Viscosité :

Parmi l'ensemble des propriétés physico-chimiques des huiles, la viscosité revêt une importance primordiale. Elle conditionne notamment les pertes par frottement, la capacité portante ainsi que l'épaisseur du film lubrifiant. Conformément à la norme NF T60-100, la viscosité d'un liquide se définit comme la résistance interne qu'exercent ses molécules lors de leur déplacement relatif

sous l'effet d'une contrainte de cisaillement. Cette propriété était autrefois désignée sous le nom de coefficient de frottement interne [54].

I.7.2.1. Viscosité dynamique (μ) :

La viscosité dynamique, également appelée viscosité absolue, est la grandeur utilisée pour les calculs relatifs à l'épaisseur du film d'huile. Elle repose sur la loi de Newton, qui décrit l'écoulement laminaire d'un fluide visqueux. Selon cette loi, lorsqu'une paroi mobile de surface S se déplace à une vitesse u parallèlement à une paroi fixe située à une distance h (Correspondant à l'épaisseur du film), une force F est nécessaire pour vaincre la résistance tangentielle induite par le frottement visqueux du fluide. La viscosité dynamique exprime cette résistance interne au mouvement relatif entre les deux surfaces, comme illustré en **Figure I.7**.

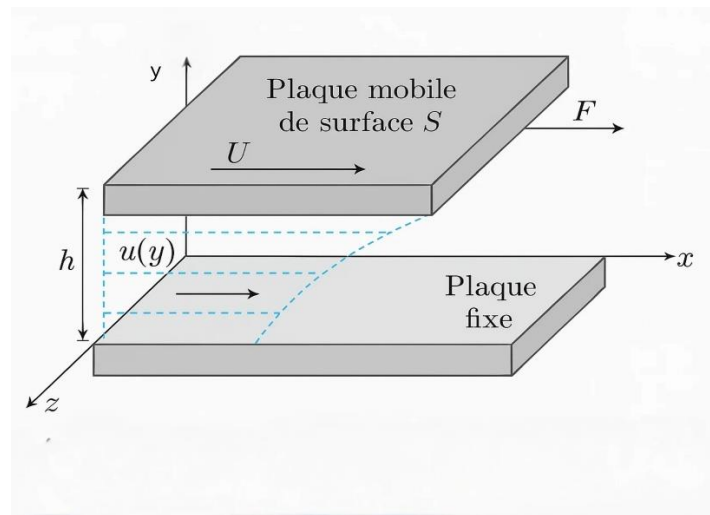


Figure I. 6. Ecoulement newtonien dans un film d'huile [55]

Pour la plupart des liquides visqueux, comme les huiles minérales et une grande partie des huiles synthétiques, le rapport (F/S) est proportionnel au quotient $d\mu/dh$ (dans le cas de liquides newtoniens). Le coefficient η représente le coefficient de viscosité dynamique, aussi connu sous le nom de viscosité dynamique tout court. [56]

$$\text{On a :} \quad \frac{F}{S} = \eta \frac{d\mu}{dh} \quad (\text{I.1})$$

Dans le système international (SI), l'unité de mesure de la viscosité dynamique est le Pasca l-seconde (Pa.s). Dans le système précédent (CGS), l'unité utilisée était le poise (P).

I.7.2.2 Relation température-viscosité :

En règle générale, la viscosité des liquides varie fortement avec la température. Pour l'eau, cette variation peut atteindre environ 2,5 % aux alentours de 20 °C, tandis que pour les huiles minérales, elle peut atteindre 10 à 15 % par degré Celsius, selon leur nature. La viscosité des huiles diminue généralement avec l'augmentation de la température, et cette variation dépend fortement de leur composition chimique, comme le montre la **Figure I.8** [54]. Pour une huile lubrifiante, on peut utiliser le modèle empirique suivant [57] :

$$\eta = \eta_0 e^{ET} \quad (I.2)$$

Avec : $E = a + bT + CT^2$

Dans cette équation, η_0 représente la viscosité dynamique à une température spécifique, T fait référence à la température absolue, tandis que (a, b et c) sont des paramètres qui doivent être définis pour chaque type de lubrifiant.

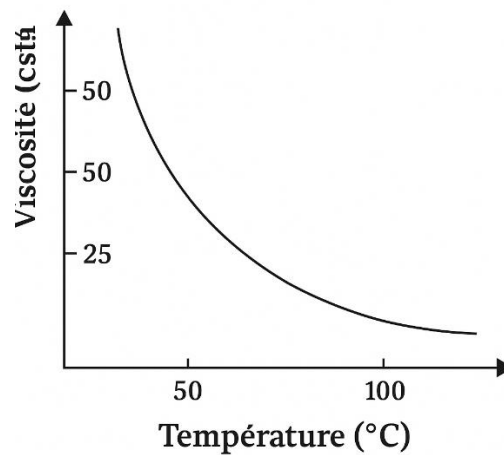


Figure I. 7. Variation de la viscosité avec la température pour une huile minérale paraffinée.

I.7.3 Capacité thermique (C_p)

Chaleur spécifique (notée C_p) est la capacité calorifique massique d'une substance ou d'un système homogène. On la caractérise comme la quantité de chaleur requise pour augmenter la température d'un kilogramme de cette matière de 1 K. En termes mathématiques, elle s'exprime

par la relation : $C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$

- Q représente la quantité de chaleur (exprimée en joules),
- m désigne la masse (indiquée en kg),
- ΔT symbolise le changement de température (mesuré en kelvins).

Concernant les nanofluides, il s'agit de suspensions constituées de nanoparticules solides dispersées dans un fluide de base, la détermination de leur chaleur spécifique globale est plus complexe en raison de la présence de plusieurs constituants. Pour l'estimer, On peut recourir à divers modèles théoriques, parmi lesquels les deux suivants sont les plus couramment utilisés :

➤ **Modèle de mélange pondéré par les masses (modèle classique) [58]**

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

Où :

- ϕ La fraction volumique des nanoparticules
- $(C_p)_f$ La chaleur spécifique du fluide de base
- $(C_p)_p$ Celle des particules solides

➤ **Modèle basé sur la capacité calorifique effective (approche énergétique plus précise) [59]**

$$(C_p)_{nf} = \frac{(1 - \phi) \cdot \rho_f \cdot (C_p)_f + \phi \cdot \rho_p \cdot (C_p)_p}{\rho_{nf}}$$

Avec ρ_f , ρ_p et ρ_{nf} respectivement les densités du fluide de base, des particules et du nanofluide.

I.7.4 Masse volumique (ρ) :

La densité, symbolisée par ρ , est déterminée comme le quotient de la masse d'un objet par le volume qu'il occupe. Elle s'exprime en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3) selon la relation [60]

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Dans le cadre des nanofluides, constitués d'un fluide porteur et de nanoparticules solides en suspension, la masse volumique effective dépend des propriétés respectives des deux phases. Selon la fraction volumique ϕ des nanoparticules, elle peut être évaluée en utilisant un modèle de mélange linéaire :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \cdot \rho_f + \phi \cdot \rho_p$$

Où :

- ρ_{nf} La masse volumique du nanofluide,
- ρ_f La masse volumique du fluide de base
- ρ_p La masse volumique des particules solides
- ϕ La fraction volumique des particules

I.7.5 Coefficient de dilatation (β) :

L'indice de dilatation thermique volumique, représenté par le symbole β , est un paramètre physique qui mesure l'altération proportionnelle du volume d'un matériau en fonction de la température, lorsque la pression reste constante. Il est caractérisé par la relation [60]

$$\beta = \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

Où : V représente le volume, T indique la température ; la dérivée est calculée sous pression constante.

Dans le système international, β s'exprime en kelvin^{-1} (K^{-1}). Plus β est élevé, plus le matériau se dilate rapidement avec la température.

Pour les nanofluides, le coefficient de dilatation β joue un rôle important dans :

- Les calculs de convection naturelle.
- La stabilité thermique.
- Les transferts de chaleur liés à l'expansion du fluide.

Bien que relativement peu étudié par rapport à la conductivité thermique ou la viscosité, β peut être approximé par un modèle de mélange, de manière similaire à d'autres propriétés thermophysiques. Un modèle simplifié est :

$$\beta_{nf} \approx (1 - \phi) \cdot \beta_f + \phi \cdot \beta_p$$

- β_{nf} Coefficient de dilatation du nanofluide
- β_f Coefficient de dilatation du fluide porteur (ex. huile 10W40)
- β_p Coefficient de dilatation des nanoparticules (ex. Al_2O_3 , Fe_2O_3)
- ϕ Fraction volumique des nanoparticules

I.8 Écoulement de Taylor-Couette

En hydrodynamique, un écoulement de Taylor Couette est constitué d'un fluide visqueux emprisonné dans l'espace entre deux cylindres rotatifs (**Figure I. 8**). Aux faibles vitesses angulaires (mesurées à l'aide du nombre de Reynolds Re), l'écoulement est constant et purement azimutal. Cet état fondamental est appelé flux circulant de Couette.

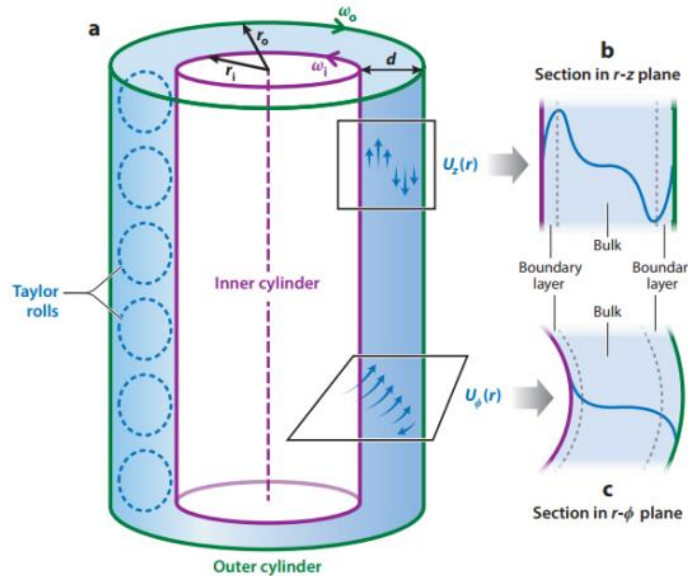


Figure I. 8. Croquis de l'écoulement de Taylor-Couette. [68]

Taylor a montré que lorsque la vitesse angulaire du cylindre interne augmente au-dessus d'un certain seuil, le flux de Couette devient instable et un état secondaire stable apparaît, qui est caractérisé par le flux vortex dit de Taylor, qui sont des tourbillons toroïdaux axisymétriques. Par la suite, à mesure que la vitesse angulaire du cylindre augmente, le système subira une série d'instabilités, conduisant à un état plus complexe du temps et de l'espace. La turbulence se produit au-dessus d'un certain nombre de Reynolds. [68]

I.9 Conclusion

Ce chapitre a fourni une introduction complète aux concepts fondamentaux du transfert de chaleur et des nanofluides, ainsi qu'une revue détaillée de la littérature récente dans ce domaine. Nous avons étudié les trois mécanismes de transfert thermique conduction, convection et rayonnement et avons présenté les caractéristiques thermiques des matériaux ainsi que sur les propriétés des nanofluides, en focalisant notre attention, sur leur potentiel dans les applications automobiles. La revue de la littérature a mis en évidence les avancées récentes dans l'étude des nanofluides, notamment leur comportement en convection naturelle et forcée. Des lacunes ont été identifiées, telles que l'étude limitée des écoulements tourbillonnants.

Chapitre II

Formulation

mathématique

Chapitre II : Formulation mathématique

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la formulation mathématique et L'approche numérique employée pour simuler et résoudre le problème du transfert de chaleur dans l'huile moteur 10W40 pure et avec des nanoparticules d' Al_2O_3 et de Fe_2O_3 . La première partie du chapitre est consacrée à la modélisation mathématique, où nous définissons la géométrie du problème, Les conditions aux frontières et les équations de conservation qui contrôlent l'écoulement et le transfert thermique, y compris les équations de conservation de la masse, du mouvement et de l'énergie. La deuxième section explique en détail la technique numérique utilisée., à savoir la méthode des volumes finis, qui est utilisée pour discrétiser et résoudre numériquement ces équations, en abordant les étapes de discrétisation, d'intégration, et de résolution du système. Ce chapitre vise à fournir une base théorique et computationnelle solide pour les simulations CFD qui seront présentées dans le chapitre suivant, assurant une compréhension claire des fondements de l'étude.

II.2 Formulation mathématique

II.2.1 Description du problème étudié

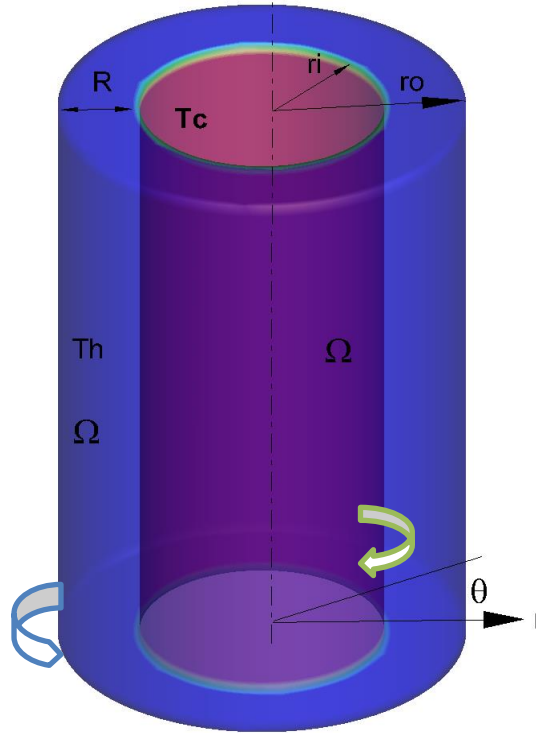
Un fluide visqueux tourne dans l'espace annulaire (R) entre deux cylindres verticaux coaxiaux de hauteur (H). L'action du gradient thermique est imposée dans la direction horizontal ce qui est représenté schématiquement sur la **Figure II.1**.

