

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

LABORATOIRE D'ETUDES ET DE RECHERCHE EN TECHNOLOGIE
INDUSTRIELLE.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES.

Spécialité : FABRIQUATION MECANIQUE ET PRODUCTIQUE.

THEME

**SIMULATION NUMERIQUE DU MAGNETISME D'UN
ECOULEMENT D'UN NANOFLUIDE AUTOUR D'UN
CYLINDRE.**

Proposé et dirigé par :

Présenté Par :

ProfesseurPhD : ALLALI Abderrazak

SMAIL Abdelkader

Co-Promoteur : ROUBI Abdelhak

BOUKHIBAR Abderrahmane

Année Universitaire : 2020 / 2021

Remerciements

*Je tiens à remercier tout d'abord **Dieu** qui m'a guidé vers le bon chemin et qui m' a donné le courage et la force de continuer ce travail.*

J'exprime mon profond remerciement à :

*Encadreur : **Dr, A.ALLALI***

*Co-promoteur : **Mr, A. ROUBIE***

J'ai le grand plaisir de travailler sous leurs direction et profiter de ses enseignements et ses conseils judicieux et pertinent , ainsi que leurs gentillesse qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

*Nos remerciements vont aussi au membres du **jury**, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail et de participer à la soutenance.*

*J'adresse mes profondes gratitudeux aux **enseignants** et responsables du département de génie mécanique.*

Enfin, j'exprime mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon père et ma très chère maman

*Qui m'ont éclairés le chemin en me donnant la main tout au long de mes
années d'étude*

A mes frères A mes sœurs

Et

A mes très chères amis et camarades

*Pour tous les moments d'échange et de débat aux personnes qui m'ont
Toujours aidé et soutenue*

Je vous Remercie tous...

A. Smail

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma famille

*Qui m'ont éclairés le chemin en me donnant la main tout au long de mes
années d'étude*

A ma mère et mon père

A mes frères A mes sœurs

Et

A mes très chères amis et camarades

*Pour tous les moments d'échange et de débat aux personnes qui m'ont
Toujours aidé et soutenue*

Merci à tous...

Abderrahmane

RESUME :

Les nanofluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (**diamètre < 100 nm**), appelées nanoparticules, dans un fluide de base.

On propose dans ce travail d'étudier l'influence de magnétisme d'un écoulement d'un nanofluide sur le transfert de chaleur par convection d'un écoulement autour d'un cylindre fixe. Les relations donnant la chaleur spécifique et la masse volumique, utilisées dans le présent travail, sont déduites à partir des lois de la thermodynamique. Le nanofluide utilisé est comparé à celui d'un fluide porteur seul.

Une simulation numérique a été réalisée pour étudier les caractéristiques de l'écoulement et le transfert de chaleur autour d'un cylindre circulaire fixe à des nombres de Reynolds médiocre. Ici, le nombre de Reynolds est **5 < Re < 48**, régime laminaire .

Mots-clés :

Nanofluide , Magnétisme, Transfert de chaleur, Cylindre circulaire, Nombre de Reynolds et Régime laminaire.

ABSTRACT:

Nanofluids are dispersions of nano-sized particles (**diameter <100 nm**), called nanoparticles, in a base fluid.

It is proposed in this work to study the magnetism influence of a flow of a nanofluid on the heat transfer by convection of a flow around a fixed cylinder. The relations giving the specific heat and the density, used in the present work, deduced from the laws of thermodynamics. The nanofluid used is compared to that of a carrier fluid alone.

A numerical simulation was carried out to study the flow characteristics and heat transfer around a circular cylinder fixed to poor Reynolds numbers. Here, the Reynolds number is **$5 < Re < 48$** , laminar regime.

Keywords:

Nanofluid, Magnetism, Heat transfer, Circular cylinder, Reynolds number and Laminar regime.

ملخص

الموائع النانوية عبارة عن مشتتات لجسيمات بحجم نانومتر (قطرها أقل من 100 نانومتر)، تسمى الجسيمات النانوية، في سائل قاعدي.

نقترح في هذا العمل دراسة تأثير المغناطيسية لتدفق سائل نانوي على انتقال الحرارة بالحمل الحراري لتدفق حول أسطوانة ثابتة. العلاقات التي تعطي الحرارة النوعية والكثافة، المستخدمة في العمل الحالي، تم استنتاجها من قوانين الديناميكا الحرارية. تتم مقارنة المائع النانوي المستخدم مع السائل الحامل وحده. تم إجراء محاكاة عددية لدراسة خصائص التدفق وانتقال الحرارة حول أسطوانة دائرية مثبتة بأرقام رينولدز ضئيلة. هنا، رقم رينولدز $5 < Re < 48$ ، نظام طبقي.

الكلمات الدالة:

الموائع النانوية، المغناطيسية، نقل الحرارة، الأسطوانة الدائرية، رقم رينولدز والنظام الطبقي.

Nomenclature

Lettres latines

k_{nf}	Conductivité thermique du nanofluide
k_f	Conductivité thermique du fluide de base
k_s	Conductivité thermique des particules solides
V_s	Volume des nanoparticules solides (m^3).
V_f	Volume du fluide de base (m^3).
D	Diamètre du cylindre
d_p	Diamètre moyen des nanoparticules
Ls	Longueur de resurculation
Lc	Longer caractéristique
c_p	La capacité thermique massique à pression constante
Nu	Nombre de Nusselt moyen
Pr	Nombre de Prandtl
Gr	Nombre de Grashof
Re	Nombre de Reynolds
Ri	Nombre de Richardson
H_a	Nombre de Hartmann
Ts	Température de la paroi (K)
Cs,C μ	Constantes de turbulence (modèle k- ϵ)
B	Champe magnétique
k	Conductivité thermique
R_k	Résistance de Kapitza

Lettres grecques

α	Diffusivité thermique
Ω	Vitesse angulaire
ν	Viscosité cinématique
μ	Viscosité dynamique
β	Coefficient de dilatation
σ	Conductivité électrique
ϕ	Fraction volumique des nanoparticules
ρ	Masse volumique
θ	Angle

Indices et symboles inférieurs

c	Cylindre
f	Fluide de base
nf	Nanofluide
s	Particule solide
L	Local moy moyen

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	5
CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.	8
I.1. Introduction :.....	9
I.2. Définition de nanofluide :	9
I.3. Etat de l'art :.....	9
I.4. Application de nanofluide :.....	11
I.5. Types de nanoparticules :.....	13
I.6. Préparation des nanofluides :	14
I.7. Nanoparticules et le fluide porteur :.....	19
I.8. Propriétés et Caractéristiques :.....	20
I.9. Ecoulement autour d'un cylindre :.....	21
I.9.1. Ecoulement laminaire autour d'un cylindre fixe :	22
I.9.2. Différents régimes de l'écoulement :.....	22
I.10. Transfert de chaleur :.....	25
I.10.1. Définition :.....	25
I.10.2. Types de Transfert de chaleur :.....	26
I.11. Le Magnétisme :.....	27
I.11.1. Généralités :.....	27
I.11.2. Définition de Champ Magnétique :.....	27
I.11.3. L'effet du champ magnétique sur la génération d'entropie dans les nanofluides :	27
I.11.4. Effet Magnus :.....	28
CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES.....	30
II.1. Introduction :.....	31
II.2. Nombres sans Dimension :.....	31
II.3. Propriétés thermophysiques :	35
II.3.1. La Conductivité thermique (K).....	36
II.3.2. la fraction volumique (ϕ):.....	39
II.3.3. La chaleur massique (Cp) :	39
II.3.4. La masse volumique (ρ) :.....	40

II.3.5. Viscosité dynamique (μ) :.....	41
II.3.6. Coefficient d'expansion volumique (β) :.....	42
CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT	43
III.1. Présentation de ANSYS :	44
III.2. ANSYS Fluent :	44
III.3. Matière utilisée pour la simulation :.....	45
III.4. Propriétés de Nanofluide :.....	45
III.5. Début de la simulation :	46
III.5.1. Géométrie :.....	47
III.5.2. Maillage :.....	48
III.5.3. Configuration :.....	50
III.5.4. Solution :.....	53
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION	56
IV.1. L'étude de Magnétisme :.....	57
IV.2. Première Partie ($\gamma = 0$) :	57
IV.3. Deuxième partie (γ se varie) :.....	59
CONCLUSION GENERALE.....	63

Liste des Figures

Chapitre I:

Figure I.1 : Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone.....	14
Figure I.2 : Image de : a) Al ₂ O ₃ (13 nm), b) Al ₂ O ₃ (50 nm), c) TiO ₂ (21 nm), d) SiO ₂ (5~15 nm), e) SiO ₂ (10~20 nm) et f) Cu nanoparticules dispersé dans l'eau.....	18
Figure I.3 : Les nanoparticules dans un tube.....	19
Figure I.4 : Ecoulement laminaire.....	22
Figure 1.5 : Visibilité du cylindre fixe avec Re : 0.16.....	23
Figure 1.6 : Visibilité du cylindre fixe avec Re : 26.....	23
Figure 1.7 : Visibilité du cylindre fixe avec Re : 140.....	24
Figure I.8(a) : Ondulation des tourbillons de Von Karman pour le mode A, Re = 220.....	25
Figure I.8(b) : Visualisation du mode B, Re = 270.....	25
Figure I.9 : Rotor Flettner sur un navire.....	29
Figure I.10 –Prototype d'éolienne à rotors de Flettner.....	29

Chapitre III:

Figure III.1 : Esquisse d'espace de travail	47
Figure III.2 : Forme finale de surface.....	47
Figure III.3 : Maillage avec les paramètres par défaut.....	48
Figure III.4 : Maillage après changement de méthode.....	48
Figure III.5 : Maillage après changement de taille d'éléments.....	49
Figure III.6 : Zoom sur le maillage précédent	49
Figure III.7 : Les paramètres : inlet, outlet, cylindre et symmetrie	50
Figure III.8 : Configuration de Fluent Launcher	50
Figure III.9 : Sélection de module Energy Equation	51
Figure III.10 : Propriétés de nanofluide	51

Figure III.11 : Insertion de la vitesse d'entrée (pour $Re=40$ et $\varphi=0.00$).....	52
Figure III.12 : Les valeurs de référence	52
Figure III.13 : Insertion de champ magnétique avec le module MHD	53
Figure III.14 : Définition de c_d (Drag Coefficient).....	54
Figure III.15 : Définition des valeurs de convergence pour : Continuity, X-velocity, Y-velocity et energy.....	54
Figure III.16 : Choix des quantités à traiter	55

Chapitre IV:

Figure IV.1: Simulation avec $Ra=7.10^3$, $Ha=25$	57
Figure IV.2: Simulation avec $Ra=7.10^5$, $Ha=100$	58
Figure IV.3 : Diagramme du nombre Nu moyen en fonction de la fraction volumique de nanofluide pour divers nombres Ha et à $Re_H = 250$	58
Figure IV.4: Variation du nombre de Nusselt avec le nombre de Hartmann pour différents phase déviation pour $Ra=5.10^4$ et $\varphi=0$	59
Figure IV.5 : Génération d'entropie avec le nombre de Hartmann pour différents phase déviation pour $Ra=5.10^4$ et $\varphi=0$	60
Figure IV.6 : Variation du nombre de Nusselt avec φ et γ pour $Ra=5.10^4$ et $Ha=20$	61
Figure IV.7 : Génération d'entropie avec φ et γ pour $Ra=5.10^4$ et $Ha=20$	61

Liste des Tableaux

Chapitre I:

Tableau I.1 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base.....	15
Tableau I.2 : Propriétés thermophysiques de différents matériaux.....	21

Chapitre III:

Tableau III.1 : Propriétés Thermophysiques de l'eau et de MgO	45
--	----

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le développement des nanotechnologies constitue un défi pour les années à venir. Les nanosciences étudient la structure de la matière au niveau moléculaire donc à l'échelle nanométrique dans le but d'innover dans de nombreux domaines tels que : l'environnement, la production et le stockage de l'énergie, le refroidissement des composants électroniques, la biologie, le diagnostic médical, le traitement de l'eau, etc.... En ce qui concerne les applications dans le domaine du transfert de chaleur, des études menées depuis une dizaine d'années ont montré que dans certaines conditions, l'ajout de particules nanométriques dans un fluide (appelé alors nanofluide) pouvaient augmenter le transfert de chaleur par rapport au cas du corps pur (eau), en modifiant de manière significative les propriétés thermophysiques du fluide porteur.

Cette étude s'inscrit dans le contexte de l'analyse physique et de modélisation d'écoulements laminaire autour d'un obstacle fixe, La compréhension physique du comportement de l'écoulement du nanofluide autour d'obstacles et sa modélisations ont des aspects importants tant sur le plan de la recherche fondamentale que sur le domaine des applications énergétiques. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'approfondir la connaissance des mécanismes physiques associés à l'échange de chaleur dans les écoulements autour de structures solides.

En résumé, cette thèse a pour principal objectif d'analyser le caractère instationnaire de l'écoulement autour d'un obstacle dès le régime des nombres de Reynolds modérés, et de contribuer à l'évaluation des approches de modélisations pour capturer la dynamique des structures de l'écoulement dans la région proche cylindre.

La présente thèse s'articule comme suit:

Après avoir présenté dans le chapitre 1, qui est consacré à l'état de l'art sur les nanofluides, les différents régimes d'écoulement et la préparation de nanofluide et leur rôle sur le transfert de chaleur ainsi l'effet du champ magnétique sur la génération d'entropie dans les nanofluides.

Nous passerons au chapitre 2, on présente le formalisme mathématique conduisant à la mise en équation du problème de la convection autour d'un cylindre dans le cas où le nanofluide est assimilé à un fluide incompressible de caractéristiques thermophysiques particulières.

INTRODUCTION GENERALE

Nous préciserons à la suite de ce travail les conditions aux limites choisies et la méthode de résolution adoptée.