Les faces supérieure et inférieure du domaine sont considérées comme adiabatiques, c'est-à-dire sans échange thermique. La paroi extérieure est maintenue à une température élevée constante (T_h), tandis que la paroi intérieure est maintenue à une température constante plus basse (T_c), assurant ainsi un gradient thermique radial.

Concernant les conditions dynamiques, trois modes de rotation des cylindres sont envisagés : la co-rotation ($s = 1$), où les deux cylindres tournent dans le même sens avec vitesse constante Ω ; la contre-rotation ($s = -1$), où les cylindres tournent en sens opposés ; et la rotation seule du cylindre intérieur ($s = 0$), dans laquelle le cylindre intérieur reste fixe. Le paramètre s correspond au rapport entre la vitesse angulaire du cylindre extérieur et celle du cylindre intérieur.

L'étude présente un seul espace annulaire ($R = 0.4$), et trois rapports d'aspect $\left(\frac{H}{r_0}\right) = 1; 1.5, 2, 2.5 \text{ et } 3$. Toutefois, dans les deux parties l'espace annulaire est défini

comme ($r = r_0 - r_i$), où r_i et r_0 sont les rayons des cylindres interne et externe, respectivement et $r_0 = 1.0$ dans tous les cas. Les simulations comparent l'huile pure 10W40 et les nanofluides, révélant une amélioration significative du transfert thermique, avec Fe_2O_3 ($0,172 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) surpassant légèrement Al_2O_3 ($0,139 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) par rapport à l'huile pure ($0,135 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).



II.2.2 Hypothèses simplificatrices

Dans le but de converger vers la solution des équations de la convection mixte, nous adopterons les hypothèses simplificatrices suivantes liées à la géométrie déjà exposée. (Figure II.1) :

- Le fluide est Newtonien et incompressible.
- L'écoulement avec tourbillon (Swirl) et laminaire
- La dissipation visqueuse et l'effet de Joule sont négligeables.

Si la densité change peu, on peut considérer qu'elle reste constante dans les termes transitoire et convectif, et elle n'est traitée comme une variable que dans le terme gravitationnel suivant z' , sachant qu'elle est représentée par l'approximation de Boussinesq :

$$(\rho - \rho_0)g = -\rho_0 g \beta (T - T_0)$$

- On suppose que les caractéristiques physiques du fluide (σ , λ , α et ν) demeurent constantes. L'équilibre thermique est maintenu entre le fluide de base et les nanoparticules. Les nanoparticules prennent une forme cylindrique (avec $n = 6$) et sont

uniformément réparties dans le nanofluide. Le modèle de nanofluide de Tiwari-Das [32], proposé pour l'hydrodynamique, est utilisé dans cette étude.

Tableau II. 1. Propriétés du fluide de base et des nanoparticules Al_2O_3 .

Propriété	Base (10w40)	Nanoparticule (Al_2O_3)	Nanofluide (5% Φ)
Densité (ρ)	$\sim 870 \text{ kg/m}^3$	$\sim 3970 \text{ kg/m}^3$	$\sim 1044 \text{ kg/m}^3$
Conductivité thermique (k)	~ 0.145 W/m.K	$\sim 30 \text{ W/m.K}$	~ 0.165 W/m.K
Capacité thermique (cp)	~ 2000 J/kg.K	$\sim 880 \text{ J/kg.K}$	~ 1320 J/kg.K
Viscosité (μ)	$\sim 0.1 \text{ Pa.s}$	N/A	$\sim 0.1125 \text{ Pa.s}$
Coefficient de dilation thermique	$\sim 700 \times 10^{-6}$ /K	$\sim 8.5 \times 10^{-6} / \text{K}$	$\sim 665 \times 10^{-6}$ /K

Tableau II. 2. Propriétés du fluide de base et des nanoparticules Fe_2O_3 .

Propriété	Base (10w40)	Nanoparticule (Fe_2O_3)	Nanofluide (5% Φ)
Densité (ρ)	$\sim 870 \text{ kg/m}^3$	$\sim 5240 \text{ kg/m}^3$	$\sim 1111 \text{ kg/m}^3$
Conductivité thermique (k)	~ 0.145 W/m.K	$\sim 12 \text{ W/m.K}$	~ 0.165 W/m.K
Capacité thermique (cp)	~ 2000 J/kg.K	$\sim 670 \text{ J/kg.K}$	~ 1865 J/kg.K
Viscosité (μ)	$\sim 0.1 \text{ Pa.s}$	N/A	$\sim 0.1125 \text{ Pa.s}$
Coefficient de dilation thermique	$\sim 700 \times 10^{-6}$ /K	$\sim 5.1 \times 10^{-6} / \text{K}$	$\sim 665 \times 10^{-6}$ /K

Tableau II. 3. Propriétés thermophysiques.

	Nano Fluide
Densité	$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p$
Viscosité dynamique	$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}}$
Capacité calorifique	$(C_p)_{nf} = (1 - \phi)(C_p)_f + \phi(C_p)_p$
Coefficient de dilatation	$(\rho\beta)_{nf} = \phi \cdot (\rho\beta)_p + (1 - \phi) \cdot (\rho\beta)_f$
Conductivité	$k_{nf} = k_f \left[\frac{k_p + (n - 1)k_f - (n - 1)(k_f - k_p)\phi}{k_p + (n - 1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \right]$
Conductivité électrique	$\sigma_{nf} = \sigma_f \left[\frac{\sigma_p + 2\sigma_f - 2\phi(\sigma_f - \sigma_p)}{\sigma_p + 2\sigma_f + \phi(\sigma_f - \sigma_p)} \right]$

II.2.3. Équations de transport

La modélisation mathématique des phénomènes de convection repose sur un ensemble d'équations qui lient les paramètres physiques fondamentaux tels que la vitesse, la pression et la température. Ces équations fondamentales découlent des lois suivantes :

- Le principe de préservation de la masse (équation de continuité)
- Le principe de préservation du mouvement (équations de Navier-Stokes)
- Le principe de préservation de l'énergie (équation de l'énergie).

Formes sans dimensions des équations

Il est courant de mener des études expérimentales sur les fluides en utilisant des modèles, avec des résultats présentés sous une forme non dimensionnelle. Cela permet d'échelonner les mesures vers les conditions réelles des flux. On peut également adopter la même méthode dans des recherches numériques. On peut convertir les équations de gouvernance en une forme sans dimensions en utilisant la normalisation adéquate.

En utilisant les variables sans dimension suivantes pour le temps, la longueur, la vitesse, la pression, la température et le potentiel électrique :

$r = r' / R,$ $z = z' / R,$ $\theta = \theta' / \Omega,$ $u = u' / (\Omega R),$	$v = v' / (\Omega R),$ $w = w' / (\Omega R),$ $p = P' / [\rho(\Omega R)^2],$ $\Theta = (T - T_c) / (T_h - T_c)$
--	--

Les équations adimensionnelles gouvernant le système s'écrivent alors :

➤ **Equation de continuité**

Dans le cas d'un écoulement incompressible exprimé en coordonnées cylindriques, l'équation de conservation de la masse (ou équation de continuité) prend la forme suivante :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.1})$$

Cette relation traduit la conservation de la masse à travers l'équation de continuité, formulée dans le système de coordonnées cylindriques (r, θ, z).

Dans ce repère :

- **r** désigne la position radiale,
- **θ** l'angle azimutal,
- **z** la coordonnée selon l'axe longitudinal.

u, w, v : Ce sont les composantes de la vitesse du fluide dans les directions r, θ, et z, respectivement. Plus précisément :

- u : vitesse radiale (dans la direction r),
- w : vitesse azimutale (dans la direction θ),
- v : vitesse axiale (dans la direction z).

Le terme $\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r}$ décrit la variation du flux radial : il prend en compte l'effet de la géométrie cylindrique (le facteur $\frac{1}{r}$ vient de la dérivée en coordonnées cylindriques).

Le terme $\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta}$ représente la variation de la vitesse azimutale.

Le terme $\frac{\partial v}{\partial z}$ correspond à la variation de la vitesse axiale, Ce comportement est attendu pour un fluide s'écoulant le long de l'axe z du cylindre.

➤ **Equation conservation de la quantité de mouvement :**

Dans le système de coordonnées cylindriques (r, θ, z)

• **Equation axial (z)**

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re_f} \left(\frac{\mu_{nf} \rho_f}{\mu_f \rho_{nf}} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \left(\frac{Ra_f}{Pr_f Re_f^2} \right) \left(\frac{(\rho \beta)_{hf}}{\beta_f \rho_{hf}} \right) \theta \quad (\text{II.2})$$

• **Équation radiale (r) :**

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + v \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{w^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re_f} \left(\frac{\mu_{nf} \rho_f}{\mu_f \rho_{nf}} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \quad (\text{II.3})$$

ρ_f : densité du nanofluide

μ_f : viscosité dynamique du nanofluide

σ_f : conductivité électrique du nanofluide

$\vec{u} = (u_r, u_\theta, u_z)$: vecteur vitesse

• **Équation azimutale**

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + v \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{uw}{r} = -\frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{Re_f} \left(\frac{\mu_{nf} \rho_f}{\mu_f \rho_{nf}} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{w}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) \quad (\text{II.4})$$

➤ **Équation de conservation de l'énergie**

$$u \frac{\partial \theta}{\partial r} + u \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial \theta}{\partial \theta} - v \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{Re_f Pr_f} \left(\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \right) + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.5})$$

Le nombre de Reynolds (Re), le nombre de Prandtl (Pr) et le nombre de Rayleigh (Ra) sont des paramètres sans dimension caractérisant le fluide de base. Ils se définissent comme suit :

$$Re_f = \frac{\Omega r_0}{\nu_f}, \quad Pr_f = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Gr_f = \frac{g \beta_f \Delta T L^3}{\nu_f^2} \quad (\text{II.6})$$

II.3. Les conditions aux limites

Les conditions aux limites sont spécifiées de la manière suivante :

Tableau II. 4. Conditions aux Limites.

Surface	Coordonnées	Conditions sur la vitesse	Conditions thermiques (Θ)
Disque supérieur	$z = H/r_0$; $r_i/r_0 \leq r \leq 1$; $0 \leq \theta < 2\pi$	$u = v = w = 0$	$\partial\Theta/\partial z = 0$ (adiabatique)
Disque inférieur	$z = 0$; $r_i/r_0 \leq r \leq 1$; $0 \leq \theta < 2\pi$	$u = v = w = 0$	$\partial\Theta/\partial z = 0$
Paroi interne	$0 \leq z \leq H/r_0$; $r = r_i/r_0$; $0 \leq \theta < 2\pi$	$u = v = 0$, $w = 1$ (extérieur fixe) $w = 1$ (co-rotation) $w = 1$ (contre-rotation)	$\Theta = 0$ (froid, température constante)
Paroi externe (en rotation)	$0 \leq z \leq H/r_0$; $r = 1$; $0 \leq \theta < 2\pi$	$u = v = 0$; $w = 0$ (extérieur fixe); $w = 1$ (co-rotation); $w = -1$ (contre-rotation);	$\Theta = 1$ (chaud, température constante)

II.4 Outils d'analyse de l'écoulement

Suite à la résolution des équations décrivant la convection mixte dans la cavité cylindrique remplie de fluide électriquement conducteur, les six inconnues $u, v, w, P, et \theta$ donnent une vision quantitative du phénomène étudié, mais il en existe d'autres paramètres peuvent donner des solutions plus clarté et de substance, tant sur le plan quantitatif que qualitatif, et faciliter l'analyse du phénomène étudié.

La fonction de courant

Cet outil d'analyse est exclusivement utilisé pour visualiser les lignes de courant hydrodynamique ainsi que les débits associés. Dans le cas d'un écoulement incompressible exprimé en coordonnées cylindriques, la fonction de courant Ψ est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \quad v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \quad (\text{II.7})$$

Dans ce contexte, les courbes définies par $\Psi(r, z) = \text{constante}$ représentent les lignes de courant. Le débit volumique entre deux de ces lignes est donné par la différence des valeurs de Ψ correspondantes.

$$Q_{1 \rightarrow 2} = 2\pi(\Psi_2 - \Psi_1) \quad (\text{II.8})$$

➤ Le nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt, grandeur sans dimension, joue un rôle essentiel dans l'analyse des transferts thermiques par convection au niveau des surfaces. Il est lié à l'inverse de l'épaisseur de la couche limite thermique et peut être défini localement.

$$Nu(r, \theta) = \left| \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=0, z=H} \quad (\text{II.9})$$

Par ailleurs, les profils de transfert thermique et de convection sont obtenus à partir des valeurs moyennes du nombre de Nusselt évaluées sur la surface du disque inférieur :

$$\overline{Nu} = \left(\frac{1}{\pi} \right) \int_0^1 \int_0^{2\pi} Nu(r, \theta) r d\theta dr \quad (\text{II.10})$$

II.4 Conclusions

Ce chapitre a posé les fondements théoriques nécessaires à l'analyse de l'amélioration du transfert de chaleur dans l'huile moteur 10W40 modifiée par l'ajout de nanoparticules d' Al_2O_3 et de Fe_2O_3 . Il a introduit les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, en tenant compte des caractéristiques thermophysiques spécifiques aux

nanofluides. Les conditions aux limites choisies reflètent fidèlement les environnements rencontrés dans les moteurs automobiles. L'ensemble de ces éléments constitue une base solide pour les simulations numériques (CFD) développées dans le chapitre suivant, permettant une évaluation détaillée des performances thermiques des nanofluides dans le contexte automobile.