Nous traitons ensuite au chapitre 3 , la simulations numériques en configuration 2D de l'écoulement autour d'un cylindre fixe .Nous avons utilisé pour cela le **logiciel** Fluent, basé sur la méthode de volumes finis.

Le dernier chapitre est le chapitre 4, les résultats de simulations numériques , on étudie les effets de la force magnétique sur l'amélioration de l'échange de chaleur .

Enfin, une conclusion où nous dégagerons les points forts et les résultats de notre étude et les perspectives qu'elle offre.

CHAPITRE I :

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE NANOFLEUIDE

CHAPITRE I

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

I.1. Introduction :

Ce chapitre se concentre sur le nanofluide, l'écoulement, le transfert de chaleur et le magnétisme. Le champ d'écoulement derrière un cylindre circulaire infini a été largement étudié dans le passé. Ce champ d'écoulement est une phénoménologie importante pour de nombreux domaines techniques et physiques, car le développement des vortex alternés dans le sillage proche, provoque des forces de pression qui génèrent des vibrations structurales, des bruits acoustiques et des phénomènes de résonance.

On parlera aussi de la transfert de chaleur, c'est le processus par lequel de l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux aux températures différentes. La chaleur peut être transmise par conduction, convection ou rayonnement. Bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est généralement prépondérant.

Et enfin le magnétisme, un aspect du phénomène combiné de l'électromagnétisme. C'est une classe de phénomènes physiques médiés par des champs magnétiques. Les courants électriques et les moments magnétiques des particules élémentaires donnent naissance à un champ magnétique, qui agit sur d'autres courants et moments magnétiques.

I.2. Définition de nanofluide :

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide. Leurs propriétés thermiques étonnantes en ont fait l'objet d'intenses investigations durant la dernière décennie. On constate, notamment, une nette augmentation des échanges de chaleur qu'aucune phénoménologie ne permet encore d'expliquer de manière satisfaisante.

Cette amélioration du transfert de chaleur fait donc des nanofluides une nouvelle technologie prometteuse dans le cadre des transferts thermiques, permettant d'améliorer les performances de divers échangeurs de chaleurs.

I.3. Etat de l'art :

Le terme "nanofluide" est proposé premièrement par Choi [1] pour désigner la suspension des nanoparticules solides dans un liquide de base. Choi [1] a trouvé que la conductivité thermique effective du mélange eau- Al_2O_3 augmente de 20% pour une concentration en volume entre 1% et 5% de Al_2O_3

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

De plus l'adjonction dans un liquide de certains types de nanoparticules, même en très faible concentration (1% en volume), permet d'augmenter la conductivité thermique de ce dernier de 150% dans le cas de nanotubes de carbone Choi et al. [2], et de 40% pour des nanoparticules d'oxyde de cuivre Eastman et al. [3] et plus de 20% pour des oxydes d'aluminium [1-7].

De nombreuses recherches ont été menées depuis 2001 sur cette nouvelle classe de nanofluides afin de permettre une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu, et mettre ainsi au point des fluides caloporteurs plus performants. La forte conductivité thermique des nanofluides les désigne en effet comme des candidats potentiels pour le remplacement des fluides porteurs utilisés dans les échangeurs thermiques en vue d'améliorer leurs performances Koblinski [4]. Certaines limitations susceptibles de réduire les performances des nanofluides utilisées à la place des fluides caloporteurs purs, ont été étudiées

L'utilisation des nanofluides comme fluide caloporteur dans les échangeurs a montré que l'addition de nanoparticules dans un liquide augmente sa viscosité et de ce fait les pertes de charge Yang [5].

De plus, le manque de stabilité dans le temps de certains nanofluides peut entraîner l'agglomération des nanoparticules et une modification de leur propriété de conduction thermique. Néanmoins, en l'état actuel des recherches, ces deux effets restent moins importants lors de l'utilisation de nanofluides que dans le cas de suspension de microparticules classiques Daungthongsuk [6].

En dehors des applications industrielles possibles, l'étude des nanofluides présente un intérêt scientifique pour la compréhension des phénomènes mis en jeu aux échelles nanométriques. Les propriétés thermiques des nanofluides ne concordent pas avec les prévisions fournies par les théories classiques décrivant les suspensions de particules solides dans un liquide. Malgré le nombre élevé d'études publiées sur le sujet ces dernières années, aucune théorie ne parvient à décrire convenablement les résultats expérimentaux obtenus sur les nanofluides d'après Vadasz [7].

A.DAAS, S. DERFOUF, N. BELGHAR (2016) [8], ont fait une étude numérique de la convection libre dans une géométrie rectangulaire remplie d'un nano fluide (Cu/eau) est chauffée par une source thermique. Les équations de continuité, masse et d'énergie sont

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

discrétisées par la méthode numérique des volumes finies, ont utilisé la simulation numérique comme un outil d'investigation.

K. Najid, F. Dahami, Z. Boulahia et R. Sehaqui (2017) [9], ont présenté une étude numérique de la convection naturelle dans une paroi ondulée remplie de nano fluide (Cu/eau). La simulation numérique a été utilisée pour concevoir le code et le signal. Ils ont discrétisé les équations de décision par méthode SOR et ADI. Une étude paramétrique a été réalisée en considérant le type de nano fluides, l'amplitude d'ondulation et le nombre de Rayleigh. Les résultats ont été analysés en prenant en compte le nombre de Nusselt au travers de champs dynamique et thermique.

Mme Tabet Sara (2017) [10], a travaillé sur une étude numérique de convection naturelle dans un régime laminaire et turbulent à l'intérieur d'une géométrie de forme carrée avec un mur partiellement chauffé. La partie chauffée du mur varie entre 20% et 80% de la longueur totale. Les équations dominantes ont été résolues par la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis.

La convection naturelle a été montrée à la fois dans les états laminaire et turbulents dans les courbes de température et Nusselt. Le chauffage partiel a un impact significatif sur le transfert de chaleur. Le nombre de Rayleigh est plus grand lorsque l'effet est plus intense, le nombre de Rayleigh étant compris entre 106 -109 dans système laminaire et système turbulence.

KROUMA Saadia, N.BELGHAR (2017) [11], ont atteint à travers cette étude numérique ont permis d'analyser en détail des échanges thermiques par des nanofluides afin de comprendre et de valoriser les différents mécanismes qui avèrent conditionner leurs propriétés thermophysiques ainsi que leurs améliorations thermiques au sein d'un micro-échangeur de chaleur destiné au refroidissement des composants électroniques.

I.4. Application de nanofluide :

Les nanofluides peuvent être employés pour améliorer le transfert thermique de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques. Dans cette section quelques exemples d'application seront présentés tel que le transport la microélectronique, la défense, le nucléaire, l'espace et la biomédicale.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

I.4.1. Refroidissement des systèmes électroniques :

Dans le circuit intégré les nanofluides ont été considérés comme fluides de refroidissement. Pour cela plusieurs études ont été effectuées.

Tsai et al [12] ont employé un nanofluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un microordinateur. De leur côté ma et col ont étudié l'effet du nanofluide sur les possibilités de transfert de la chaleur d'un caloduc d'oscillation ils ont prouvé qu'à la puissance d'entrée de 80 W et seulement pour une concentration volumique de $\varphi=1\%$ la différence de température entre la vaporisation et le condensateur est de 16.6°C.

I.4.2. Refroidissement des systèmes thermiques :

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules l'addition des nanoparticules dans ces liquides ce dernier améliore le taux de refroidissement. Ce point est étudié par plusieurs groupes de chercheurs, Tseng et al [13] ont dispersé les nanoparticules de CuO et Al₂O₃ dans l'huile de refroidissement du moteur de transmission. Dans une autre application, Zhang et al [14] ont rapporté une étude pour réduire l'usure (lubrification) à l'aide des nanoparticules, et améliorer les propriétés tribologiques et la résistance à l'usure avec la réduction de frottement entre les éléments mécaniques mobiles.

I.4.3. Refroidissement des systèmes militaires :

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermique très élevés ($q>500$ W/cm²), ou les nanofluides ont montré leurs efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaire y compris les véhicules militaires les sous-marins et les diodes lasers à haute puissance.

I.4.4. Refroidissement des systèmes spatiaux :

Pour les applications dans l'espace You et al [15] et Vassallo et al [16] ont effectué des études pour montrer que la présence des nanoparticules dans le fluide de refroidissement en électronique générale joue un rôle très important dans les applications de l'espace ou la densité de puissance est très élevée.

I.4.5. Refroidissement des systèmes nucléaires :

L'institut de Technologie de Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour la nouvelle technologie (nanofluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Actuellement ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûreté neutronique et de la performance économique des systèmes nucléaires.

I.4.6. La biomédecine :

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

I.4.7. D'autres applications :

Il y a des situations nombreuses où l'augmentation de l'efficacité du transfert thermique peut être liée à la qualité et au coût d'un produit d'un processus. Par exemple, dans le domaine des énergies renouvelables les nanofluides sont utilisés pour augmenter le transfert de chaleur à partir des capteurs solaires aux réservoirs de stockage et pour augmenter la densité d'énergie. Les liquides réfrigérants de nanofluide ont une application potentielle dans la majorité des industries de transformations, telles que les matériaux, la production chimique, la nourriture, la boisson, le pétrole et le gaz [18].

I.5. Types de nanoparticules :

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) constitue un champ de recherche en pleine expansion, aussi seules les nanoparticules les plus couramment utilisées dans les applications liées aux transferts thermiques sont ici brièvement mentionnées.

D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories (Voir figure I.1) :

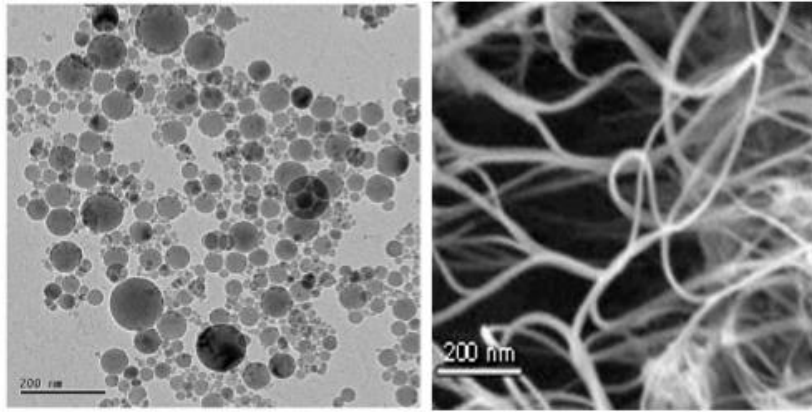


Figure I.1 : Nanoparticules sphériques. [19]; Nanotubes de carbone. [20]

- ❖ Les nanoparticules sphériques pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent être à base de métaux (Cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou (Oxydes de cuivre CuO, oxyde d'aluminium Al₂O₃, oxyde de titane TiO₂...).
- ❖ Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO₂, Nanotube de silicium...)

Dans le cadre de cette synthèse bibliographique, on s'intéressera principalement à l'étude des nanofluides à base de nanoparticules sphériques.

I.6. Préparation des nanofluides :

Le Tableau I.1 regroupe une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base. Il existe principalement deux méthodes de production de nanofluides, à savoir la technique en deux étapes et la technique en une étape.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

Tableau I.1 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base. [21]

	Acétone	Eau	Ethylène glycol	Huile	Toluène	Décène	Ethanol
Ag		X		X			
AlN							X
Au		X			X		
Al ₇₀ Cu ₃₀			X				
Al ₂ O ₃		X	X	X			
Bi ₂ Te ₃							
C (diamant)		X					
C (graphite)		X		X			
C (NTC)		X		X		X	
C (fullerène)				X	X		
Cu	X	X	X	X			
CuO		X	X				
Fe			X				
MgO		X	X	X			
SiC		X					
SiO ₂		X	X				
TiO ₂		X	X				
WO ₂			X				
ZrO ₂		X					

I.6.1. Méthode a deux étapes :

La méthode en deux étapes est la méthode la plus utilisée pour la préparation des nanofluides. Les nanoparticules, les nanofibres, les nanotubes ou d'autres nanomatériaux utilisés dans cette méthode sont d'abord produits sous forme de poudres sèches par des procédés chimiques ou physiques. Ensuite, la poudre nano-saturée sera dispersée dans un fluide dans la deuxième étape de traitement à l'aide d'une agitation intensive de la force magnétique.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

La technique en deux étapes est avantageuse lorsque l'on considère la production de nanoparticule de masse important. En raison de la difficulté à préparer des nanofluides stables par une méthode en deux étapes, plusieurs techniques avancées sont développées pour produire des nanofluides, y compris la méthode en une étape.

I.6.2. Méthode en une étape :

Cette méthode, combine la production de nanoparticules et la dispersion des nanoparticules dans le fluide de base en une seule étape. Le processus en une étape consiste à produire et à disperser simultanément les particules dans le fluide. Dans cette méthode, les processus de séchage, de stockage, de transport et de dispersion des nanoparticules sont évités, de sorte que l'agglomération des nanoparticules est minimisée et la stabilité des fluides augmente. Les processus en une étape peuvent préparer des nanoparticules uniformément dispersées, et les particules peuvent être suspendues de manière stable dans le fluide de base.

La méthode physique en une étape ne peut pas synthétiser les nanofluides à grande échelle, et le coût est également élevé. Les caractéristiques de dispersion des nanofluides produits avec des techniques en une étape sont meilleures que celles produites avec la technique en deux étapes. Le principal inconvénient des techniques en une étape est qu'elles ne sont pas adaptées à la production de masse, ce qui limite leur commercialisation. Diverses techniques chimiques et physiques sont donc disponibles pour élaborer des nanoparticules. Le choix d'une méthode de synthèse est dicté par l'utilisation finale des nanoparticules.

I.6.3. Méthodes physiques :

La méthode la plus simple consiste à subdiviser un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique. Toutefois, cette méthode présente d'importantes limitations car elle ne permet pas un contrôle précis des distributions de taille.

Afin d'obtenir un meilleur contrôle de la taille et de la morphologie, on peut utiliser d'autres méthodes physiques plus sophistiquées comme : – La pulvérisation d'un matériau cible, par exemple à l'aide d'un plasma (Pulvérisation cathodique), ou d'un faisceau laser intense (Ablation laser).

H. Sakuma et K. Ishii [22] ont ainsi synthétisé des nanoparticules magnétiques de Co-Pt et Fe de taille 4 à 6 nm ; – Le chauffage à très haute température (Evaporation thermique) d'un matériau de manière que les atomes qui le constituent s'évaporent.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

Ensuite un refroidissement adéquat de ces vapeurs permet une agglomération en nanoparticules [23].

En général, les méthodes physiques nécessitent un matériel coûteux pour un rendement en nanoparticules souvent très limité. Les nanoparticules ainsi synthétisées sont la plupart du temps déposées ou liées à un substrat.

I.6.4. Méthodes chimiques :

Aujourd'hui un grand nombre de méthodes de synthèse par voie chimique sont disponibles et présentent l'avantage d'être en général simples à mettre en œuvre et d'être souvent quantitatives et peu coûteuses. Ces méthodes permettent d'obtenir des particules avec une distribution de tailles relativement étroite et de morphologies variées.

Comme dans le cas de la voie physique, les nanoparticules peuvent être synthétisées sous deux formes : libres à l'état de poudre relativement facile à disperser dans un liquide ou un gel hôte, ou enrobées dans une matrice solide (Silice mésoporeuse par exemple) ou un polymère.

Nous citons ici les méthodes chimiques les plus couramment utilisées :

▪ Décomposition de précurseurs organométalliques :

L'utilisation de précurseurs organométalliques permet d'élaborer différents systèmes de nanoparticules. Le procédé repose sur la décomposition, dans un solvant organique judicieusement choisi, d'un composé organométallique, dans lequel le métal est généralement à bas degré d'oxydation.

Ceci permet d'éviter l'emploi de réducteurs chimiques puissants qui engendrent souvent des impuretés qui s'adsorbent à la surface des particules et sont difficiles à éliminer. La décomposition est réalisée par élimination des ligands de coordination. Cette élimination se fait en général par chauffage. D. K. Lee et al. [24] ont élaboré des nanoparticules de 13 nm de Cobalt et de Fer par décomposition thermique de CoCl_2 et FeCl_2 , en présence de polymères organiques.

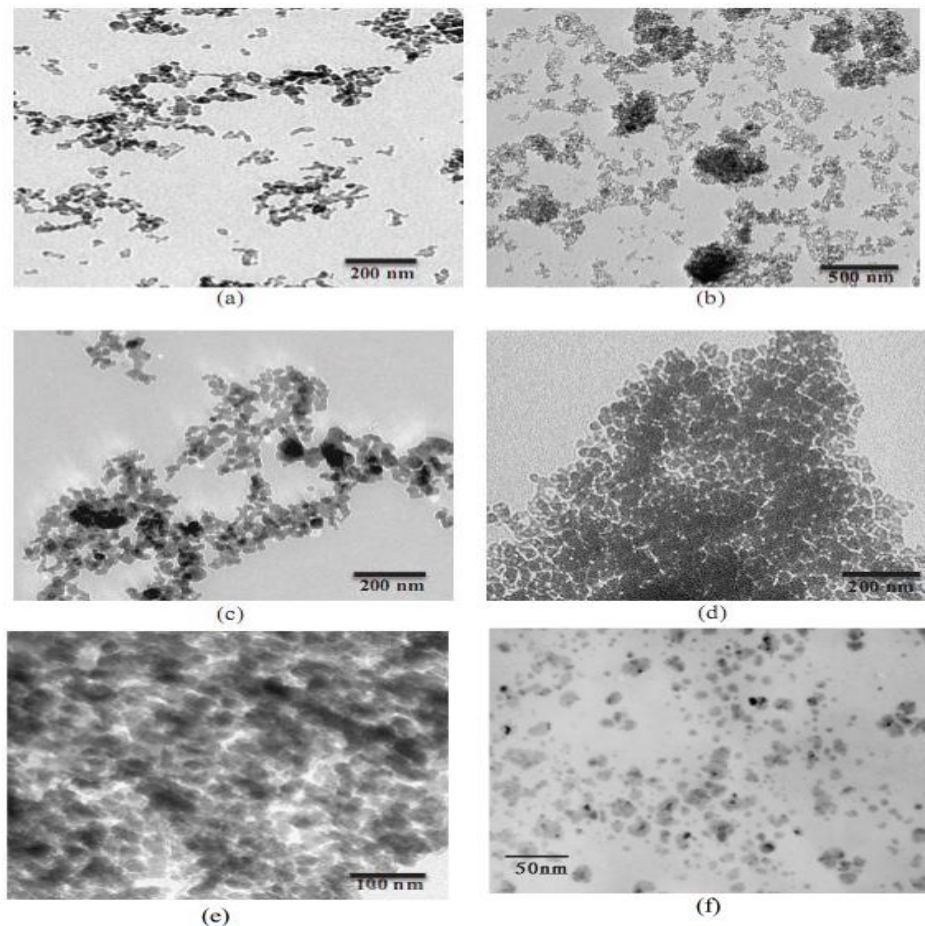


Figure I.2 : Image de : a) Al_2O_3 (13 nm), b) Al_2O_3 (50 nm), c) TiO_2 (21 nm), d) SiO_2 (5~15 nm), e) SiO_2 (10~20 nm) et f) Cu nanoparticules dispersé dans l'eau. [25]

▪ Voie radiolytique :

Le principe de la synthèse radiolytique des nanoparticules consiste à réduire des ions métalliques en solution au moyen d'espèces produites (Généralement des électrons) par radiolyse. Dans de telles solutions, les ions métalliques en solution sont en concentration suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas d'effet direct des rayonnements sur ces ions.

La synthèse peut donc se décrire en deux parties (i) la radiolyse du solvant, et (ii) les réactions de réduction des ions métalliques par les espèces produites par radiolyse suivies par la coalescence des atomes produits.

R. Benoit et al. [26] ont ainsi synthétisé des nanoparticules de bismuth dans de la silice. Les méthodes chimiques ont souvent un rendement bien supérieur à celui des méthodes physiques.

I.7. Nanoparticules et le fluide porteur :

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1 à 100 nm).

Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental et appliqué sont très étudiées de nos jours.

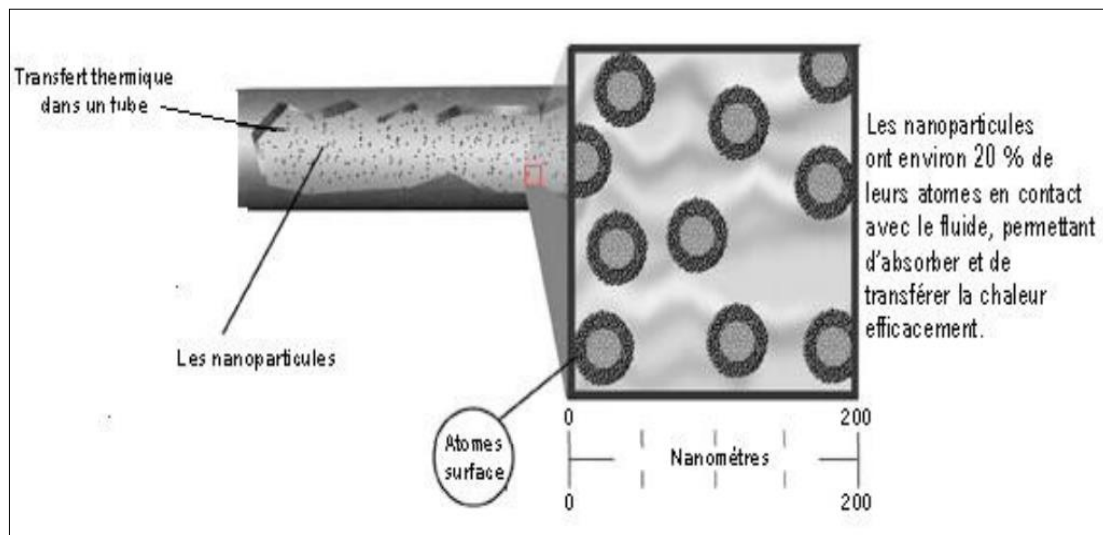


Figure I.3: Nanoparticules dans un tube.

De nombreux physiciens et chimistes les synthétisent, d'autres physiciens les étudient afin de comprendre la physique de ces objets nanométriques et des biologistes les utilisent comme marqueurs cellulaires.

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont:

- ❖ Les nanoparticules des oxydes métallique :
 - L'oxyde d'aluminium, Al_2O_3 .
 - L'oxyde de cuivre, CuO .
 - L'oxyde de silicium, SiO_2 .
 - L'oxyde de titanium, TiO_2 .
 - L'oxyde de magnésium, MgO .
- ❖ Les nanoparticules métalliques :
 - L'aluminium, Al .

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

- Le cuivre, Cu.
 - L'or, Au.
 - L'argent, Ag.
 - La silicone, Si.
- ❖ Les nanoparticules non métalliques :
- Les nanotubes de carbone, CNT.
 - Le diamant, C.
- ❖ Les liquides de base les plus utilisés sont:
- L'eau.
 - L'éthylène-glycol, EG.
 - Les huiles.
 - Le Toluène.
 - Les fluides de réfrigération (R12.R22.....)

Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tous phénomènes d'agréations, la sélection d'une telle fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule.

I.8. Propriétés et Caractéristiques :

Les propriétés thermofluides des nanofluides ont été étudiées et caractérisées en fonction d'une multitude de paramètres dont les principaux sont : la concentration en nanoparticules, le diamètre moyen des nanoparticules, le pH de la solution, la concentration en tensioactif utilisé pour stabiliser la suspension et la température.

Une analyse expérimentale détaillée a permis d'identifier les différents régimes de dispersion que peuvent présenter les nanofluides à base d'eau et d'alumine et de déterminer les conditions de préparation pour les obtenir. Un protocole expérimental permettant d'identifier les conditions expérimentales offrant la plus grande augmentation de conductivité thermique a été développé.

La conductivité thermique et la viscosité dynamique sont les deux propriétés thermophysiques des nanofluides les plus étudiées comme l'atteste le nombre de modèles développés pour le calcul de ces deux grandeurs. Relativement, la masse volumique et la chaleur spécifique des nanofluides ont suscité peu d'intérêt, notamment sur le plan expérimental.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

Tableau I.2 : Propriétés thermophysiques de différents matériaux. [27] [28]

	Nanoparticule et fluide de base	K (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	μ (Pa.s)
Métallique (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80.2	7870	447	
	Ni	90.7	8900	444	
	Au	317	19300	129	
	Ag	429	10500	235	
	C(diamant)	2300	3500	509	
Oxyde métallique (solides)	SiO ₂	1.38	2220	745	
	TiO ₂	8.4	4157	710	
	Al ₂ O ₃	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
	MgO	46	3600	765	
Liquides non métalliques	L'eau	0.6	997.1	4179	0.001003
	Ethylène-glycol (EG)	0.258	1132	2349	0.0157

I.9. Ecoulement autour d'un cylindre :

L'écoulement d'un fluide à faible nombre de Mach ($Ma \leq 0.3$), est considéré incompressible. L'adimensionnalisation des équations régissent cet écoulement dépend du nombre de Reynolds et des conditions aux limites et initiales. Dans ces conditions, l'écoulement autour du cylindre dépend uniquement du nombre de Reynolds défini comme: $Re = \rho.U_{\infty}.D / \mu$.

Où : U_{∞} est la vitesse en amont, D le diamètre du cylindre et μ la viscosité dynamique du fluide considéré. Ce nombre adimensionnel caractérise le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

De nombreuses études traitent déjà des phénomènes thermo hydrauliques autour d'un cylindre fixe. Aussi bien théoriques, numériques, qu'expérimentales, celles-ci décrivent les différents régimes que l'on rencontre en fonction du nombre de Reynolds (Re). Cependant, avec les avancées faites en matière de méthodes numériques et de résolution d'équations, la simulation numérique permet aujourd'hui de modéliser correctement les écoulements industriels réels.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

I.9.1. Ecoulement laminaire autour d'un cylindre fixe :

La structure de l'écoulement derrière le cylindre se compose de deux recirculations attachées au cylindre appelées « twineddies » ou encore « twinvortices » dans la littérature anglo-saxonne. Les paramètres géométriques de cette zone (Figure I.4) seront mesurés : sa longueur, l'angle de séparation et la position du centre des recirculations. La longueur des tourbillons est décrite comme la longueur allant du point d'arrêt à l'aval du cylindre jusqu'à la fermeture des recirculations, la longueur « a » est mesuré horizontalement entre le point d'arrêt à l'aval du cylindre et le point 3, tandis que « b » est calculé par la distance verticale entre les deux points indiqués par 3.

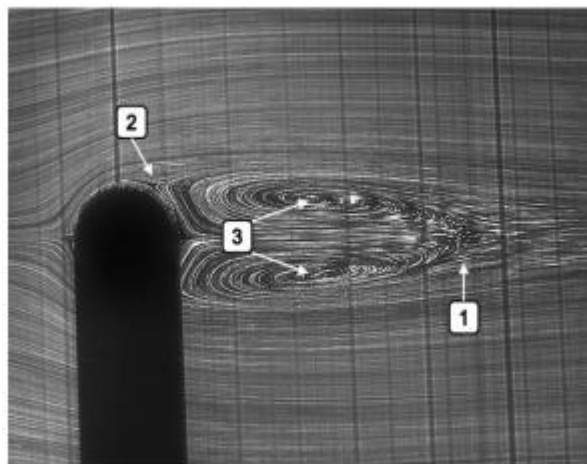


Figure 1.4 – Ecoulement laminaire. [29]

I.9.2. Différents régimes de l'écoulement :

Sur la base de ces différents travaux on peut citer les différents régimes d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds comme suite :

I.9.2.1. Régime d'écoulement rampant ($Re < 5$) :

Les effets visqueux sont dominants par rapport aux effets de l'inertie, l'écoulement est symétrique entre l'amont et l'aval et également par rapport à l'axe longitudinal du courant. Le fluide est attaché au cylindre et aucun décollement n'apparaît, et aucune instabilité ne se déclenche.