Chapitre III

Méthode Numérique.

Chapitre III : Méthode Numérique

III.1 Introduction

L'ensemble d'équations qui décrit les phénomènes d'écoulement avec transfert de chaleur est un ensemble d'équations aux dérivées partielles du second ordre fortement couplées. Il n'est pas possible de résoudre ce système analytiquement, il faut donc recourir à la résolution numérique. Nous mentionnons parmi ces techniques :

- La méthode des volumes finis.
- La méthode des différences finis.
- La méthode des éléments finis

Dans le cadre de cette étude, la méthode des volumes finis a été retenue pour la discrétisation des équations du modèle mathématique. Cette approche présente l'avantage notable de respecter rigoureusement le bilan intégral de la variable dépendante ϕ sur chaque volume de contrôle, et par conséquent sur l'ensemble du domaine. Elle se distingue également par sa capacité à s'adapter à tout type de maillage, y compris ceux associés à des géométries complexes. En outre, la méthode des volumes finis est reconnue pour sa simplicité de mise en œuvre et pour le fait que chacun de ses termes conserve une signification physique claire, ce qui en fait un choix pertinent pour notre modélisation.

III.2 Définition de la CFD

La CFD, ou Computational Fluid Dynamics, désigne en français la mécanique des fluides numérique (MFN). Elle consiste à analyser les mouvements d'un fluide ou leurs effets en résolvant numériquement les équations qui régissent son comportement. Selon le niveau de précision souhaité et les ressources de calcul disponibles, différentes équations peuvent être utilisées, telles que les équations d'Euler, les équations de Navier-Stokes ou encore l'équation d'énergie. Avec les progrès récents en matière de puissance de calcul, il est désormais possible de simuler des phénomènes fluidiques complexes tout en réduisant les temps de calcul. La CFD est ainsi devenue un outil essentiel pour les ingénieurs, que ce soit pour la conception, l'optimisation, le développement de systèmes innovants ou encore pour l'analyse physique de phénomènes complexes mettant en jeu des écoulements de fluides.

Ces dernières années, la CFD a trouvé des applications dans de nombreux domaines, parmi lesquels :

- Le calcul du refroidissement des cœurs de réacteurs nucléaires ;
- L'étude de l'aérodynamique ;
- L'évaluation des pertes de charge, linéaires ou singulières ;
- Le refroidissement des composants électroniques ;
- L'analyse des écoulements subsoniques, soniques ou supersoniques.

III.3 Présentation de logiciel ANSYS-Fluent

ANSYS Fluent est un logiciel de simulation numérique spécialisé dans la mécanique des fluides (CFD - Computational Fluid Dynamics). Il permet de modéliser et d'analyser des écoulements de fluides, le transfert de chaleur, les réactions chimiques, ainsi que les phénomènes liés à la turbulence, la combustion ou encore les écoulements multiphasiques.

Basé sur la méthode des volumes finis, ANSYS Fluent résout les équations de Navier-Stokes ainsi que d'autres équations de transport pour prédire le comportement des fluides dans des conditions variées. Il offre une interface conviviale, de nombreux modèles physiques intégrés, et permet de traiter aussi bien des géométries simples que complexes.

Ce logiciel est largement utilisé dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, de l'énergie, de l'environnement, ou encore dans les systèmes de refroidissement.

III.4 Principe de la méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis constitue une approche conservatrice de discrétisation, permettant de convertir les équations aux dérivées partielles issues des lois de conservation en un système d'équations algébriques résolubles numériquement, comme le décrit **Patankar [61]**. Elle garantit un bilan rigoureux des grandeurs physiques telles que l'énergie, la masse et la quantité de mouvement au sein de chaque volume de contrôle. De plus, cette méthode facilite le traitement des termes non linéaires, notamment à travers une linéarisation efficace des termes sources.

Cette méthode comprend trois étapes importantes :

- Le maillage : qui consiste à diviser le domaine de calcul en plusieurs intervalles réguliers appelés volumes de contrôle.
- La discrétisation : cette phase correspond à la conversion des équations de mouvement en un système d'équations algébriques, en les appliquant sur chaque volume de contrôle. Elle permet ainsi d'approcher les dérivées partielles par des expressions discrètes compatibles avec une résolution numérique.

- La résolution du système d'équations algébriques linéaires sur l'ensemble du domaine de calcul : cette étape vise à déterminer les valeurs approchées des variables recherchées en résolvant numériquement le système issu de la discrétisation.

III.5 Maillage

Le domaine de calcul, correspondant à l'espace annulaire, est discrétisé selon les directions (r, θ, z) n un maillage composé de volumes de contrôle élémentaires, définis par $\Delta V = r \Delta r \Delta \theta \Delta z$ La **figure III.1** présente un exemple représentatif d'un volume de contrôle dans un système tridimensionnel exprimé en coordonnées cylindriques (r, θ, z) .

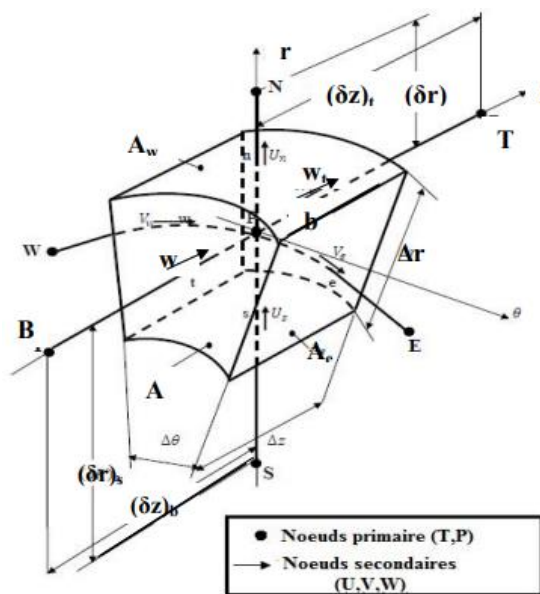


Figure III. 1. Volume de contrôle principal tridimensionnel

Le maillage adopté est du type décalé, proposé par **Patankar et Spalding [61]**. Le centre d'un volume fini typique est un point P, et les centres de ses faces latérales est, ouest, nord, sud, front et arrière sont les points respectivement e, w, n, s, t et b. Chaque volume de contrôle est entouré de six volumes voisins, situés respectivement aux positions Est (E), Ouest (W), Nord (N), Sud (S), Haut (T) et Bas (B). Les grandeurs scalaires telles que la pression P et la température T sont stockées aux centres de ces volumes. En revanche, les composantes de la vitesse u, v et w sont positionnées au centre des faces latérales du volume de contrôle, conformément à la méthode du maillage décalé (staggered grid). Les figures **III.2**, **III.3** et **III.4** illustrent cette configuration dans le cas tridimensionnel.

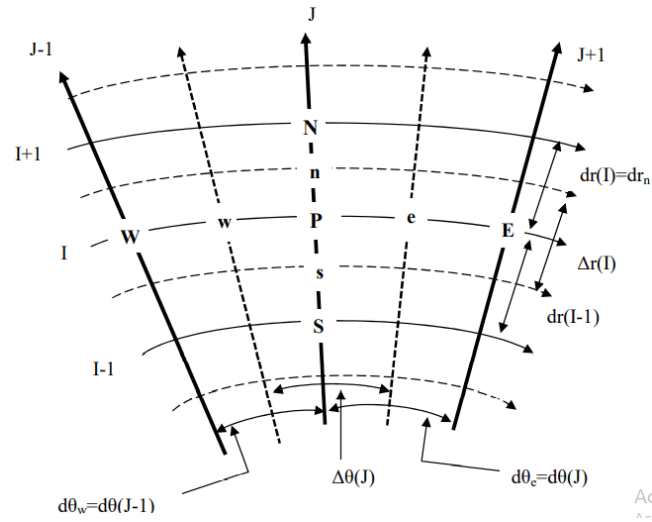


Figure III. 2. Projection du volume fini dans le plan (r, θ)

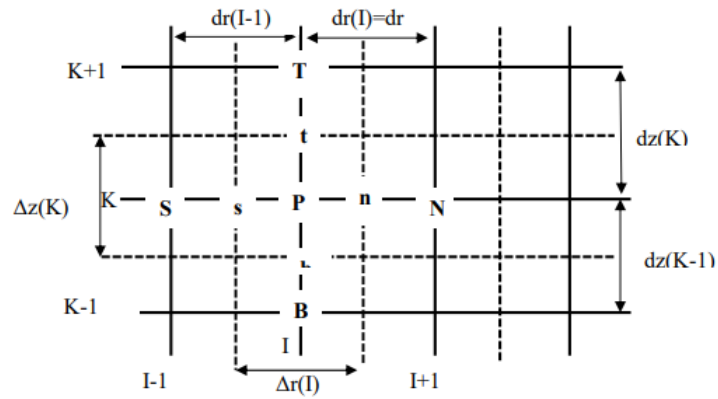


Figure III. 3. Projection du volume fini dans le plan (r, z)

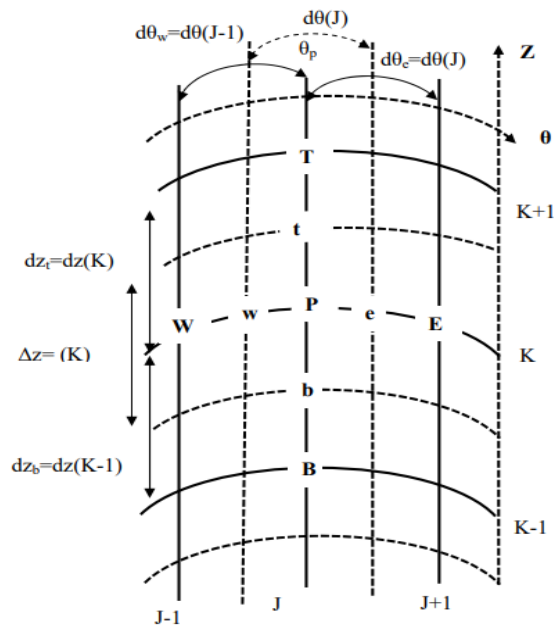


Figure III. 4. Projection du volume fini dans le plan (r, θ)

Elle a été réalisée pour le cas le plus exigeant en termes de calcul ($A = 1$, $R = 0,4$). Trois résolutions de maillage ont été comparées : un maillage grossier ($35 \times 110 \times 40$ nœuds dans les directions radiale, azimutale et axiale), un maillage intermédiaire ($45 \times 110 \times 50$) et un maillage plus fin ($55 \times 110 \times 60$). Les principaux critères de validation comprenaient la vitesse axiale adimensionnelle (v) à mi-hauteur ($Z = 1/2$) et le nombre de Nusselt local (Nu) sur la paroi intérieure (Figure III.6). Les résultats ont montré un écart inférieur à 3 % entre les maillages grossier et fin, validant ainsi l'efficacité du maillage le plus grossier en termes de calcul. Pour optimiser la précision, un étirement géométrique (croissance de 5 à 10 %) a été appliqué près des parois, tandis que le nombre de nœuds dans la direction azimutale ($N\theta = 110$) a été maintenu constant afin de préserver les effets tridimensionnels de l'écoulement. Cette stratégie a permis d'atteindre une erreur inférieure à 3 % sur Nu tout en améliorant significativement l'efficacité numérique (voir **Figure III.5**).

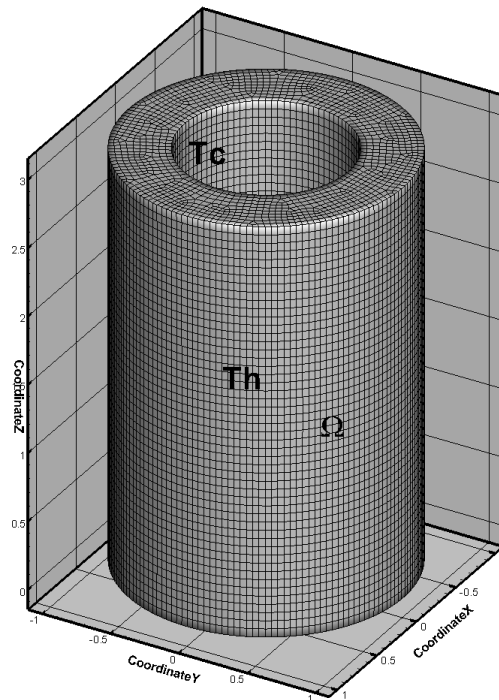


Figure III. 5. Maillage

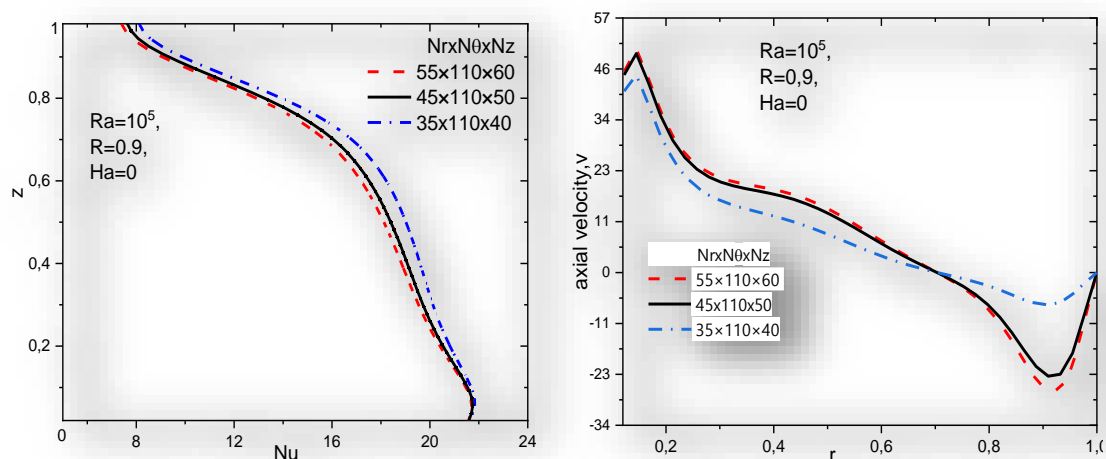


Figure III. 6. Profiles de nombre de Nusselt et vitesse axiale pour diffrente grille ($A = 1$, $r = 0.4$ and $Ra = 10^5$).