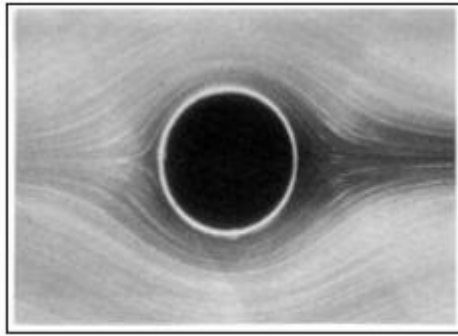


Figure 1.5 – Visibilité du cylindre fixe avec $Re : 0.16$

I.9.2.2. Régime laminaire stationnaire ($5 \leq Re \leq 48$) :

Les forces d'inertie augmentent et l'effet visqueux n'est plus assez grand, un décollement de la couche limite apparaît dans cette région. Il se forme, en aval du cylindre deux zones de recirculation contrarotatives symétriques comme le montre la figure I.6. Le point de rattachement s'éloigne du cylindre quand le nombre de Reynolds augmente. L'écoulement est stable, stationnaire et reste symétrique par rapport à l'axe longitudinal. NB : Le point de rattachement défini comme le lieu d'annulation de la vitesse longitudinale sur l'axe longitudinal.

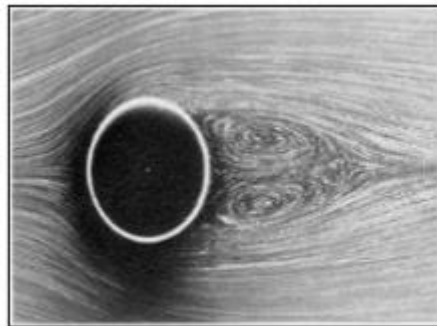


Figure 1.6 – Visibilité du cylindre fixe avec $Re : 26$

I.9.2.3. Instationnarités bidimensionnelles ($48 \leq Re \leq 180$) :

L'écoulement autour du cylindre est instationnaire. Les deux tourbillons perdent leur symétrie et l'écoulement devient instable. Les différentes sources de perturbations ne peuvent plus être amorties qui conduisent au déclenchement de l'instabilité de Von-Kármán, cette instabilité est de nature bi-dimensionnelle. Le sillage est périodique et l'écoulement demeure entièrement laminaire. Le paramètre adimensionnel relatif à la fréquence du lâcher tourbillonnaire est le nombre de Strouhal : $St = f \cdot D / U_{\infty}$. Sur l'intervalle de valeurs du nombre de Reynolds considéré, le nombre de Strouhal augmente avec le nombre de Reynolds.



Figure 1.7 – Visibilité du cylindre fixe avec $Re : 140$

I.9.2.4. Instationnarités tridimensionnelles et apparition de la turbulence ($180 \leq Re \leq 1200$) :

Pour $180 \leq Re \leq 300$, commence la transition vers le régime turbulent et l'écoulement dévient tridimensionnel. Un phénomène correspond au développement de l'instabilité secondaire présenté par la naissance de tourbillons longitudinaux ainsi qu'une ondulation des rouleaux de Von-Kármán dans le sens de l'envergure du cylindre. En fonction de la longueur d'onde de l'ondulation transversale des rouleaux, deux topologies tridimensionnelles distinctes dans le sillage, illustrées sur la figure I.8:

Le premier mode instable 3D est le mode A (voir figure I.8 (a)). Il a notamment été observé expérimentalement par Williamson [30]. Le nombre de Reynolds critique de ce mode correspondant à son seuil d'apparition se situe entre 150 et 190. Cette incertitude est sans doute due au fait que la transition est sous critique, et nécessite une amplitude minimum pour apparaître. Des précisions furent apportées par Barkley et al. [31]. Ils montrent à l'aide d'une analyse de Floquet que le nombre de Reynolds critique d'apparition du mode A est en fait: $Re = 188.5 \pm 1.0$. Elle est caractérisée par une longueur d'onde adimensionnée par le diamètre du cylindre $\lambda/D = 3.96 \pm 0.02$ qui est en accord avec les expériences et simulations numériques effectuées.

De plus d'après Williamson [30]. Lorsque le nombre de Reynolds dépasse 230, un second mode, appelé mode B apparaît (voir figure I.8 (b)). Ce mode avait également été prédit par l'analyse de Floquet effectuée par Barkley [31]. Il avait pu prédire le nombre de Reynolds critique $Re \approx 259$ et la longueur d'onde adimensionnée $\lambda/D \approx 0.82$ (longueur d'onde presque 4 fois plus petite que la longueur d'onde du mode A). Leweke et al. [32] montrent que le mode A et le mode B présentent des symétries différentes. En effet, les vortex longitudinaux tournent dans la direction opposée à chaque demi-longueur d'onde pour le

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

mode A. Pour le mode B, elles tournent dans la même direction. De plus le mode B est supercritique (Henderson [33]), c'est-à-dire qu'il apparaît à partir d'un certain nombre de Reynolds critique pour toute amplitude de perturbation appliquée à l'écoulement. Le mode B est présent avec le mode A jusqu'à $Re = 260$ et prédomine devant le mode A par la suite.



Figure I.8(a) : Ondulation des tourbillons de Von Karman pour le mode A, $Re = 220$, Braza et al. [34].

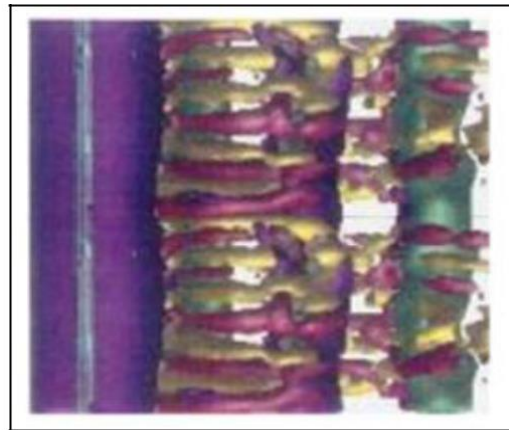


Figure I.8(b) : Visualisation du mode B, $Re = 270$, Persillon et Braza [35].

I.10. Transfert de chaleur :

I.10.1. Définition :

Le transfert de chaleur peut jouer un rôle important dans divers processus industriels. L'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermophysiques des fluides utilisés. La miniaturisation de nombreuses applications est tributaire de la possibilité d'évacuer de façon efficace les puissances thermiques dissipées au sein de ces appareillages.

Le développement considérable récent des recherches traitant des nanofluides est dû au fait qu'il est possible, pour certaines applications, d'accroître de façon appréciable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pure une faible concentration de nanoparticules.

Rappelons que les nanofluides sont des solutions colloïdales obtenues en dispersant dans un fluide de base des particules solides de taille nanométrique (10^{-9} m).

A très faible concentration, certaines de ces solutions se sont révélées très efficaces pour améliorer, sous certaines conditions les transferts de chaleur.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

I.10.2. Types de Transfert de chaleur :

I.10.2.1. Transfert de chaleur par convection :

La convection est le mode de transfert de chaleur qui se produit dans les fluides ou gaz. Elle intervient dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide en mouvement. On distingue deux types de convection.

Convection libre (naturelle) : au mouvement du fluide est causé par un champ de forces intérieures.

Convection forcée : provoquée par une force mécanique, circulation d'un fluide à l'aide d'une pompe dans les échangeurs de chaleur

I.10.2.2. Transfert de chaleur par conduction :

C'est le transfert de chaleur à l'intérieur d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sans l'influence d'une différence de température. La programmation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par électrons libres. Les nano fluides améliorent et amplifient la conductivité thermique.

La conductivité thermique, notée k ($W / m. K$), est la capacité d'un matériau de conduire ou de transmettre de la chaleur. La conductivité thermique par rapport aux les performances thermiques d'un fluide caloporteur est une propriété très importante. [36]

La loi de Fourier est la loi principale qui décrit le processus de dégagement de chaleur.

La relation est donnée comme suit :

$$\phi = -k. dT / dx \quad (I.1)$$

ϕ : Densité de flux thermique ($W.m^{-2}$).

k : Conductivité thermique du milieu ($W.m^{-1}.c^{o-1}$).

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

I.11. Le Magnétisme :

I.11.1. Généralités :

Le magnétisme représente un ensemble de phénomènes physiques dans lesquels les objets exercent des forces attractives ou répulsives sur d'autres matériaux. Les courants électriques et les moments magnétiques des particules élémentaires fondamentales sont à l'origine du champ magnétique qui engendre ces forces.

Tous les matériaux sont influencés, de manière plus ou moins complexe, par la présence d'un champ magnétique, et l'état magnétique d'un matériau dépend de sa température (et d'autres variables telles que la pression et le champ magnétique extérieur) de sorte qu'un matériau peut présenter différentes formes de magnétisme selon sa température.

I.11.2. Définition de Champ Magnétique :

le champ magnétique est une grandeur ayant le caractère d'un champ vectoriel, c'est-à-dire caractérisée par la donnée d'une norme, d'une direction et d'un sens, définie en tout point de l'espace et permettant de modéliser et quantifier les effets magnétiques du courant électrique ou des matériaux magnétiques comme les aimants permanents.

La présence du champ magnétique se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement (force de Lorentz) et par divers effets affectant certains matériaux (diamagnétisme, paramagnétisme, ferromagnétisme, etc.). La grandeur qui détermine l'interaction entre un matériau et un champ magnétique est la susceptibilité magnétique.

Les différentes sources de champ magnétique sont les aimants permanents, le courant électrique (c'est-à-dire le déplacement d'ensemble de charges électriques), ainsi que la variation temporelle d'un champ électrique (par induction électromagnétique).

I.11.3. L'effet du champ magnétique sur la génération d'entropie dans les nanofluides :

Il est clairement apparu que le champ magnétique et l'ondulation de la cavité ont une grande importance sur la performance des systèmes thermiques. Cette importance a motivé Cho [37] pour étudier l'influence d'un champ magnétique sur le transfert de chaleur par convection naturelle et la génération d'entropie du nanofluide Cu-eau dans une cavité à surfaces ondulées complexes.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.

Il a examiné les effets du nombre de Hartmann, le nombre de Rayleigh, le nombre d'Eckert, la fraction de volume des nanoparticules et des paramètres géométriques de la paroi ondulée sur le nombre de Nusselt, la génération d'entropie et le nombre de Bejan. Il a montré qu'à des valeurs plus élevées du nombre de Rayleigh, le nombre moyen de Nusselt diminue et la génération totale d'entropie augmente au fur et à mesure que le nombre de Hartmann augmente.

Toutefois, pour des faibles nombres de Rayleigh, le nombre de Hartmann a un effet mineur sur le nombre moyen de Nusselt et la production totale d'entropie. Ensuite, un effet de transfert de chaleur optimal et une génération d'entropie totale minimale peuvent être obtenus lorsqu'une longueur d'onde appropriée de la surface ondulée est appliquée à la cavité.

Le nombre moyen de Nusselt diminue et la génération d'entropie totale augmente avec une amplitude d'onde croissante de la surface ondulée lorsqu'un nombre de Rayleigh est élevé. Enfin, le nombre de Bejan diminue avec un nombre croissant d'Eckert, mais il augmente avec un nombre croissant de Hartmann [38].

I.11.4. Effet Magnus :

Le phénomène naturel exploité par Norsepower est un principe dénommé « effet Magnus », du nom du physicien allemand Heinrich Gustav Magnus, lequel a été le premier à décrire mathématiquement en 1852 le courant d'air qui entoure un objet en rotation, comme une balle de tennis par exemple.

La force de portance de l'effet Magnus dans ce qu'on appelle aujourd'hui un rotor Flettner a été adoptée comme mode de propulsion principal par le Buckau, un navire à rotors qui a traversé l'Atlantique en 1926. Une partie de la paternité de cette technologie revient également à l'ingénieur Finlandais Sigurd Savonius qui, en 1924, a créé et donné son nom à un rotor doté d'un cylindre ouvert à l'écoulement de l'air.

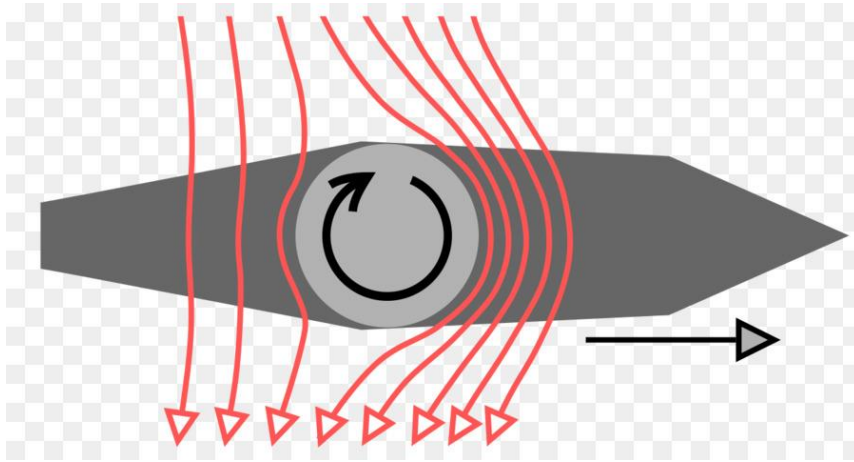


Figure I.9 : Rotor Flettner sur un navire. [39]

D'autre part, les éoliennes restent une application directe de l'effet Magnus; citons, entre autres, l'éolienne de Madaras et l'éolienne à rotors de Flettner. Ces éoliennes sont basées sur l'utilisation de l'effet MAGNUS. Le système est constitué de 2 cylindres rotatifs, dès qu'il y a du vent, la rotation de chaque cylindre est assurée par un moteur à courant continu.