III.6 Résolution des équations algébriques

III.6.1 Introduction

Lors de la discrétisation des équations de Navier-Stokes, deux principaux obstacles se présentent. Le premier est lié à la non-linéarité du terme de convection, tandis que le second réside dans la présence du gradient de pression dans les équations de quantité de mouvement, sans qu'il n'existe d'équation explicite de transport pour cette dernière. La non-linéarité est généralement traitée par des méthodes itératives, et il est important d'opter pour un schéma numérique stable afin d'assurer la convergence de la solution. Pour surmonter ces deux difficultés et résoudre les systèmes d'équations algébriques issus de la méthode des volumes finis, on a recours à l'algorithme **SIMPLER**, proposé par **Patankar** [61]. Cet algorithme permet de déterminer les coefficients intervenant dans les équations discrètes. La résolution finale de ces systèmes est ensuite assurée par la méthode **TDMA**, également introduite par **Patankar**, qui est bien adaptée à ce type de structure matricielle.

III.6.2 Algorithme SIMPLER

Les champs de vitesse et de pression peuvent théoriquement être déterminés en résolvant simultanément les équations de quantité de mouvement et de continuité. Une problématique se pose toutefois : si les vitesses sont calculées à partir des équations de quantité de mouvement, comment en déduire la pression en s'appuyant sur l'équation de continuité, qui ne contient pas explicitement cette grandeur ? Pour résoudre cette difficulté, l'algorithme **SIMPLER** (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Revised*) constitue une méthode itérative efficace. Il permet de coupler la pression et la vitesse de manière cohérente. Une fois la solution

convergée, les champs obtenus vérifient simultanément les équations de conservation de la quantité de mouvement et de la masse.

Séquences de l'algorithme SIMPLER

- . Les principales étapes de son déroulement sont les suivantes :
- **Initialisation** : proposer une estimation initiale du champ de vitesses.
- **Équation de quantité de mouvement** : à partir de ce champ, calculer les coefficients associés aux équations de quantité de mouvement, puis en déduire les pseudo-vitesses u, v, w .
- **Équation de pression** : déterminer les coefficients de l'équation de, puis la résoudre afin d'obtenir une première estimation du champ de pression.
- **Résolution préliminaire des vitesses** : en considérant le champ de pression obtenu comme une approximation notée P^* , résoudre les équations de quantité de mouvement pour obtenir les vitesses intermédiaires u^*, v^*, w^* .
- **Équation de correction de pression** : calculer le terme source b_m , puis résoudre l'équation de correction pour la pression notée \hat{P} .
- **Correction des vitesses** : appliquer les corrections aux composantes de la, tout en conservant inchangée la pression.
- **Résolution des équations couplées** :
 - ✓ Résoudre l'équation de *swirl* pour mettre à jour la composante w
 - ✓ Résoudre l'équation d'énergie pour obtenir le champ de température Θ
 - ✓ Résoudre l'équation du potentiel électrique Φ en utilisant la dernière valeur de w calculée.
- **Itération** : reprendre le processus à partir de l'étape 2 avec le nouveau champ de vitesses jusqu'à atteindre la convergence souhaitée.

Algorithme TDMA :

Pour traiter le système algébrique tridimensionnel issu de la discrétisation, une méthode de double balayage est appliquée. Cette technique consiste à résoudre, ligne par ligne, la variable ϕ dans le domaine de calcul, indépendamment des autres lignes. Cela permet de ramener le problème tridimensionnel à une série de systèmes unidimensionnels.

Dans ce contexte, les contributions provenant des deux autres directions spatiales sont considérées comme des termes sources, et elles sont intégrées dans le second membre de l'équation dans la direction actuellement résolue. Chaque ligne ainsi isolée conduit à un système

tridiagonal, qui peut être résolu efficacement à l'aide de l'algorithme **TDMA** (TriDiagonal Matrix Algorithm), également appelé algorithme de Thomas, tel que proposé par **Patankar [63]**.

Cette méthode présente l'avantage de résoudre N systèmes à N inconnues sans manipulation directe de matrices complètes, limitant ainsi les besoins en mémoire à deux tableaux unidimensionnels.

III.7. Paramètres numériques utilisés dans cette étude

Le logiciel FLUENT repose sur la méthode des volumes finis pour discrétiser et résoudre les équations fondamentales de l'écoulement, notamment l'équation de continuité, les équations de quantité de mouvement et celle de l'énergie. Cette approche consiste à intégrer les équations différentielles sur des volumes de contrôle délimités autour de chaque nœud du maillage.

FLUENT propose une interface graphique intuitive facilitant la mise en œuvre des simulations. De plus, les utilisateurs expérimentés peuvent adapter ou automatiser certaines opérations en développant des macros ou des fonctions personnalisées, permettant ainsi de répondre à des besoins spécifiques. Les schémas de discrétisation adoptés pour les différentes grandeurs physiques sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau III. 1. Schéma de discrétisations.

Grandeur physique	Schéma utilisé
Pression (P)	PRESTO (pressure starggering option)
Equation de quantité de mouvement	Décente amont d'ordre 2 (seconde order upwind)
Equation de l'Energie	Décente amont d'ordre 2
Couplage pression vitesse	Algorithm SIMPLER (semi-implicit methode for pressure linked equation revised)

Sous relaxation

Dans le cadre de notre étude, les coefficients de sous-relaxation adoptés sont présentés dans le tableau ci-après. L'utilisation de ces coefficients est une technique courante dans la résolution de systèmes non linéaires, permettant de stabiliser le processus itératif. Le principe repose sur l'atténuation des variations des variables d'une itération à l'autre, en les ajustant progressivement à l'aide d'un facteur de sous-relaxation.

Tableau III. 2. Sous relaxation.

Variable	Facteur de sous- relaxation
Pression	0.3
Quantité de mouvement	0.7
Densité	1.0
Energie	1.0

• Critères de convergence :

La convergence d'un algorithme numérique est atteinte lorsque l'erreur entre deux itérations successives décroît progressivement jusqu'à devenir négligeable, selon un seuil de tolérance fixé. Une procédure est donc dite convergente lorsque les mises à jour des variables d'une itération à l'autre deviennent insignifiantes, conformément à un critère spécifié par l'utilisateur. Dans le cadre de notre étude, ce critère de convergence a été fixé à un résidu normalisé inférieur ou égal à 10^{-6} .

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière synthétique la méthode des volumes finis, ainsi que les différents paramètres numériques adoptés dans le cadre de cette étude. Le chapitre suivant sera consacré à l'analyse des résultats obtenus à l'aide du logiciel FLUENT.

Chapitre IV

Résultats et discussion

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une étude numérique approfondie portant sur l'écoulement de nanofluides hybrides dans une configuration de type Taylor-Couette en rotation. Le système étudié est constitué de deux cylindres coaxiaux séparés par un espace annulaire étroit ($R = 0,4$), une géométrie fréquemment rencontrée dans des applications industrielles telles que les roulements, les moteurs électriques ou les échangeurs thermiques. Les lubrifiants traditionnels comme l'huile moteur 10W40, bien qu'efficaces pour minimiser le frottement et l'usure mécanique, présentent généralement une faible conductivité thermique, ce qui limite leur capacité de refroidissement dans des environnements fortement sollicités. Pour remédier à cette limitation, on a étudié l'amélioration de l'huile de base grâce à l'incorporation de nanoparticules à conductivité élevée. Plus précisément, des nanoparticules d'alumine (Al_2O_3) et d'hématite (Fe_2O_3) sont dispersées individuellement dans l'huile 10W40 afin de formuler deux nanofluides distincts (voir **Tableaux IV.1 et IV.2**). Ces nanoparticules sont choisies pour leur excellente conductivité thermique.

Le but fondamental de cette recherche est d'analyser l'influence de la composition du nanofluide, du mode de rotation et des dimensions géométriques sur le comportement de l'écoulement et l'efficacité thermique dans un espace annulaire. Trois paramètres clés sont pris en compte car ils influencent fortement le comportement hydrodynamique et thermique des nanofluides dans un système Taylor-Couette en rotation. Premièrement, le mode de rotation des cylindres est varié selon trois configurations : la co-rotation ($s = 1$), où les deux cylindres tournent dans le même sens ; la contre-rotation ($s = -1$), où les parois tournent en sens opposé ; et la rotation intérieure seule ($s = 0$), où le cylindre extérieur est en mouvement tandis que le cylindre intérieur reste fixe. Ici, "s" désigne le rapport entre la vitesse angulaire du cylindre extérieur et celle du cylindre intérieur. Deuxièmement, la configuration géométrique est caractérisée par le rapport d'aspect $A = H/r_o$, où H est la hauteur axiale des cylindres et r_o représente le rayon de référence, typiquement celui du cylindre extérieur.

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel ANSYS fluent. Les équations de continuité, conservation de quantité de mouvement (Navier-Stokes) et l'équation de conservation de l'énergie ont été résolues par la méthode des volumes finis (FVM), une approche robuste pour modéliser les écoulements rotatifs complexes. Les résultats sont analysés à travers : le champ de vitesses (composantes azimutale w , axiale v , et radiale u), la répartition adimensionnelle de la température (Θ), les nombres de Nusselt locaux et moyens (Nu)

caractérisant le transfert de chaleur par convection, ainsi que le coefficient de frottement pariétal (C_f) en tant que mesure de la résistance à l'écoulement.

IV.2 Validation

Une comparaison a été effectuée avec les résultats numériques rapportés par **Alsaedi et al. [62]**, comme illustré à la **Figure. IV.2**. On étudie ici comment la proportion volumique de nanoparticules ($\phi = 0,01$ et $0,04$) agit sur le coefficient de frottement pariétal (C_f) pour un nanofluid hybride composé de nanoparticules d'oxyde de graphène (GO) et de cuivre (Cu), dispersées dans une huile de kérosène, s'écoulant entre deux cylindres coaxiaux. Les résultats montrent que le coefficient C_f augmente avec la fraction volumique. Une concordance étroite est observée entre les résultats obtenus dans la présente étude et ceux de **Alsaedi et al.**, avec un écart maximal inférieur à 1 %, ce qui est considéré comme négligeable dans le cadre de simulations numériques.

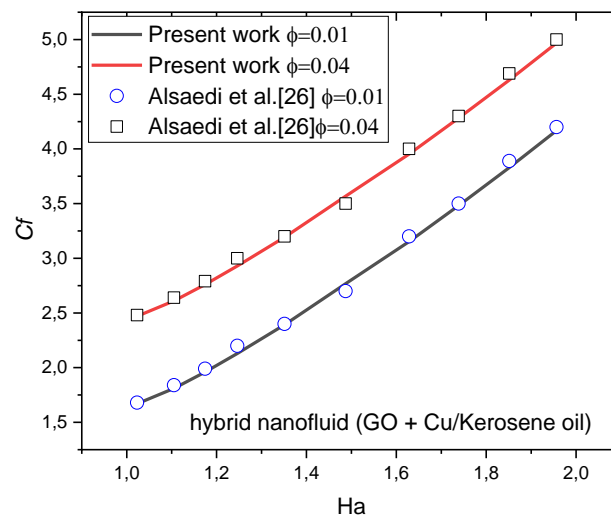


Figure IV. 1. Comparaison avec (a) le résultat numérique de Alsaedi et al. [62], montrant l'effet de ϕ sur C_f .

IV.3 Effet de la rotation et du rapport d'aspect

La fraction volumique de nanoparticules influence directement sur la structure de l'écoulement et, dès lors, sur le transfert thermique. En co-rotation, la force centrifuge stabilise les vortex de Taylor, modifiant les profils de vitesse azimutale et conduisant à des distributions de température plus homogènes, tandis qu'en contre-rotation, l'accentuation des couches de cisaillement stimule le brassage radial, ce qui renforce notablement le transfert convectif de chaleur. Le rapport d'aspect module la taille et le nombre de cellules de Taylor, les valeurs intermédiaires (par exemple, $A=1$, 1.5 , 2 , 2.5 et 3) offrant des performances optimales.

La **Figure (IV.1)** présente les contours des vitesses axiale, radiale et azimutale pour $A=0.5$ à 3, respectivement. Les vortex influencent fortement la vitesse azimutale.

Le système de Taylor-Couette est une configuration classique en dynamique des fluides utilisée pour étudier la stabilité hydrodynamique, la formation de structures et la transition vers la turbulence. Ce système repose sur un fluide enfermé entre deux cylindres concentriques, le plus souvent avec le cylindre intérieur en rotation et le cylindre extérieur immobile, bien que plusieurs variantes puissent être envisagées. Lorsque la vitesse de rotation dépasse une valeur critique, l'écoulement laminaire initial de type Couette devient instable, formant des vortex toroïdaux axisymétriques appelés vortex de Taylor (ou cellules de Taylor). Cette transition correspond à l'émergence de l'instabilité de Taylor–Couette.

Rôle du rapport d'aspect (A)

Le paramètre A , dit rapport d'aspect, se calcule en divisant la hauteur du montage par l'écartement R entre les cylindres. Il conditionne de façon déterminante la taille, le nombre et l'agencement des tourbillons de Taylor :

- **Taille des vortex (longueur d'onde λ) :**

Près du seuil d'instabilité, la longueur d'onde axiale intrinsèque λ d'une paire de vortex (montée + descente) est approximativement égale à deux fois la largeur de la fente, soit $\lambda \approx 2d$. Cette longueur d'onde est principalement déterminée par l'écartement d et le taux de rotation (quantifié par le nombre de Taylor, Ta), et non directement par A .

Point clé : Le rapport d'aspect A ne modifie pas directement λ , mais détermine combien de vortex peuvent s'inscrire dans le système.

- **Nombre de vortex (N) :**

Le nombre total de paires de vortex formées le long de l'axe est limité par la hauteur H du domaine axial : $N \approx H \times \lambda \approx 2A$

Étant donné que $\lambda \approx 2d$, cela revient à : $N \approx 2A$

- ❖ Petit A (par ex. $A < 10$) : Peu de vortex se forment (ex. $A = 10 \rightarrow$ environ 5 paires). Les effets de bord dominant, pouvant déformer les vortex aux extrémités.
- ❖ A modérer (par ex. $A = 20-50$) : Un nombre entier bien défini de vortex se forme (ex. $A = 40 \rightarrow$ environ 20 paires). L'écoulement présente une structure régulière et périodique de vortex de Taylor.
- ❖ Grand A (par ex. $A > 100$) : De nombreux vortex se forment (ex. $A = 100 \rightarrow$ environ 50 paires). Le système tend vers un comportement de rapport d'aspect infini dans la zone centrale, réduisant les effets de bord. Des états ondulés ou turbulents deviennent plus accessibles à des Ta élevés.

Modulation par A et imperfections

- Contrainte entière : Le nombre de vortex N doit être un entier. Si $A/2$ n'est pas un entier, le système ne peut pas contenir un nombre entier parfait de vortex de longueur d'onde $\lambda \approx 2d$, ce qui entraîne :
 - Compression/étirement : Les vortex près des extrémités ajustent leur taille.
 - Défauts : Un vortex partiel ou une distorsion localisée peut apparaître.
 - Ajustement de la longueur d'onde : La longueur d'onde moyenne peut légèrement dévier de $2d$ pour accommoder un N entier.
- Conditions aux limites : Des plaques rigides aux extrémités ancrent fortement l'écoulement, fixant la direction du flux radial en haut et en bas. Cela "verrouille" les vortex aux extrémités, rendant la contrainte entière et les effets de bord significatifs. Des conditions aux limites de type "sans contrainte" auraient un impact moindre.

Tableau IV. 1. Caractéristique pour différents rapports d'aspect A .

Rapport d'aspect (A)	Longueur d'onde de vortex	Le nombre de vortex N	Caractéristiques de l'écoulement
Petit ($A < 10$)	$\sim 2d$	2-5	Dominé par les effets de bord, vortex de bout déformés
Modéré (20-50)	$\sim 2d$	10-25	Écoulement régulier en vortex de Taylor, distorsion en bout minimale
Grand ($A > 100$)	$\sim 2d$ (Noyau)	> 50	Nombreux vortex ; l'écoulement central \approx comportement pour A infini

IV.4. Importance du rapport d'aspect dans le système de Taylor-Couette

Le rapport d'aspect A , défini comme le rapport entre la hauteur du domaine d'écoulement H et la largeur de l'entrefer d ($A = H/d$), représente un paramètre géométrique fondamental qui influence directement la formation, la quantité et la stabilité des tourbillons dans un écoulement de type Taylor–Couette. Ce paramètre influe directement sur plusieurs aspects dynamiques :

- Le nombre total de structures cohérentes observables,
- L'influence des conditions aux limites, plus marquée pour les faibles valeurs de A ,
- La régularité des motifs formés (en lien avec le caractère entier ou non de $A/2$), et

- La transition vers des régimes plus complexes (vortex ondulés, turbulence), favorisée dans les systèmes à grand A .

L'analyse de la **Figure IV.1**, pour un cas avec cylindre extérieur fixe, cylindre intérieur en rotation ($Re = 400$, $Ra = 10^5$, fluide : huile 10W40), met en évidence l'effet du rapport d'aspect sur la dynamique des vortex. Pour $A = 0,5$, la faible hauteur ne permet pas l'établissement d'un tourbillon complet, induisant une cellule déformée et une circulation faiblement asymétrique. À $A = 1$, un couple de vortex comprimé apparaît, avec des effets de bord importants. L'augmentation à $A = 1,5$ favorise la formation de deux paires de vortex comprimées, caractérisées par une modulation périodique de la vitesse azimutale. À $A = 2$, les cellules deviennent symétriques et bien formées, avec une longueur d'onde $\lambda \approx 2d$, correspondant à la valeur théorique. Pour $A = 2,5$ et $A = 3$, on observe respectivement trois et quatre paires de vortex, avec une bonne régularité au centre du domaine et des distorsions en bordure. L'effet de la flottabilité ($Ra = 10^5$) se superpose à l'effet de rotation, modifiant les champs de vitesse azimutale et engendrant des perturbations radiales visibles dès $A \geq 1,5$. Toutefois, pour $A \geq 2,5$, l'effet thermique devient marginal, la rotation dominant l'écoulement central. Le contrôle du nombre de vortex par le rapport d'aspect s'explique par une contrainte géométrique : la longueur axiale disponible est $A \cdot d$, alors que la longueur d'onde intrinsèque des vortex est $\lambda \approx 2d$, impliquant que le nombre total de vortex est approximativement $N \approx A \cdot 2$. Ces résultats sont résumés dans le **tableau IV.3**.

Tableau IV. 2. Total de vortex.

A	N (paires attendues)	Paires de vortex réelles	Nombre total de cellules	Adaptation
1	0,5	1	2	Compression ($\lambda < 2d$)
1,5	0,75	2	4	Compression
2	1.0	2	4	Ajustement parfait ($\lambda \approx 2d$)
2,5	1,25	3	6	Étirement ($\lambda > 2d$)
3	1,5	4	8	Résonance harmonique

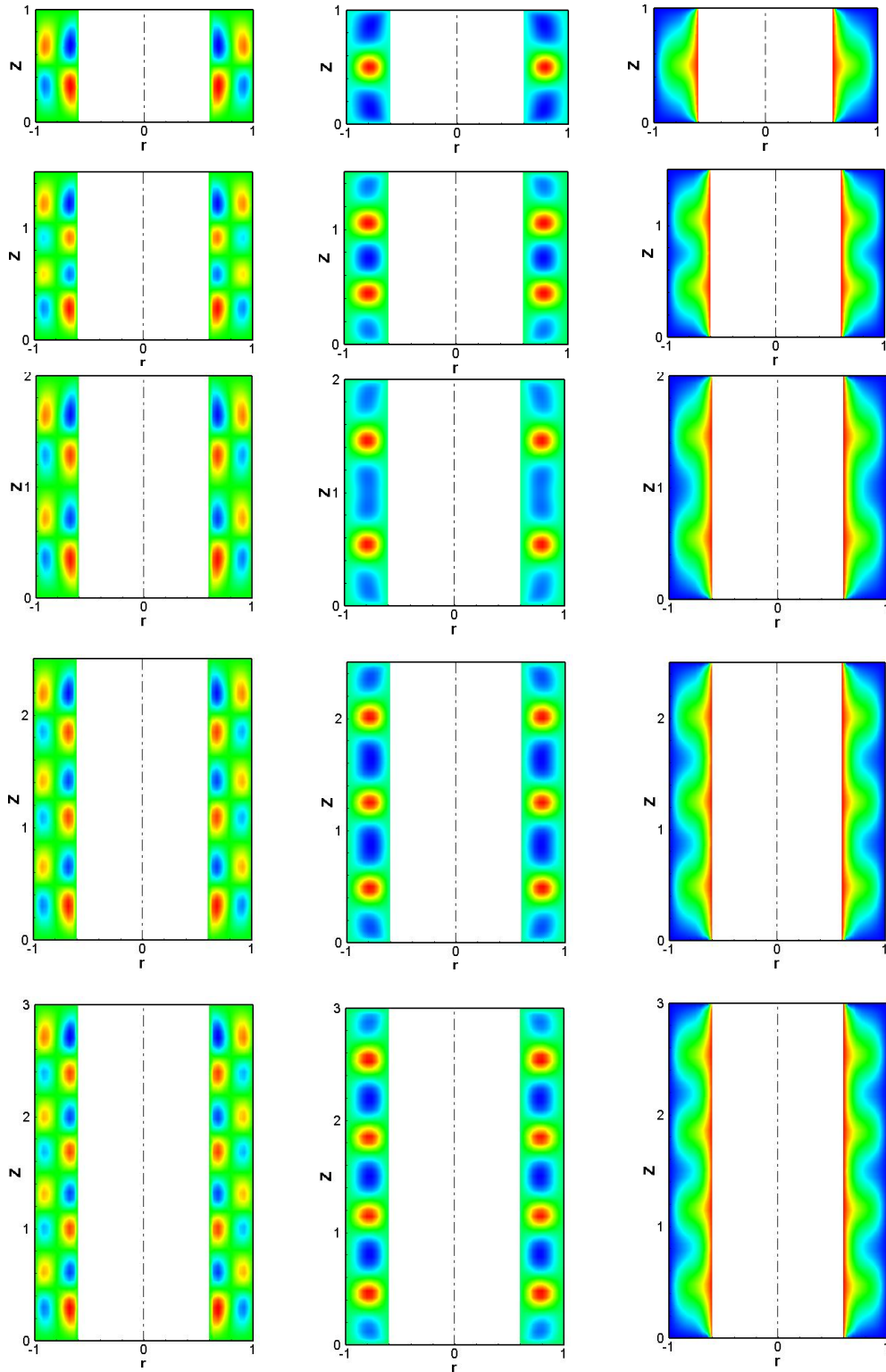


Figure IV. 2. Contours des vitesses axiale, radiale et azimutale pour $A=1$; 1.5 ; 2 ; 2.5 et 3 .

La **figure. IV.3** caractérise les structures des vortex de Taylor à partir des profils des vitesses axiale, radiale et azimutale pour un rapport d'aspect $A=3$ sous trois modes de rotation. En co-rotation ($S=1$), les vitesses présentent une symétrie et une intensité maximales : la vitesse axiale atteint $v=\pm 0,1$ et la vitesse radiale varie de $u=-0,098$, soit le double des valeurs obtenues pour $S=0$. La vitesse azimutale atteint des pics de $w_\theta=0$ à $0,99$, traduisant la présence de vortex robustes et bien organisés, amplifiés par la rotation alignée des cylindres.

À l'inverse, la contre-rotation ($S=-1$) supprime la cohérence des vortex, avec une vitesse axiale minimale ($v=\pm 0,034$), un écoulement radial faible ($u=-0,033$ à $0,013$) et des vitesses azimutales opposées ($w=-0,95$ à $0,590$), reflétant une dissipation dominée par le cisaillement qui entrave la formation des vortex.

Pour une paroi extérieure fixe ($S=0$), on observe des vitesses axiales modérées ($v_z=\pm 0,075$) et des vitesses radiales asymétriques ($u=-0,059$ à $0,089$), révélant des vortex perturbés dus à l'instabilité de cisaillement induite par la paroi immobile, bien que le flux azimutal soit unidirectionnel ($w=0$ à $0,59$).

Ces dynamiques expliquent directement les tendances thermo-mécaniques observées : les vortex puissants en $S=1$ favorisent le transfert thermique (par exemple, un nombre de Nusselt élevé dans la Fig. IV.9), tandis que l'opposition des moments en $S=-1$ maximise la contrainte de cisaillement (fort coefficient de frottement C_f), et les perturbations aux limites en $S=0$ dégradent à la fois la cohérence de l'écoulement et son efficacité thermique.

Figure IV.4 présente les profils des vitesses axiale, radiale et azimutale extraits aux positions radiales $r=0,69$ et $r=0,92$ dans le domaine annulaire pour $S=0$ (paroi extérieure fixe). À mesure que le rapport d'aspect A augmenté, l'écoulement montre une modulation plus marquée, traduisant une structuration plus prononcée des cellules de Taylor.

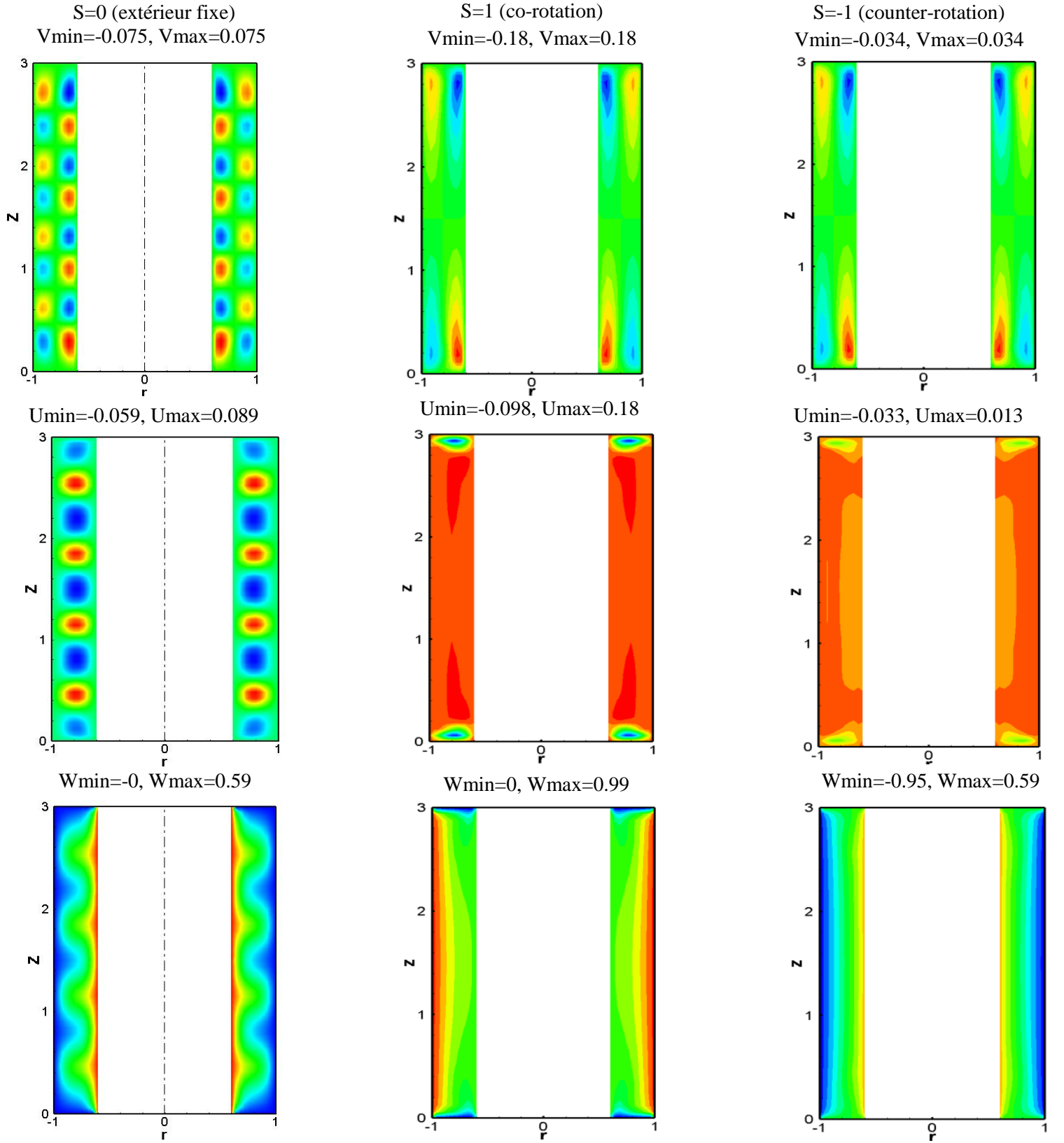


Figure IV. 3. Contours des vitesses axiale, radiale et azimuthale pour $S=0$, $S=1$ et $S=-1$ lorsque $A=3$.