Figure I.10–Prototype d'éolienne à rotors de Flettner.

CHAPITRE II :

FORMULES MATHÉMATIQUES

CHAPITRE II

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

II.1. Introduction :

Les transferts thermiques entre fluide et paroi revêtent une grande importance dans beaucoup de domaines tels que: la mécanique des fluides, l'énergie solaire, les systèmes d'isolation, ainsi que dans la conception des échangeurs de chaleur. Ils peuvent concerner également l'agroalimentaire et le biomédical. La forme des parois délimitant le domaine d'étude est variable, les parois peuvent être constituées par des plaques planes ou ondulées ou par des conduits cylindriques ou à section variable. Les études théoriques consistent à décrire l'écoulement et les transferts de chaleur en résolvant numériquement les équations de Navier-Stokes accouplées à l'équation de chaleur.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les géométries considérées et les équations mathématiques gouvernantes

II.2. Nombres sans Dimension :

II.2.1. Nombre de Reynolds : [40]

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

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (\text{II.1})$$

Où :

V : La vitesse moyenne [m/s].

L : La longueur caractéristique [m].

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

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

II.2.2. Nombre de Nusselt : [41]

Le nombre de Nusselt décrit le rapport entre l'échange par convection et celui de conduction dans la couche de fluide, il s'écrit :

$$Nu = \frac{qL}{K\Delta T} = \frac{hL}{K} \quad (\text{II.2})$$

Avec q , L , sont respectivement une densité de flux, une longueur caractéristique et une densité de flux de chaleur, h le coefficient de transfert de chaleur et K la conductivité thermique.

II.2.3. Nombre de Hartmann : [42]

Le nombre de Hartmann (H_a) caractérise le mouvement de fluides conducteurs en présence d'un champ magnétique. Il représente le rapport entre la force de Laplace et les forces visqueuses.

On le définit de la manière suivante :

$$H_a = BL_c \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \quad (\text{II.3})$$

avec :

B - champ magnétique.

L_c - longueur caractéristique.

μ - viscosité dynamique.

σ - conductivité électrique.

II.2.4. Nombre de Richardson : [43]

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta\Delta TD}{U_\infty^2} \quad (\text{II.4})$$

En régime anisotherme, on introduit le nombre de Richardson pour évaluer le rapport des forces de gravité aux forces d'inertie. Plus particulièrement, on considère trois types d'écoulement en fonction de ce nombre:

1. $Ri \leq 1$: les forces de gravité sont négligeables devant les forces d'inertie, on parle alors de convection forcée.

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

2. $Ri \approx 1$: les forces de gravités ont comparables aux forces d'inertie, on parle alors de convection mixte.

3. $Ri \geq 1$: les forces d'inertie sont négligeables devant les forces de gravité, on parle alors de convection naturelle.

II.2.5. Nombre de Rayleigh : [44]

Le nombre de Rayleigh (Ra) est un nombre sans dimension qui caractérise le transfert de chaleur au sein d'un fluide : inférieur à une valeur critique de l'ordre de 1 700, le transfert s'opère uniquement par conduction, tandis qu'au-delà de cette valeur c'est la convection libre ou naturelle qui devient prépondérante.

On peut définir le nombre de Rayleigh comme le produit du nombre de Grashof, reliant les effets de la force gravifique à la viscosité du fluide, et du nombre de Prandtl :

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta}{\nu\alpha} (T_s - T_\infty) L_c^3 \quad (\text{II.5})$$

Gr - nombre de Grashof.

Pr - nombre de Prandtl.

g - accélération de la pesanteur (m/s^2).

L_c - longueur caractéristique (m).

T_s - température de la paroi (K).

T_∞ - température du fluide loin de la paroi (K).

ν - viscosité cinématique (m^2/s).

α - Diffusivité thermique (m^2/s).

β - coefficient de dilatation thermique volumétrique (K^{-1}).

Le nombre de Péclet est défini de manière semblable au nombre de Rayleigh, mais le rapport concerne alors le transfert thermique par conduction et la convection forcée.

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

II.2.6. Nombre de Grashof : [45]

Le nombre de Grashof (Gr) caractérise la convection libre dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses.

On définit le nombre de Grashof de la manière suivante :

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T L_c^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

g - accélération de la pesanteur.

β - coefficient de dilatation.

ΔT - différence de température.

L_c - longueur caractéristique.

ρ - Masse volumique du fluide.

μ - viscosité dynamique.

Le nombre de Grashof permet donc de caractériser le transfert thermique dû au déplacement naturel d'un fluide.

II.2.7. Nombre de Prandtl : [46]

Le nombre de Prandtl (Pr) est le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement (viscosité cinématique) et celle de la chaleur (diffusivité thermique), défini comme :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ la viscosité cinématique ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$),

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ la diffusivité thermique ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$),

μ la viscosité dynamique (exprimée en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$),

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

ρ la masse volumique (en kg m^{-3}),

k la conductivité thermique, (en $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$),

c_p la capacité thermique massique à pression constante (en $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

II.3. Propriétés thermophysiques :

L'introduction de nanoparticules solides dans un fluide modifie ses propriétés physiques et en particulier sa conductivité et sa viscosité. Des corrélations semi empiriques ont été proposées [47] pour calculer la conductivité thermique d'un nanofluide. Cette conductivité dépend bien entendu de la nature de chacune des phases en présence, de la concentration volumique en nanoparticules dans le liquide porteur et de la température de l'ensemble. Nous avons retenu dans la suite de ce travail la corrélation proposée par Hamilton-Crosser [48].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_s)\phi}{k_s + (n-1)k_f + (k_f - k_s)\phi} \quad (\text{II.8})$$

Où k_{nf} , k_f et k_s désignent respectivement les conductivités thermiques du nanofluide, du fluide porteur et des particules solides et n le facteur de forme ($n = 3$) pour les particules sphériques et ϕ la concentration volumique des nanoparticules dans le fluide. On trouve également dans la littérature d'autres relations donnant la conductivité thermique de nanofluides spécifiques, en particulier le cas de l'eau avec des nanoparticules d' Al_2O_3 :

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = -13\phi^2 + 6.3\phi + 1 \quad (\text{II.9})$$

Pour la viscosité du nanofluide nous avons repris la relation donnée par Brinkman [49].

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (\text{II.10})$$

Ce n'est d'ailleurs pas la seule et on en trouve de nombreuses autres corrélations approximant de façon satisfaisante la viscosité du nanofluide dans certaines gammes de variation de la concentration volumique. Pack et Cho [50] ont obtenu une corrélation spécifique pour le nanofluide (eau + Al_2O_3):

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 39.11\varphi + 533.9\varphi^2) \quad (\text{II.11})$$

La masse volumique d'un nanofluide pour une température de référence donnée est calculé par :

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

et la capacité calorifique volumique du nanofluide est donnée par :

$$(\rho c_p)_{nf} = \varphi(\rho c_p)_s + (1 - \varphi)(\rho c_p)_f \quad (\text{II.13})$$

II.3.1. La Conductivité thermique (K) :

Un large éventail d'études expérimentales et théoriques a été mené dans la littérature pour modéliser la conductivité thermique des nanofluides. Les résultats existants étaient généralement basés sur la définition de la conductivité thermique efficace d'un mélange à deux composants. Le modèle Maxwell (1881) était l'un des premiers modèles proposés pour le mélange solide-liquide avec des particules relativement grandes. Il était basé sur la solution de l'équation de conduction de chaleur par une suspension aléatoire stationnaire de sphères.

II.3.1.1. Modèle de Maxwell :

Maxwell a dérivé une formule pour calculer la conductivité thermique effective de mixture solide liquide avec des particules sphériques (Maxwell, 1873) :

Le modèle de Maxwell [51] et ses dérivés sont probablement les plus largement utilisés dans la littérature. Ce modèle de base suppose que le fluide renferme plusieurs particules sphériques de même diamètre D_p et sont dispersées en faible concentration.

La formule de Maxwell est donnée par :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2\varphi(k_s - k_f)}{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_s - k_f)} \quad (\text{II.14})$$

Où : k_{nf} , k_f , k_s indiquent respectivement les conductivités thermiques du nanofluide, du fluide de base et des particules solides.

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

Remarque : Dans la relation (II.14), l'effet de la taille et la forme des particules n'est pas inclus dans l'analyse. Il convient aussi de noter que l'interaction entre les particules a été également négligée dans le calcul.

Hasselmann et Johnson [52] ont adapté le modèle de Maxwell en tenant compte de la résistance de Kapitza (R_k) :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s(1+2\beta)+2k_f+2\varphi[k_s(1-\beta)-k_f]}{k_s(1+2\beta)+2k_f+\varphi[k_s(1-\beta)-k_f]} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Avec : } \beta = \frac{2R_k k_f}{d_p}$$

Où :

d_p : Diamètre moyen d'une nanoparticule.

R_k : Résistance de Kapitza .

k_f : Conductivité thermique du fluide de base.

D'après Wilson et al. [53], la résistance de Kapitza entre les nanoparticules et le fluide de base est égale à $7.7 \times 10^{-9} \text{ Km}^2 \text{ W}^{-1}$.

II.3.1.2. Modèle de Hamilton-Crosser :

Ce modèle d'après Hamilton et Crosser [54], est dérivé de celui de Maxwell, incorpore un facteur de forme n pour prendre en compte la forme non-sphérique des particules. Ce facteur de forme empirique donné par : $n = \frac{3}{\psi}$. Tel que (ψ) est un facteur géométrique appelé sphéricité. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule.

La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s+(n-1)k_f-(n-1)(k_f-k_s)\varphi}{k_s+(n-1)k_f+(k_f-k_s)\varphi} \quad (\text{II.16})$$

Quand $n = 3$ on retrouve le cas des particules sphériques. Le cas $n = 6$ correspond à des particules cylindriques.

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

II.3.1.3. Modèle de Yu et Choi :

Yu et Choi [55] ont proposé un modèle modifié plus complexe que le modèle de Hamilton-Crosser, qui tient compte de l'effet d'interface entre les particules et le fluide de base.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi} \quad (\text{II.17})$$

Où β est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules. Ce modèle n'est valable que pour les particules de forme sphérique.

II.3.1.4. Modèle de Bruggeman :

Bruggeman [56], a proposé un modèle implicite qui permet de prévoir la conductivité thermique des nanofluides sans limitation sur la concentration volumique. Ce modèle suppose des particules de forme sphérique. Ce modèle a un bon accord avec certains résultats expérimentaux.

$$k_{nf} = \frac{1}{4} [(3\varphi - 1)k_s + (2 - 3\varphi)k_f] + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta} \quad (\text{II.18})$$

Avec
$$\Delta = [(3\varphi - 1)^2 (k_s/k_f)^2 (2 - 3\varphi)^2 + 2(2 + 9\varphi - 9\varphi^2)(k_s/k_f)]$$

Ce modèle ne tient pas compte ni de la taille des particules ni leur forme.

II.3.1.5. Modèles tenant compte du mouvement brownien :

Le mouvement brownien est une description mathématique des déplacements aléatoires des nanoparticules au sein du liquide de base. Ce mouvement est causé par les collisions avec les molécules du liquide de base qui se déplacent dans toutes les directions sous l'effet de l'excitation thermique.

Il s'avère que le mouvement Brownien des nanoparticules est trop lent pour transporter une quantité de chaleur notable à travers un nanofluide. Toutefois, ce mouvement peut jouer un rôle indirect pour produire une convection autour des nanoparticules qui sert à augmenter le transfert de chaleur.

Koo et Kleinstreuer [57] ont proposé un modèle modifié plus complexe que le modèle de Maxwell. Dans ce modèle ils ont supposé que la conductivité thermique soit composée de deux termes. Le premier, dit statique, et le deuxième est lié au mouvement brownien.

$$k_{nf} = k_{statique} + k_{brownien} \quad (II.19)$$

$$k_{statique} = k_f \frac{k_s + 2k_f - 2(k_f - k_s)\varphi}{k_s + 2k_f + 2(k_f - k_s)\varphi} \quad (II.20)$$

$$k_{brownien} = \frac{k_B T}{3\pi\mu_f d_s} \quad (II.21)$$

Où :

k_B : la constante de Boltzmann,

μ_f (Pa.s) : la viscosité dynamique du fluide de base,

d_s (nm) : le diamètre de la nanoparticule.

II.3.2. la fraction volumique (φ):

La fraction volumique est un rapport sans dimension entre deux volumes, le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base). La valeur de la fraction volumique est variée entre 0 (fluide de base pure) et 1.

La fraction volumique est donnée par la relation suivant [58]:

$$\varphi = \frac{\text{volume solide}}{\text{volume total du nanofluide}} = \frac{V_s}{V_f + V_s} \quad (II.22)$$

Où

V_s : Volume des nanoparticules solides (m³).

V_f : Volume du fluide de base (m³).

II.3.3. La chaleur massique (C_p) :

La chaleur massique ou la chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $C_p = \frac{dQ}{m \cdot dT}$. La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée.

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on peut citer les deux modèles suivantes :

II.3.3.1. Modèle de Pak et Cho :

Pak et Choi [59] ont utilisé la formule suivante :

$$(Cp)_{nf} = (1 - \varphi)(Cp)_f + \varphi(Cp)_s \quad (\text{II.23})$$

II.3.3.2. Modèle du Xuan et Roetzel :

Xuan et Roetzel (2000) ont utilisé la formule suivante :

$$(\rho Cp)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho Cp)_f + \varphi(\rho Cp)_s \quad (\text{II.24})$$

II.3.4. La masse volumique (ρ) :

La détermination de la masse volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique à une température donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange.