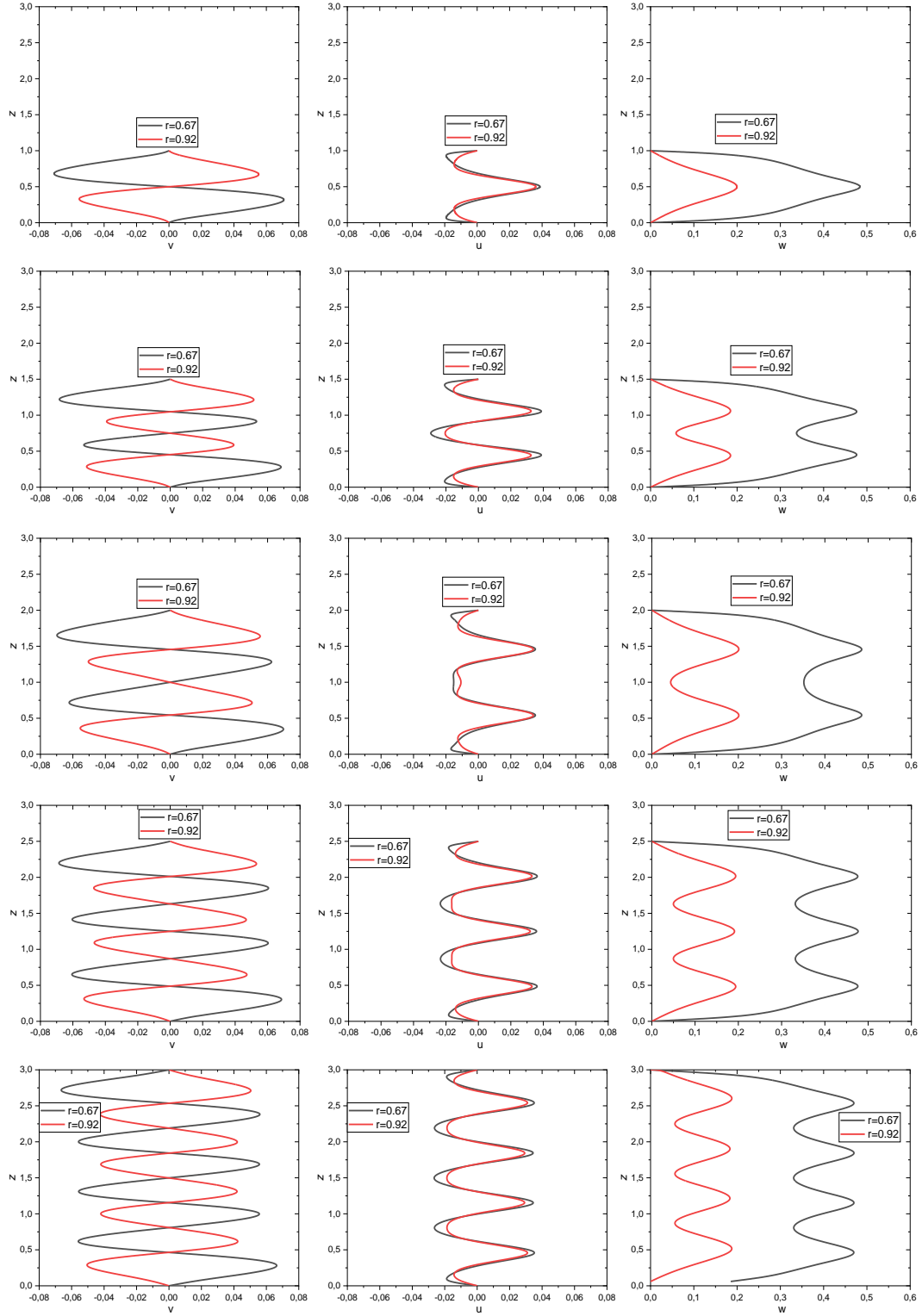


Figure IV. 4. Profil des vitesses axiale, radiale et azimutale pour $A = 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5$ et 3.

IV.3 Amélioration du transfert de chaleur et contrainte de cisaillement

L'examen du coefficient de frottement pariétal (C_f) ainsi que du nombre de Nusselt (Nu) à la paroi interne révèle un comportement oscillatoire distinct le long de la hauteur axiale (z) pour tous les fluides testés (10w40 pure, $Al_2O_3/10w40$, $Fe_2O_3/10w40$) dans le cas de $A = 3$. Ces oscillations sont fondamentalement déterminées par la dynamique des tourbillons de Taylor, responsable de variations périodiques de la contrainte de cisaillement dans la direction radiale (atteignant un pic à l'impact de l'écoulement sur la paroi) et du transfert de chaleur (maximal aux limites ascendantes/descendantes du tourbillon). Il est crucial de noter que les nanofluides améliorent significativement ces deux paramètres par rapport à l'huile de base. $Fe_2O_3/10w40$ présente des performances supérieures à celles de l' $Al_2O_3/10w40$, entraînant des hausses estimées de 15 à 30 % pour Nu et de 10 à 25 % pour C_f . Cette amélioration s'explique par la conductivité thermique élevée du Fe_2O_3 , qui favorise le transfert de chaleur par convection, ainsi que par la capacité des nanoparticules à perturber les couches limites thermiques et hydrodynamiques, renforçant ainsi les échanges thermiques. Les profils présentent une symétrie spatiale à mi-hauteur ($z = 0,65$), confirmant la distribution bien organisée des tourbillons au-dessus et en dessous de ce plan. Les valeurs maximales pour C_f et Nu se situent systématiquement autour de $z = 0,13$, correspondant aux zones d'impact tourbillonnaire (fort cisaillement) et aux régions de fort mélange thermique aux interfaces tourbillonnaires. Alors que l'huile pure présente des oscillations de faible amplitude, signe d'un écoulement laminaire, le nanofluide Al_2O_3 offre une amélioration modérée, principalement via sa conductivité thermique, tandis que le nanofluide Fe_2O_3 atteint les performances les plus élevées grâce à la synergie des mécanismes d'amélioration thermique et de quantité de mouvement.

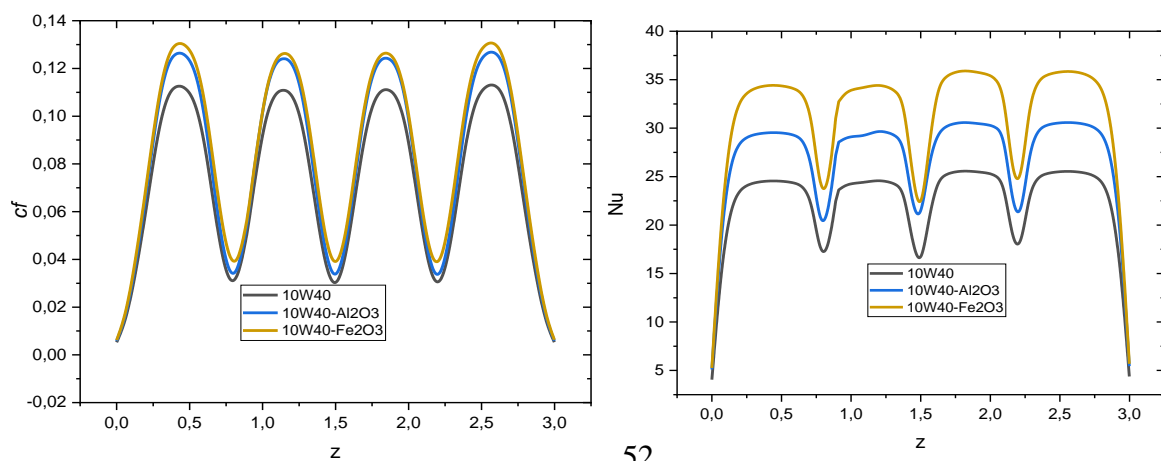


Figure IV. 5. (a) Frottement et (b) nombre de Nusselt à la paroi interne ($\theta=0.$) pour $S=0$

IV.4. Évaluation comparative co-rotation et contre-rotation

Les figures IV.6 et IV.7 présentent une comparaison du coefficient de frottement cutané (C_f) et du nombre de Nusselt local (Nu) au niveau de la paroi interne ($\theta = 0$) pour la co-rotation ($S = 1$) et la contre-rotation ($S = -1$). En co-rotation (figure IV.6), le profil de frottement cutané présente une symétrie hyperbolique autour de $z = 1,5$ (rapport d'aspect $A = 3$), le nanofluid 10W40 / Fe_2O_3 présentant systématiquement un C_f plus élevé que le fluide de base. Le profil du nombre de Nusselt présente également une symétrie, mais est légèrement décalé vers des valeurs z positives en raison des effets d'écoulement de type Boussinesq sur la distribution thermique. Ici, le 10W40/ Fe_2O_3 atteint un pic $Nu = 35,02$, soulignant ses performances thermiques supérieures. Pour la contre-rotation (Figure IV.7), des profils analogues de C_f et Nu sont présentés, bien que les caractéristiques de symétrie et les schémas d'amélioration diffèrent de la co-rotation en raison de la modification de la dynamique tourbillonnaire sous rotation inverse. Dans les deux configurations, le nanofluid à base de Fe_2O_3 surpasse le fluide de base et le nanofluid d' Al_2O_3 , en raison de sa conductivité thermique plus élevée.

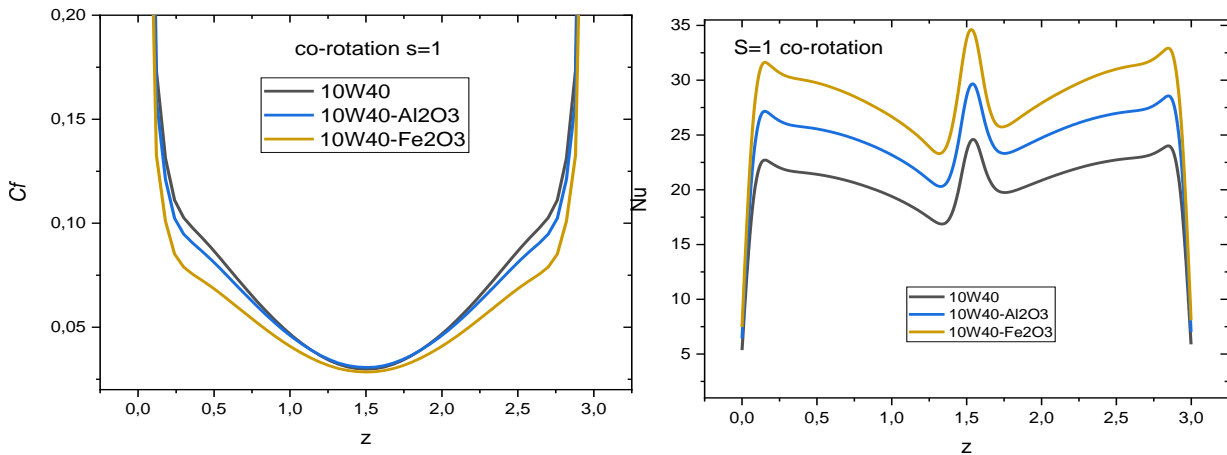


Figure IV. 6. (a) Frottement cutané et (b) nombre de Nusselt local à la paroi interne ($\theta=0.$) pour $S=1$ (co-rotation).

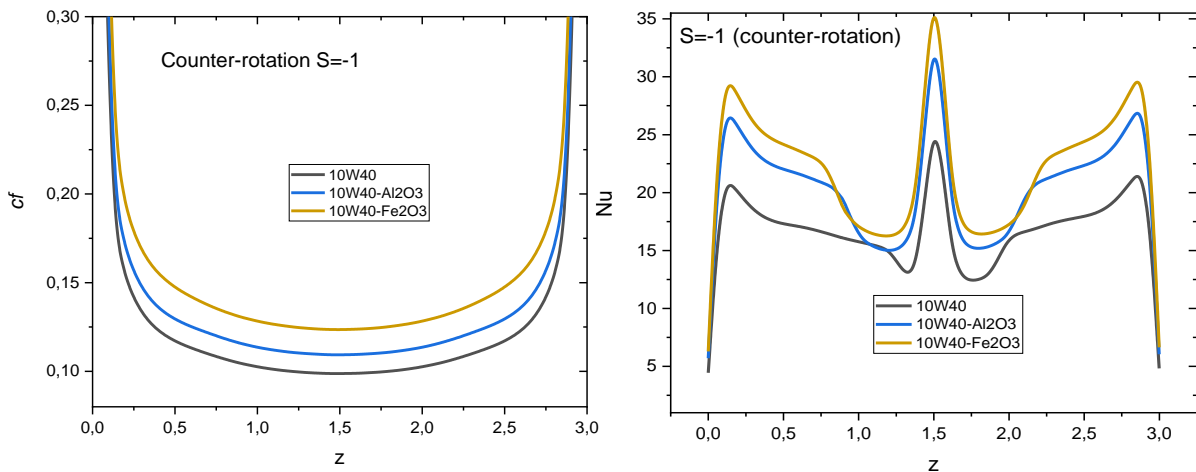


Figure IV. 7. (a) Frottement et (b) nombre de Nusselt local à la paroi interne ($\theta=0.$) pour $S=-1$ (contre-rotation)

La **figure IV.8** illustre l'évolution du coefficient de frottement cutané (C_f) ainsi que celle du nombre de Nusselt local (Nu), à la paroi interne ($\theta=0$) pour le nanofluide 10W40/ Fe_2O_3 sous trois configurations rotationnelles : contre-rotation ($S=-1$), cylindre externe stationnaire ($S=0$) et co-rotation ($S=1$). Pour le frottement cutané, le cas $S=0$ présente des oscillations prononcées le long de la direction axiale dues aux instabilités de cisaillement générées par l'interaction entre la paroi interne en rotation et la paroi externe stationnaire. Cela entraîne une rupture de la symétrie des tourbillons et provoque des variations localisées de la contrainte de cisaillement à la paroi. À l'inverse, la co-rotation ($S=1$) et la contre-rotation ($S=-1$) présentent un profil hyperbolique et symétrique centré autour de $z=1,5$, cohérent avec le comportement attendu pour un rapport d'aspect $A=3$. Français Cependant, la configuration contrarotative produit un C_f moyen plus élevé en raison de l'échange d'impulsion amélioré induit par les mouvements de paroi opposés. Concernant les performances thermiques, le profil local du nombre de Nusselt montre que la co-rotation produit le Nu moyen le plus élevé, avec des oscillations notables le long de z reflétant un mélange thermique cohérent induit par un vortex. Les cas $S=1$ et $S=-1$ présentent une quasi-symétrie autour de $z=1,5$, mais avec un léger décalage axial vers des valeurs z positives. Ce déplacement est attribué aux effets de flottabilité de type Boussinesq, qui améliorent localement le mouvement ascendant du fluide, ce qui altère la répartition du transfert thermique. Par ailleurs, l'ajout de nanoparticules de Fe_2O_3 accentue à la fois le coefficient de frottement pariétal (C_f) et le nombre de Nusselt dans tous les cas en raison de leur conductivité thermique supérieure, de la rupture de la couche limite via les interactions particules-parois et des possibles effets d'alignement magnétique dans les systèmes en rotation. Globalement, les résultats soulignent que si la contre-rotation maximise les effets de cisaillement, la rotation de de cylindre intérieur ($S=0$) offre un transport thermique supérieur grâce à des structures tourbillonnaires plus organisées et thermiquement efficaces.

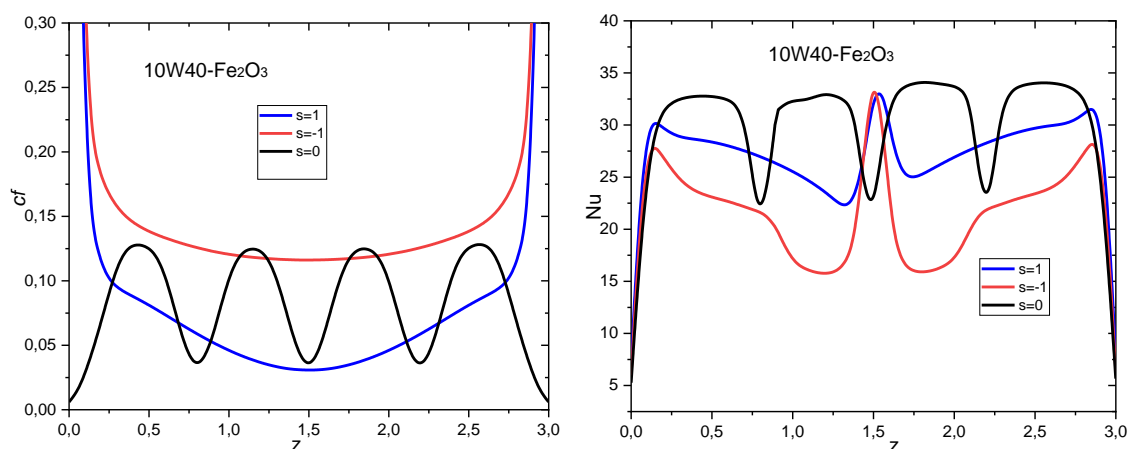


Figure IV. 8. (a) Coef Frottement et (b) nombre de Nusselt local à la paroi interne ($\theta=0$.) pour $S=-1$, $S=0$ et $S=1$ et nanofluide (10W40/ Fe_2O_3).

IV.5 Analyse des effets du rapport de rotation sur les paramètres moyens

La **figure IV.9** révèle des dépendances distinctes du coefficient de frottement pariétal moyen (C_f) et le nombre de Nusselt moyen en fonction du rapport de rotation (S) pour l'huile de base 10W40, les nanofluides 10W40/ Al_2O_3 et 10W40/ Fe_2O_3 . Le nombre de Nusselt moyen (Nu) pour tous les fluides atteint un pic à $S = 0$ (cylindre extérieur stationnaire), entraîné par un vortex de recirculation méridien dominant qui optimise le mélange thermique à $Re = 400$. Au-delà de ce point, le Nu moyen diminue lorsque $0 < S \leq 1$ (co-rotation), indiquant une efficacité de transfert thermique réduite. Inversement, le frottement pariétal moyen (C_f) atteint son maximum lors de la contre-rotation ($S = -1$), où les mouvements opposés des cylindres intensifient la contrainte de cisaillement. Le nanofluide 10W40/ Fe_2O_3 surpasse systématiquement le fluide de base et le nanofluide Al_2O_3 en av- Nu et av- C_f , grâce à sa conductivité thermique supérieure, à l'alignement de ses particules ferromagnétiques et à une meilleure rupture de la couche limite. Notamment, sous stratification thermique ($Ra = 10^5$), Nu présente une symétrie autour de $S = 0$ avec un minimum local à ce point, supprimant l'augmentation due aux vortex observés dans les écoulements non stratifiés. Ceci démontre que le rapport de rotation S module de manière critique l'efficacité thermofluidique : $S = 0$ maximise le transfert de chaleur via des vortex organisés, tandis que $S = -1$ maximise la contrainte de cisaillement par échange de quantité de mouvement, le nanofluide Fe_2O_3 offrant des performances optimales dans tous les régimes.

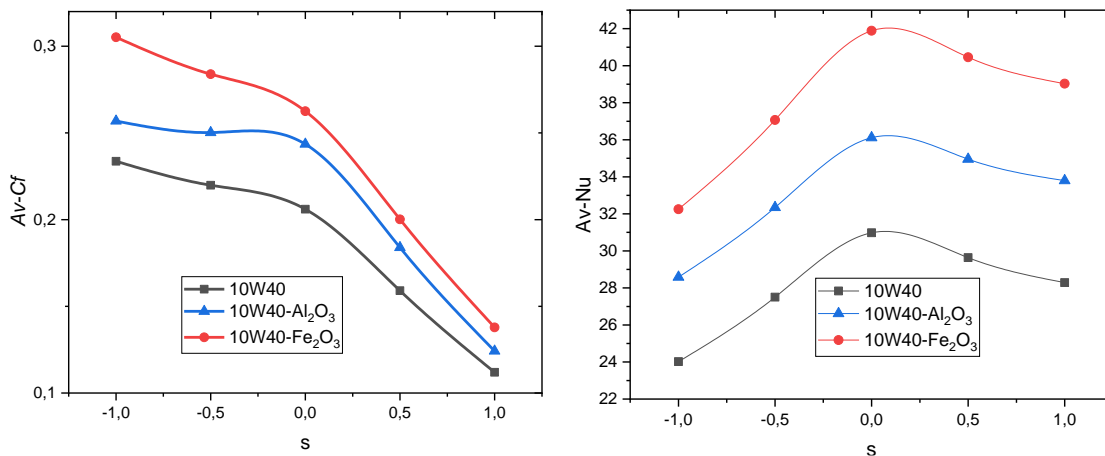


Figure IV. 9. (a) Frottement cutané moyen en fonction du rapport de rotation s : et (b) Nombre de Nusselt moyen en fonction du rapport de rotation s pour le fluide de base 10W40 ; (10w40/ Fe_2O_3) et (10w40/ Al_2O_3)

IV.6 La sédimentation des nanoparticules

Une problématique importante liée à l'utilisation des nanofluides dans les systèmes de refroidissement est celle de la sédimentation des nanoparticules, phénomène susceptible de compromettre les performances thermiques attendues, il est plausible que, sur le temps d'écoulement, une partie des nanoparticules se soit déposée sur les parois internes ou sur la surface chauffante, notamment dans les zones de faible agitation. Ce phénomène est bien documenté dans la littérature. Par exemple, Kouloulis et al. (2016) ont observé, dans une étude expérimentale en convection naturelle, la formation d'une fine couche stationnaire de nanoparticules au fond de leur cellule de Rayleigh-Bénard, agissant comme un isolant thermique et dégradant ainsi le transfert de chaleur. Leur analyse a montré que cette dégradation devient significative avec l'augmentation de la concentration en Al_2O_3 , et qu'elle est liée à l'instabilité colloïdale du fluide, en l'absence de stabilisants ou de contrôle du pH. Cette observation rejoint nos hypothèses dans le cas de l'écoulement de Taylor-Couette, où la stabilité du nanofluide reste un enjeu critique, notamment pour garantir la fiabilité des performances à long terme. L'ajout d'agents tensioactifs ou le recours à des champs magnétiques (pour Fe_2O_3) pourrait être envisagé dans les travaux futurs pour améliorer la stabilité et limiter la sédimentation.[69]

Conclusion générale

Conclusions générales

Cette étude computationnelle examine systématiquement l'amélioration thermophysique de l'écoulement de Taylor-Couette à l'aide de nanofluides hybrides ($\text{Al}_2\text{O}_3/10\text{W40}$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3/10\text{W40}$) en géométrie annulaire ($R = 0,4$) et $\text{Re} = 400$ et $\text{Ra} = 10^5$, une configuration essentielle pour les machines tournantes telles que les roulements et les échangeurs de chaleur. Grâce à des simulations ANSYS Fluent validées (écart maximal $< 1\%$ par rapport à la littérature), trois facteurs clés ont été évalués : la composition du nanofluide, le mode de rotation ($S = -1, 0, 1$) et le rapport d'aspect ($A = H/r_o$).

Les résultats démontrent que le nanofluide Fe_2O_3 surpasse systématiquement l'huile de base et le nanofluide Al_2O_3 , avec un nombre de Nusselt (Nu) jusqu'à 15 à 30 % supérieur et un coefficient de frottement pariétal (Cf) jusqu'à 10 à 25 % supérieur. Cette supériorité résulte de la conductivité thermique supérieure du Fe_2O_3 , de l'alignement des particules ferromagnétiques, ce qui optimise les voies de transfert de quantité de mouvement et de chaleur, ainsi que de la rupture de la couche limite provoquée par les interactions entre les nanoparticules et la paroi.

Autres résultats importants dérivés

- La co-rotation ($S = 1$) maximise le transfert de chaleur (Nu) via des tourbillons de Taylor robustes et symétriques, ce qui améliore le mélange thermique.
- La contre-rotation ($S = -1$) intensifie la contrainte de cisaillement, augmentant le Cf par opposition de quantité de mouvement, mais supprime la cohérence du tourbillon, réduisant ainsi le Nusselt moyenne.
- Une paroi externe stationnaire ($S = 0$) perturbe la symétrie du tourbillon, provoquant des oscillations prononcées du Cf , tout en atteignant le Nu moyen maximal grâce à la recirculation méridionale dominante.
- Le rapport d'aspect (A) régit l'organisation du tourbillon, où des valeurs intermédiaires ($A = 3$) optimisent les performances en équilibrant le nombre de tourbillons ($N \approx A/2$) et la cohérence.

Les effets de flottabilité (approximation de Boussinesq) introduisent des décalages axiaux dans les profils thermiques, déplaçant le pic Nu vers des valeurs z positives. Sous stratification thermique ($\text{Ra} = 10^5$), une symétrie Nu autour de $S = 0$ apparaît, supprimant l'amplification induite par les vortex.

- Une orientation prometteuse pour les recherches futures consiste à étudier les nanofluides ternaires, tels que les hybrides $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$ /graphène, afin d'exploiter les propriétés complémentaires de chaque composant.