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

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (\text{II.25})$$

A partir de la relation (II.25), on déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (\text{II.26})$$

Où

ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules.

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

II.3.5. Viscosité dynamique (μ) :

La viscosité peut être définie comme étant une propriété d'un fluide pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement. On peut donc parler de la viscosité comme étant une mesure du frottement interne d'un fluide.

Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé. La dispersion des nanoparticules dans un liquide a un effet sur la viscosité dynamique de ce dernier. La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nanofluide qui peut être influencé énormément par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide de base et de la température.

Cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité du fluide de base et la fraction volumique du nanofluide. Pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes :

II.3.5.1. Modèle d'Einstein :

La viscosité dynamique d'un nanofluide est donnée par Einstein [60] pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivantes :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\varphi) \quad (\text{II.27})$$

Où

μ_{nf} : La viscosité dynamique du nanofluide.

μ_f : La viscosité dynamique du fluide de base.

φ : La fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation est valable juste pour $\varphi = 0.03$

II.3.5.2. Modèle de Brinkman :

Cependant, Brinkman [61] a étudié la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (\text{II.28})$$

CHAPITRE II : FORMULES MATHÉMATIQUES

Remarque : Pour les faibles fractions volumiques, la relation de Brinkman conduit exactement à celle d'Einstein. Ces relations n'intègrent pas les effets du mouvement Brownien ni ceux de la taille des particules.

II.3.6. Coefficient d'expansion volumique (β) :

Pour calcul la valeur de ce coefficient pour les nanofluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides et par analogie avec la relation (II.26), on déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad (\text{II.29})$$

Où

β_{nf} : Le coefficient de dilatabilité du nanofluide.

β_f : Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

β_s : Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

CHAPITRE III :

LA MANIPULATION AVEC LE LOGICIEL ANSYS FLUENT

CHAPITRE III

III.1. Présentation de ANSYS :

ANSYS est un logiciel de simulation numérique utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits.

Les utilisateurs ANSYS sont de domaines industriels différents telles que la construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de consommation.

III.2. ANSYS Fluent :

Fluent est un logiciel de modélisation en mécanique des fluides. est intégré dans la suite de logiciels de simulation ANSYS.

L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (Reynolds stress...) , combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres.



III.3. Matière utilisée pour la simulation :

Les oxydes métalliques ont été largement utilisés comme phase solide pour la formulation de nanofluides en raison de leurs avantages tels qu'une densité relativement plus faible, une stabilité chimique et une facilité de préparation.

Les interactions physico-chimiques entre les nanoparticules d'oxyde métallique et les molécules du fluide de base jouent un rôle important dans la détermination de la conductivité thermique et de la viscosité des dispersions colloïdales. Par conséquent, les propriétés thermophysiques souhaitables des nanofluides peuvent être obtenues en élaborant les interactions entre les nanoparticules d'oxyde métallique et les molécules de fluide de base en adoptant une stratégie de formulation appropriée.

Dans cette étude on s'intéresse principalement aux nanoparticules d'oxyde de magnésium (MgO) avec l'eau grâce à leurs propriétés thermophysiques importantes, ainsi qu'aux bonnes propriétés magnétiques du magnésium. Le tableau suivant nous montre leurs propriétés thermophysiques :

Tableau III.1 : Propriétés Thermophysiques de l'eau et de MgO

	C_p (J/kg.K)	K (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	μ (Pa.s)	β (10 ⁻⁶ /K)
MgO	765	46	3600	/	6.3
Eau	4179	0.6	997.1	0.001003	210

III.4. Propriétés de Nanofluide :

III.4.1. Prenant $\phi=0.00$:

La conductivité thermique K_{nf} :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2(k_f - k_s)\phi}{k_s + 2k_f + (k_f - k_s)\phi} \quad (III.1)$$

$$k_{nf} = k_f = 0,6 \text{ W/m.K}$$

La viscosité dynamique μ_{nf} :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (III.2)$$

CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT

$$\mu_{nf} = \mu_f = 0,001003 \text{ Pa.s}$$

La masse volumique ρ_{nf} :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (\text{III.3})$$

$$\rho_{nf} = \rho_f = 997,1 \text{ Kg/m}^3$$

La chaleur massique $(Cp)_{nf}$:

$$(Cp)_{nf} = (1 - \varphi)(Cp)_f + \varphi(Cp)_s \quad (\text{III.4})$$

$$(Cp)_{nf} = (Cp)_f = 4179 \text{ J/Kg.K}$$

Coefficient d'expansion volumique B_{nf} :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad (\text{III.5})$$

$$\beta_{nf} = \beta_f = 210 \cdot 10^{-6} / \text{K}$$

III.4.2. Prenant $\varphi=0.02$:

La conductivité thermique K_{nf} :

$$k_{nf} = 0,635306 \text{ W/m.K}$$

La viscosité dynamique μ_{nf} :

$$\mu_{nf} = 0,000955 \text{ Pa.s}$$

La masse volumique ρ_{nf} :

$$\rho_{nf} = 1049,158 \text{ Kg/m}^3$$

La chaleur massique $(Cp)_{nf}$:

$$(Cp)_{nf} = 4110,72 \text{ J/Kg.K}$$

Coefficient d'expansion volumique B_{nf} :

$$\beta_{nf} = 205,925 \cdot 10^{-6} / \text{K}$$

III.5. Début de la simulation :

Notre travail a été fait avec un PC de spécifications suivantes : Un processeur i5-2500 avec 8GB de RAM et une carte graphique Nvidia GT 1030. FLUENT était installé sur un SSD.

CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT

Cette manipulation est construit en 4 parties principales : Géométrie, Maillage, Configuration et Solution. Les résultats seront adressés dans le Chapitre IV.

III.5.1. Géométrie :

On commence par définir le milieu étudié, c'est un espace en 2D de forme rectangulaire de longueur 1m et de largeur 0,5m. A l'intérieur on a le cylindre représenté par un cercle de diamètre 0.01m (Figure III.1).



Figure III.1 : Esquisse d'espace de travail.

On termine par définir la surface créée en allant à **Concept>Surfaces à partir d'esquisses** et sélectionner notre esquisse dans le plan XY. On appuie sur **généraliser** pour avoir la forme finale (Figure III.2).

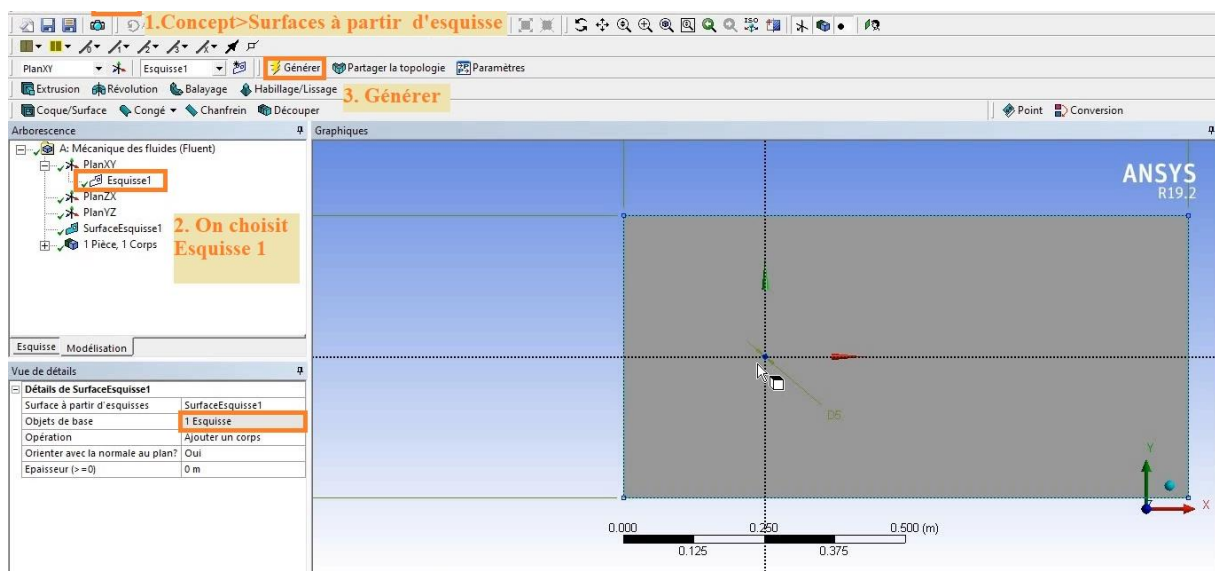


Figure III.2 : Forme finale de surface.

CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT

III.5.2. Maillage :

Le maillage généré avec les paramètres par défaut du logiciel ne convient pas à notre étude (voir la Figure III.3). Donc on va tous d'abord changer la méthode en **Triangles**, et on ajoute un dimensionnement sur le cylindre avec une taille d'éléments de $2e-4$ m.

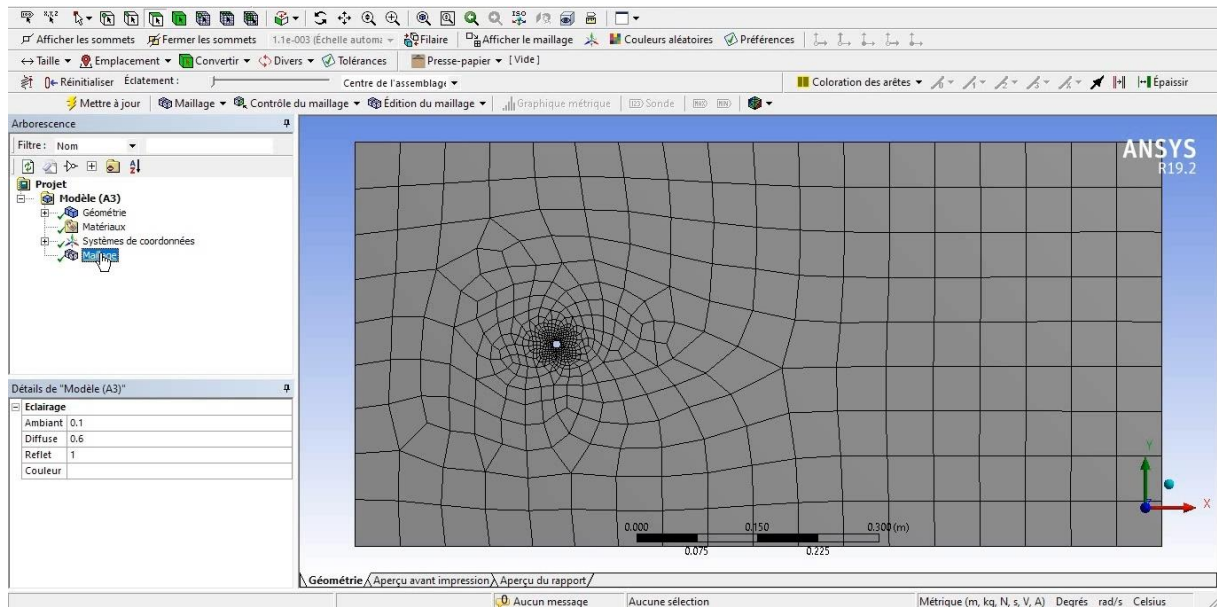


Figure III.3 : Maillage avec les paramètres par défaut.

Ensuite on insère un inflation limité par le cylindre, on choisit **Épaisseur de la première couche** comme option d'inflation et on définit la hauteur de première couche par $2e-3$ m et le nombre max. des couches par 60. On clique sur **Mettre à jour** et on obtient la Figure III.4.

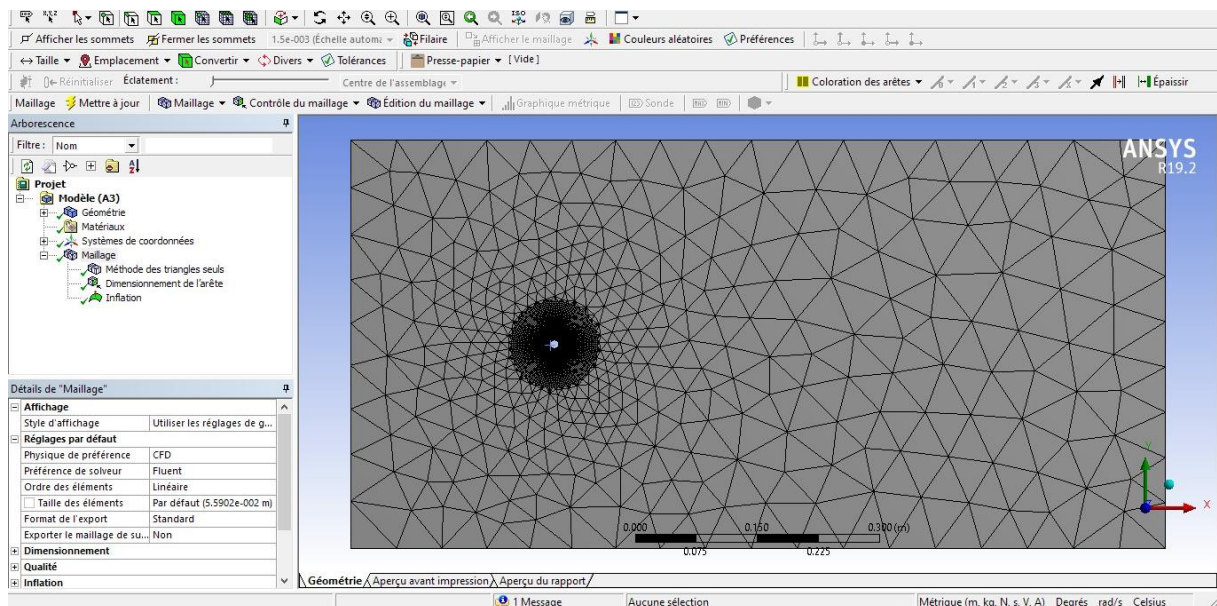


Figure III.4 : Maillage après changement de méthode.

CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT

Maintenant on change la taille des éléments de notre maillage en $3e-3m$ et le mettre à jour pour avoir la Figure III.5.

La Figure III.6 est simplement un zoom sur ce maillage.

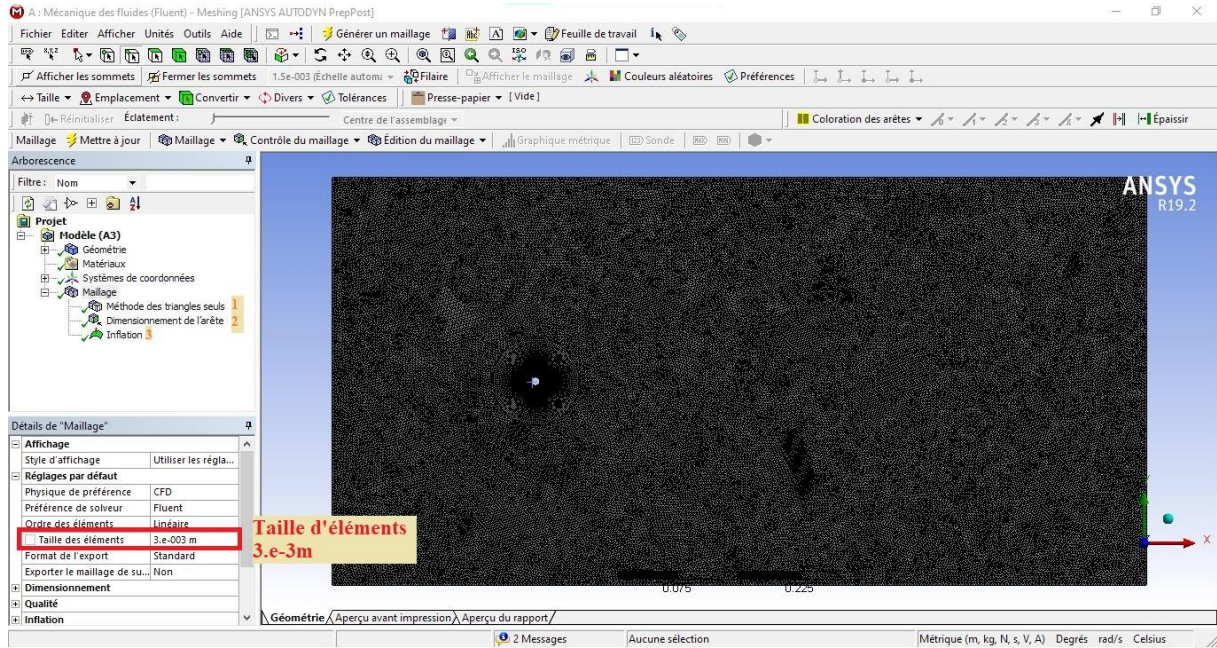


Figure III.5 : Maillage après changement de taille d'éléments.

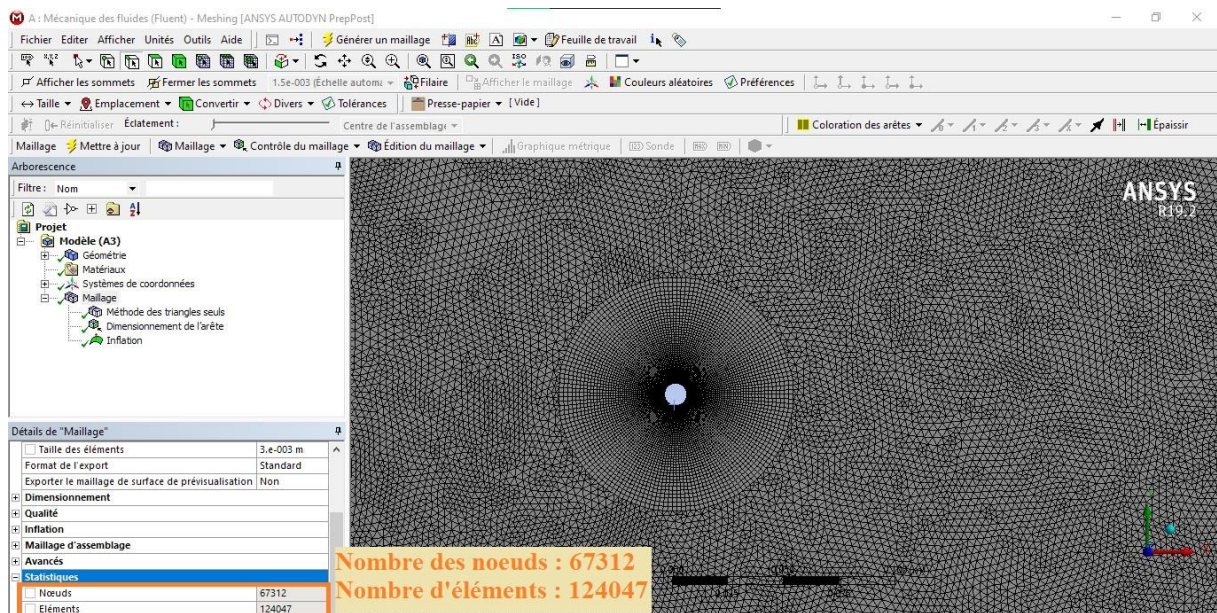


Figure III.6 : Zoom sur le maillage précédent.

Ce maillage a été réalisé en 20 secondes. Le nombre d'éléments atteint 124 047 tandis que le nombre de nœuds est 67 312.

CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT

Finalement on définit les paramètres suivants : INLET, OUTLET, CYLINDRE, SYMMETRIE (Figure III.7), met à jour et ferme la fenêtre Maillage.

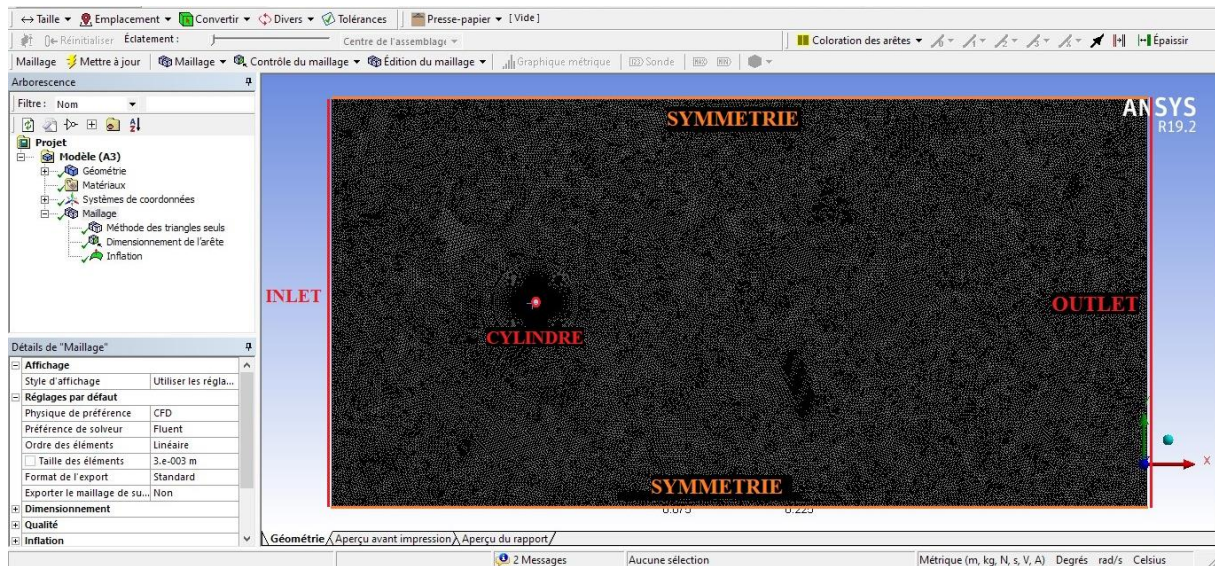


Figure III.7 : Les paramètres : inlet, outlet, cylindre et symmetrie.

III.5.3. Configuration :

Avant de commencer il faut changer les paramètres de Fluent Launcher comme affiché dans la Figure III.8 et on clique sur OK.

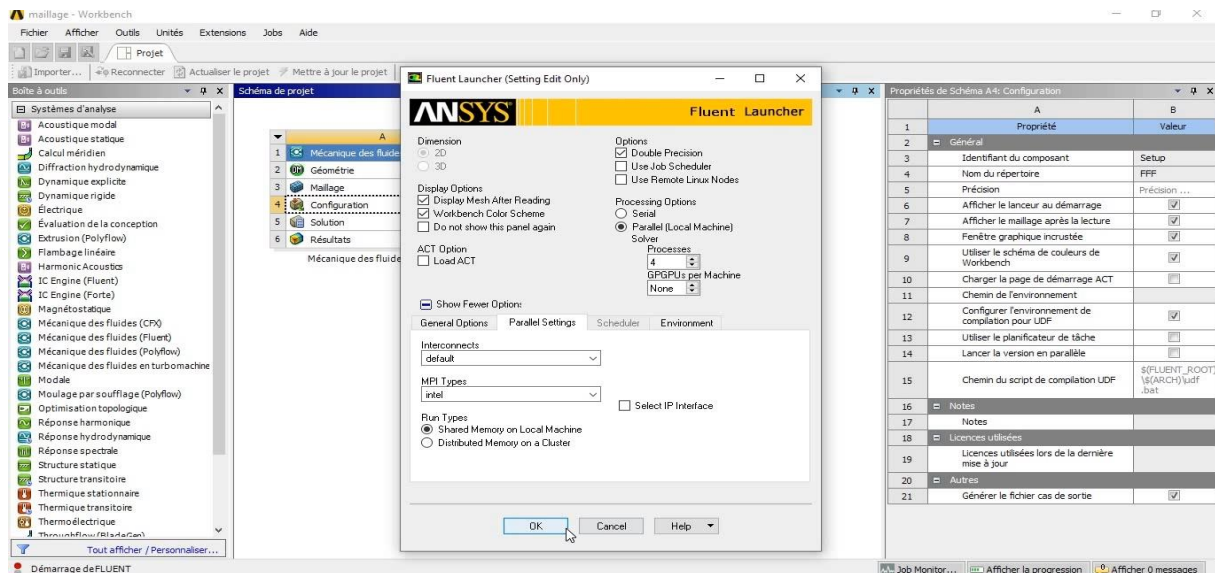


Figure III.8 : Configuration de Fluent Launcher.

Une nouvelle fenêtre s'ouvre. On clique sur **Models>Energy** et on coche sur **Energy Equation** (Figure III.9).

CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT

Ensuite on définit notre nanofluide en allant à **Materials>Fluid** et on ajoute nos paramètres (Figure III.10). On sélectionne notre nanofluide dans **Cell Zone Conditions**.

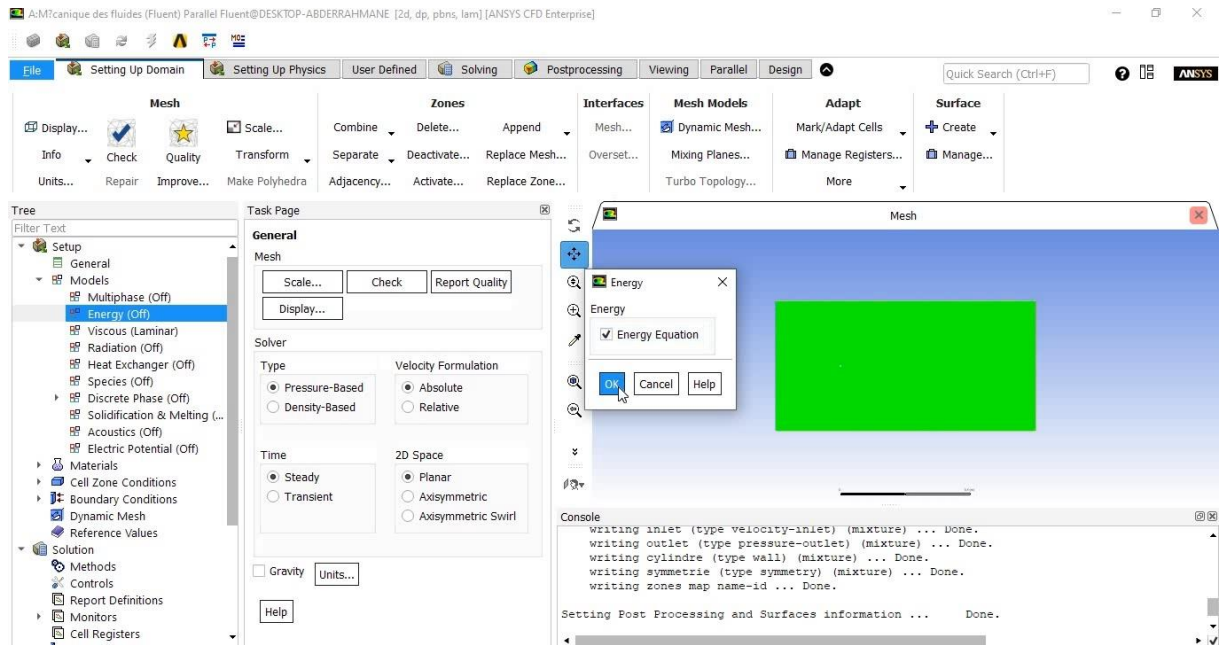


Figure III.9 : Sélection de module Energy Equation.