Références

- [1] L. Godson, B. Raja, D. Mohan Lal, and S. Wongwises, Enhancement of heat transfer using nanofluids-An overview, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 14 (2010) 629-641. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.004>
- [2] B. Ghasemi, S. M. Aminossadati and A. Raisi, Magnetic Field Effect on Natural Convection in a Nanofluid-filled Square Enclosure 2011. *Int. Journal of Thermal Sciences*, 50: 1748-1756.
- [3] A. Zaraki, M. Ghalambaz, A. J. Chamkha, M. Ghalambaz, and D. De Rossi, “Theoretical analysis of natural convection boundary layer heat and mass transfer of nanofluids: Effects of size, shape and type of nanoparticles, type of base fluid and working temperature,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 26, no. 3, 2015.
- [4] Bachok N, Ishak A, Pop I. Flow and heat transfer over a rotating porous disk in a nanofluid. *Phys. B Condens. Matter*. 2011; 406:1767–1772. doi: 10.1016/j.physb.2011.02.024.
- [5] Turkyilmazoglu, Mustafa. (2014). Computers & Fluids Nanofluid flow and heat transfer due to a rotating disk. *COMPUTERS AND FLUIDS*, 94, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.02.009>
- [6] Rafiq T, Mustafa M. Computational analysis of unsteady swirling flow around a decelerating rotating porous disk in nanofluid. *Arab J Sci Eng*. 2020;45(2):1143–1154. DOI: [10.1007/s13369-019-04257-z](https://doi.org/10.1007/s13369-019-04257-z)
- [7] Sheikholeslami M., Ganji D.D. (2014). Three-dimensional heat and mass transfer in a rotating system using nanofluid, *Powder Technology*, Vol. 253, No. 2, pp. 789-796. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.12.042
- [8] Sheikholeslami, M, and Rokni, B. H., 2017. Simulation of nanofluid heat transfer in presence of magnetic field: A review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, pp.1203–1233, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.108>
- [9] Reddy, P. S, Chamkha, A.J.2016.Soret and Dufour Effects on MHD Convective Flow of Al_2O_3 -Water and TiO_2 -Water Nanofluids Past a Stretching Sheet in Porous Media with Heat Generation/Absorption. *Advanced Powder Technology*, 27, pp. 1207-1218. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.04.005>

- [10] Mahfoud, B. and Bessaïh, R., 2012. Oscillatory swirling flows in a cylindrical enclosure with co-/counter-rotating end disks submitted to a vertical temperature gradient. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 8, pp.1-26, DOI: 10.3970/fdmp.2011.008.001
- [11] Mahfoud, B., Benhacine, H., Laouari, A., Bendjaghlouli, A., 2020. Magnetohydrodynamic Effect on Flow Structures Between Coaxial Cylinders Heated from Below, *J. Thermophysics and Heat Transfer*, 34 (2), pp.1-10, <https://doi.org/10.2514/1.T5805>
- [12] Mahfoud, B., Laouari, A., Hadjadj, A., Benhacine, H., 2019. Counter-rotating flow in coaxial cylinders under an axial magnetic field. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 78, pp. 139-46, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.06.009>
- [13] Bendjaghlouli, A., Mahfoud, B., Ameziani, D.E., 2019. Magnetohydrodynamic flow in a truncated conical enclosure, *Journal of Thermal Engineering*, 5 pp.77-83, <https://doi.org/10.2514/1.T5529>
- [14] Laouari, A., Mahfoud, B., Bessaïh, R., Hadjadj A., 2021. Hydrodynamic instabilities in swirling flow under axial magnetic field, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 85, pp. 245–260, 10.1016/j.euromechflu.2020.08.006
- [15] Mahfoud, B., 2021. Effects of an Axial Magnetic Field on Vortex Breakdown and Fluid Layer” *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 14, pp. 1741–1753, <https://doi.org/10.47176/jafm.14.06.32585>
- [16] Mahfoud, B., Bessaïh, R., 2012. Stability of swirling flows with heat transfer in a cylindrical enclosure with co/counter-rotating end disks under an axial magnetic field, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 61, pp.463–482, <https://doi.org/10.1080/10407782.2012.654461>
- [17] Ashorynejad, H.R., Sheikholeslami, M., Pop, I., Ganji, D.D., 2013. Nanofluid flow and heat transfer due to a stretching cylinder in the presence of magnetic field, *Heat Mass Transfer*, 49 427–436, <https://doi.org/10.1007/s00231-012-1087-6>.
- [18] Sheikholeslami M., Hatami M., Ganji, D.D., 2014. Nanofluid flow and heat transfer in a rotating system in the presence of a magnetic field, *Journal of Molecular Liquids*, 190, pp.112–120, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2013.11.002>
- [19] Sheikholeslami, M., 2017. Influence of Lorentz forces on nanofluid flow in a porous cylinder considering Darcy model, *Journal of Molecular Liquids*, 225, pp. 903–912, doi.org/10.1016/j.molliq.2016.11.022

- [20] Mustafa, M., Mushtaq, A., Hayat, T., Alsaedi, A., 2016. Rotating flow of magnetite water nanofluid over a stretching surface inspired by non-linear thermal radiation, PLoS ONE, 11, 0149304, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149304>
- [21] Sheikholeslami M. and Ganji, D. D., 2018. Numerical investigation of nanofluid melting heat transfer between two pipes, Alexandria Engineering Journal, 57(3), pp. 1261-1269, doi:10.1016/j.aej.2017.03.028
- [22] Aghamajidia, M., Yazdi, M.E., Dinarvand, S., Pop, I., 2018. Tiwari-Das nanofluid model for magnetohydrodynamics (MHD) natural-convective flow of a nanofluid adjacent to a spinning down-pointing vertical cone, Propulsion and Power Research, 7, pp.78-90, <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2018.02.002>
- [23] A. Bejan, D. Allan, Kraus, 'Heat transfer handbook', TJ250.B35, 2003.
- [24] T. Ismail, 'Modelling in transport phenomena', Elsevier Science B.v, 2002.
- [25] **C.J. Ho, M.W. Chen and Z.W. Li**, 'Numerical Simulation of Natural Convection of Nanofluid in a Square Enclosure: Effects Due to Uncertainties of Viscosity and Thermal Conductivity', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, N°17-18, pp. 4506 – 4516, 2008.
- [26] Marc Séguin, Physique XXI Tome B Note de cours rédigée par Simon Vézina
- [27] Das, S. K., Choi, S. U. S., Yu, W., & Pradeep, T. (2007) : Nanofluids: Science and Technology
- [28] Wei Yu and Huaqing Xie. A review on nanofluids : preparation, stability mechanisms, and applications. Journal of nanomaterials, 2012, 2012.
- [39] O.Doche, J.A.Gruss and O.Soriano,'une nouvelle technologie pour les échangeurs thermiques : le nanofluide',2007
- [30] C. Lind et K. Huang Tseng S. C., "Heat transfer enhancement of nanofluids in Rotary Blade Coupling of new correlations," International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 4675–4682, 2009.
- [31] Z. Zhang, Q. Xue, and J. Zhang, "Synthesis, structure and lubricating properties of dialkyldithiophosphate-modified Mo-S compound nanoclusters," Wear, vol. 209, no. 1–2, pp. 8–12, 1997. doi: 10.1016/S0043-1648(96)07288-2
- [32] C. Y. Tsai, H. T. Chien, P. P. Ding, B. Chan, T. Y. Luh, and P. H. Chen, "Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance," Materials Letters, vol. 58, no. 9, pp. 1461–1465.
- [En ligne]. Disponible : Academia.edu

- [33] S. M. You, K. J.H., and K. K.H., “Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer,” *Applied Physics Letters*, vol. 83, pp. 3374–3376, 2003.
- [34] V. P., R. Kumar, and Malasekera, “An Introduction to Computational Fluid Dynamics,” *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, no. 13, pp. 407–411, 2004.
- [35] J. A., R. Scholz, W. P., H. FaMng, and R. Felix, “Magnetic Fluid Hyperthermia (MFH): Cancer Treatment With AC Magnetic Field Induced Excitation of Biocompatible Superparamagnetic Nanoparticles,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no. 201, pp. 413–419, 1999.
- [36] A. Maouassi, “Intensification des échanges de chaleur par l’utilisation des nanofluides,” 2012. [En ligne]. Disponible : Université de Biskra – DSpace
- [37] K. Khanafer, K. Vafai, and M. Lightstone. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, pp.3639-3653,(2003).
- [38] N. Putra, W. Roetzel, and S. DAS. Natural convection of nanofluids .*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(8-9), pp.775-784,(2003).
- [39] G. Roy, C.T. Nguyen, and P.R. Lajoie. Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids. *Superlattices and Microstructures*, 35, pp .497-511, (2004).
- [40] D. Wen and Y. Ding. Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 26, pp .855-864, (2005).
- [41] J. Kim, Y.T. Kang, and C.K. Choi. Analysis of convective instability and heat transfer characteristics of nanofluids. *Physics of Fluids*, 16(7), pp.2395-2401,(2004).
- [42] B.X. Wang, L.P. Zhou, and X.F. Peng, A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(14), pp.2665-2672, (2003).
- [43] J. Rong and T. Sheng-Chung. Numerical research of nature convective heat transfer Benhancement filled with nanofluids in rectangular enclosures. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, pp.727–736, (2006).
- [44] R.K. Tiwari and M.K. Das. Heat Transfer augmentation in a two-sided lid-driven differentially heated square cavity utilizing nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, pp.2002-2018, (2007).
- [45] K.S. Hwang, J.H. lee, and S.P. Jang. Buoyancy-driven heat transfer of water-based Al_2O_3 nanofluids in a rectangular cavity.*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, pp.4003-4010,(2007).

- [46] C.J. Ho, M.W. Chen, And Z.W. Li. Numerical Simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: Effects Due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity. *Int. J. Of heat and Mass Transfer*, 51, pp. 4506-4516, (2008).
- [47] Mahfoud, B., "Enhancement heat transfer of swirling nanofluid using an electrical conducting lid," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 37, No. 1, 2023, pp. 263–271, <https://doi.org/10.2514/1.T6550>
- [48] Bendjaghlouli, A., Mahfoud, B., Mahfoud, H.E., "Impact of wall electrical conductivity on heat transfer enhancement in MHD hybrid nanofluid flow within an annulus," *International Journal of Thermofluid Science and Technology*, Vol. 11, No. 2, 2024, <https://doi.org/10.36963/IJTST.2024110204>
- [49] Mahfoud, B., "Simulation of magnetic field effect on heat transfer enhancement of swirling nanofluid," *International Journal of Computational Materials Science and Engineering*, Vol. 11, No. 4, 2022, 2250007, <https://doi.org/10.1142/S2047684122500075>
- [50] Mahfoud, B., "Effect of wall electrical conductivity on heat transfer enhancement of swirling nanofluid-flow," *Journal of Nanofluids*, Vol. 12, No. 2, 2023, pp. 418–428, <https://doi.org/10.1166/jon.2023.1932>
- [51] Mahfoud, B., Mahfoud, H.E., "Magnetohydrodynamics flow of hybrid nanofluid rotating in annulus through two coaxial cylinders," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 39, No. 1, 2025, <https://doi.org/10.2514/1.T7035>
- [52] Madani, F., Mahfoud, B., Mahfoud, H.E., "Influences of electrical conductivity of the cylindrical walls on heat transfer enhancement of nanofluid swirling flow," *International Journal of Thermofluid Science and Technology*, Vol. 10, No. 2, 2023, <https://doi.org/10.36963/IJTST.2023100201>
- [53] Thermophysical Properties of Hybrid Nanofluids and the Proposed Models: An Updated Comprehensive Study *Nanomaterials* 2021, 11, 3084. <https://doi.org/10.3390/nano11113084>
- [54] BENLALLI.Y, Modélisation numérique du comportement dynamique d'un film d'huile dans un roulement à billes. Thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2008.
- [55] AFNOR NF T60-100 (1985) Petroleum products. Measurement of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity.
- [56] Hutton, J. F. In: "The Rheology of Lubricants". Ed. T. C. Davenport, Barking, Appl. Science Publ. 1973.
- [57] GROFF J.L.E. "ABC du graissage", Edition Technip, 1961.

- [58] Buongiorno, J. (2006). Convective transport in nanofluids modele 2
- [59] Eastman et al. (1997). Nanofluids: New Concept for Heat Transfer Enhancement.
- [60] Rashidi et al. (2021), “Thermophysical Properties of Hybrid Nanofluids and the Proposed Models: An Updated Comprehensive Study”, *Nanomaterials*, 11(11), 3084
- [61] Patankar, S., **1980**. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New-York.
- [62] A. Alsaedi, K. Muhammad, T. Hayat, “Numerical study of MHD hybrid nanofluid flow between two coaxial cylinders” *Alexandria Engineering Journal* , Vol. 61, 2022, pp. 8355–8362, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.067>
- [63] Dr. Rezala Houria, *Cours de Transfert thermique et Échangeurs de chaleur – Master 1*, Département de Génie des Procédés de l’Environnement, Université Djilali Bounaama de Khemis-Miliana.
- [64] https://fr.wikipedia.org/wiki/Oxyde_de_fer
- [65] <https://www.ibu-tec.fr/produits/oxyde-daluminium-al2o3/>
- [66] Front. Chem., Hybrid Nanofluids as Renewable and Sustainable Colloidal Suspensions for Potential Photovoltaic/Thermal and Solar Energy Applications 27 September 2021 Sec. Electrochemistry Volume 9 - 2021 | <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.737033>
- [67] Rashidi, M.M.; Nazari, M.A.; Mahariq, I.; Assad, M.E.H.; Ali, M.E.; Almuzaiker, R.; Nuhait, A.; Murshid, N. Thermophysical Properties of Hybrid Nanofluids and the Proposed Models: An Updated Comprehensive Study. *Nanomaterials* 2021, 11, 3084. <https://doi.org/10.3390/nano11113084> Academic.
- [68] Effet Taylor-Couette Transition vers la turbulence, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, Majeur mécanique Palaiseau, France 16 mars 2021.
- [69] K. Kouloulas, A. Sergis, Y. Hardalupas, *Sedimentation in nanofluids during a natural convection experiment*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 101, 2016, pp. 1193–1203. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.113>