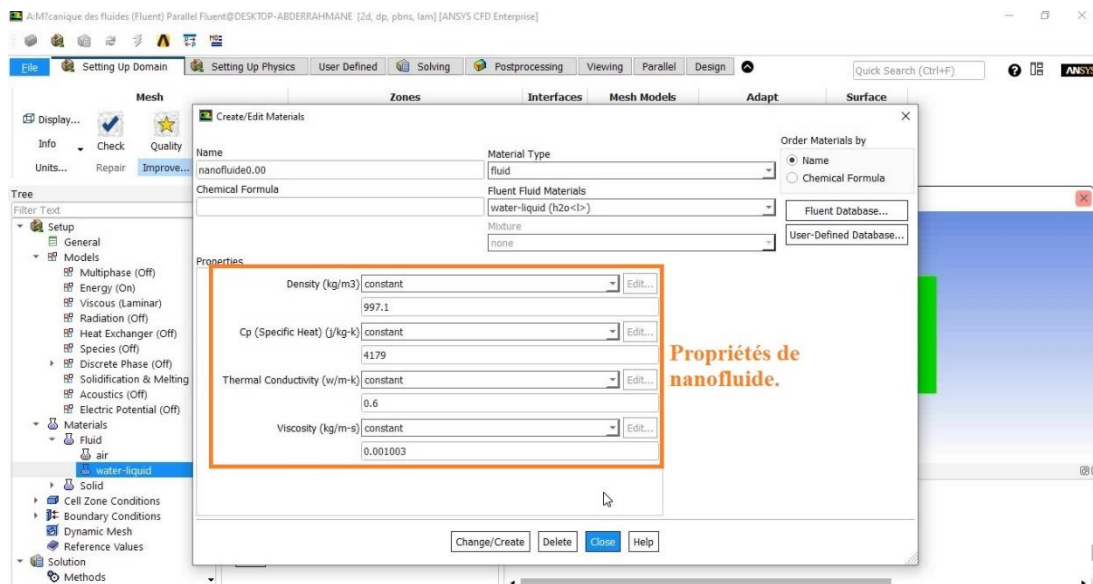


Figure III.10 : Propriétés de nanofluide.

Maintenant on clique sur **Boundary Conditions>cylindre** et on change la température à 302°K. Ensuite à inlet pour changer la vitesse sur l'axe X, et cela dépend du nombre de Reynolds et les propriétés du nanofluide choisi selon l'équation suivante :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}, \text{ alors: } V = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot L}$$

CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT

La Figure III.11 montre la vitesse choisie pour $Re=40$ et $\phi=0.00$.

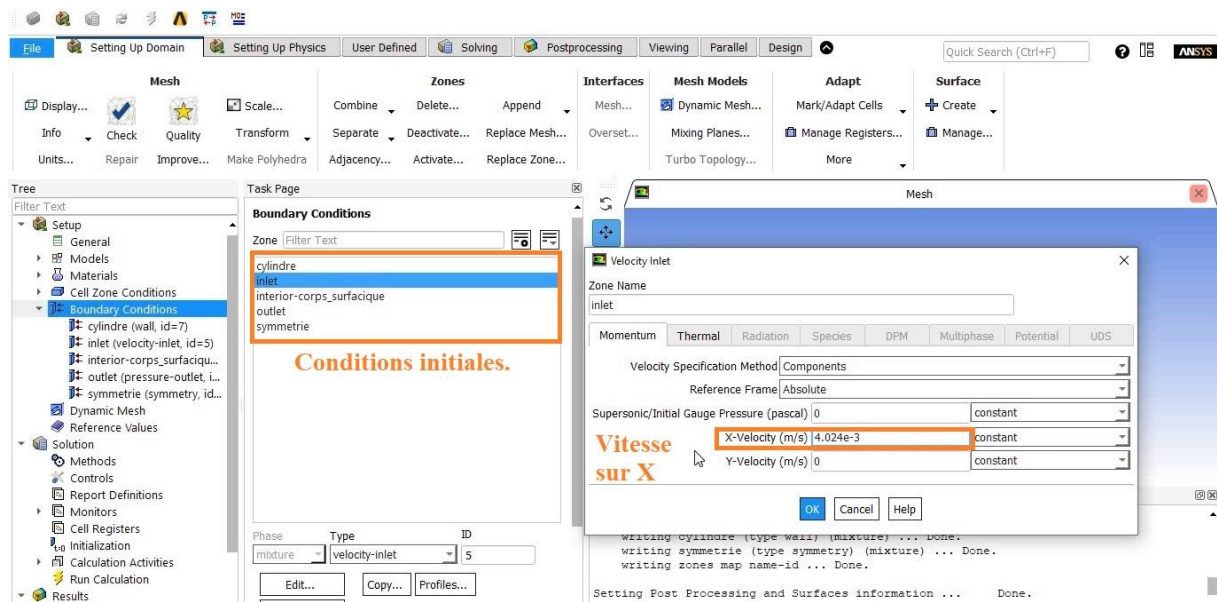


Figure III.11 : Insertion de la vitesse d'entrée (pour $Re=40$ et $\phi=0.00$).

Après la vitesse on passe à *outlet* pour assurer que la température est $300^{\circ}K$ et que le type de cette condition est *pressure-outlet*.

Ensuite à *Reference Values* pour changer les paramètres comme affiché dans la Figure III.12.

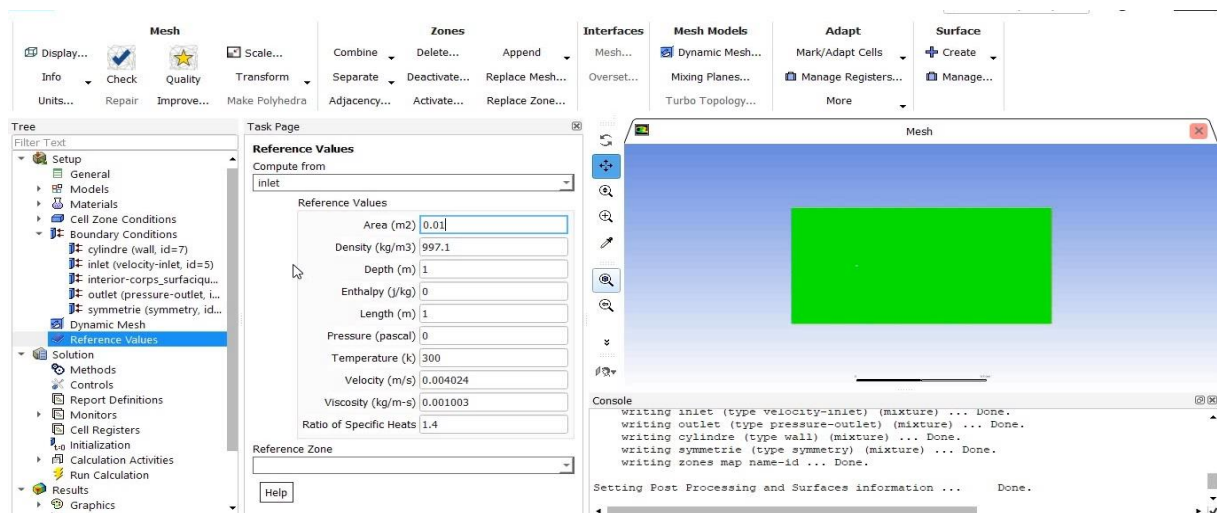


Figure III.12 : Les valeurs de référence.

Maintenant on ajoute le module de magnétisme MHD en cliquant sur la console et en tapant *define/models/addon-module*. On choisit 1 pour le module MHD, ensuite on clique *Models>MHD Model*.

CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT

Dans la fenêtre *External Field B0* on définit notre champ magnétique B (Figure III.13), qui l'on déduit par l'équation de Hartmann :

$$H_a = BL_c \sqrt{\frac{K}{\mu}}, \text{ alors: } \mathbf{B} = \frac{H_a}{L_c} \sqrt{\frac{\mu}{K}}$$

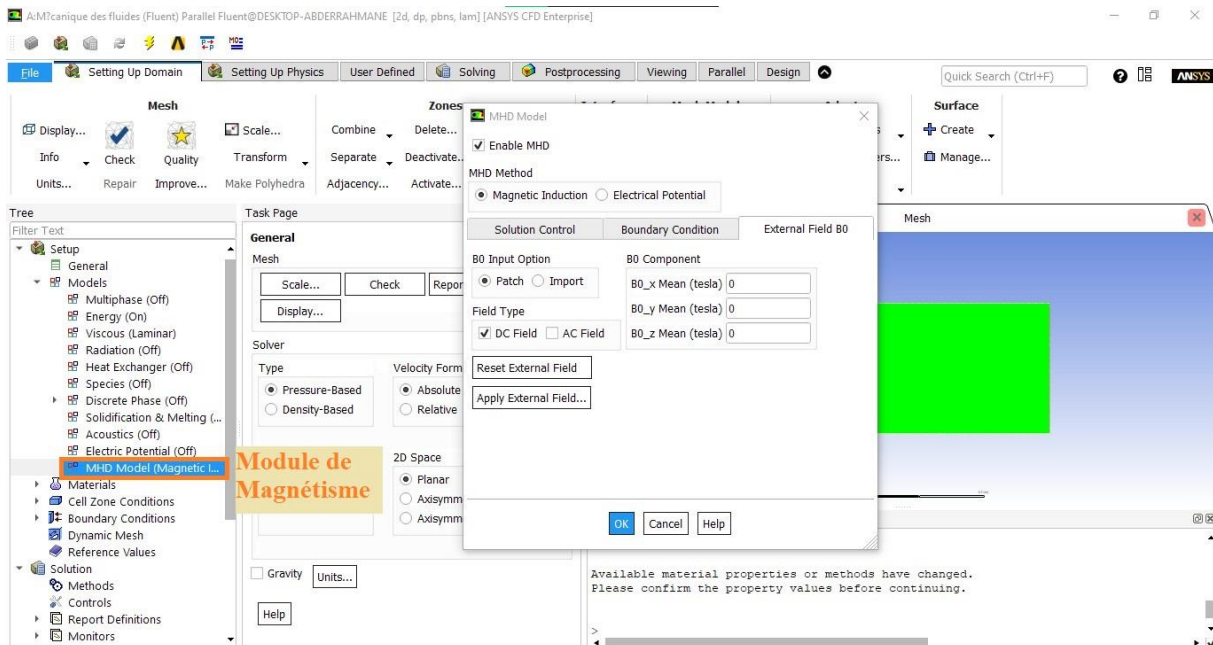


Figure III.13 : Insertion de champ magnétique avec le module MHD.

On clique sur OK et voilà nous en avons fini avec la Configuration. Sans fermer la fenêtre on passe au Solution.

III.5.4. Solution :

La méthode utilisée pour faire la solution est la méthode SIMPLE.

Tous d'abord on ajoute un rapport de glissement sur le cylindre appelé **Cd** en allant au *Report Definitions* puis appuyant sur *New>Force Report>Drag...* on choisit *Drag Coefficient* comme type et *cylindre* comme zone et on l'appelle **cd** (Figure III.14).

On coche aussi les options *Report File*, *Report Plot* et *Print to Console* pour sauvegarder les statistiques du graphe.

CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT

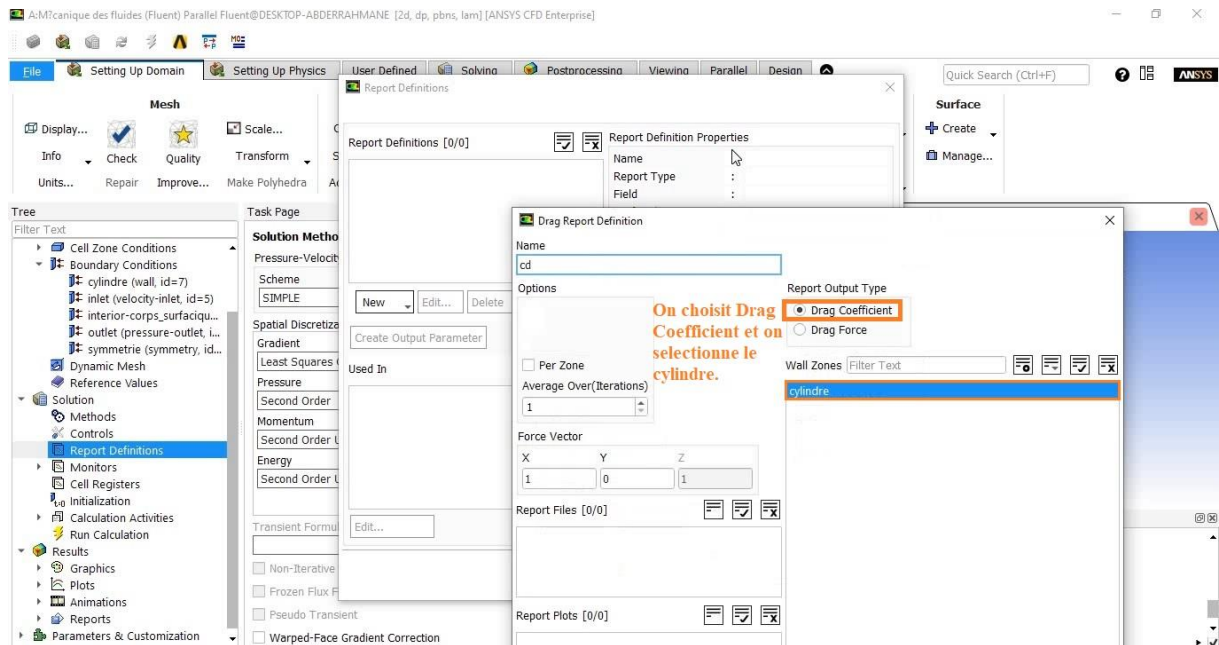


Figure III.14 : Définition de cd (Drag Coefficient).

Maintenant à **Monitors>Residual** pour changer les valeurs **Absolute Criteria** à $10e-5$ (Figure III.15)

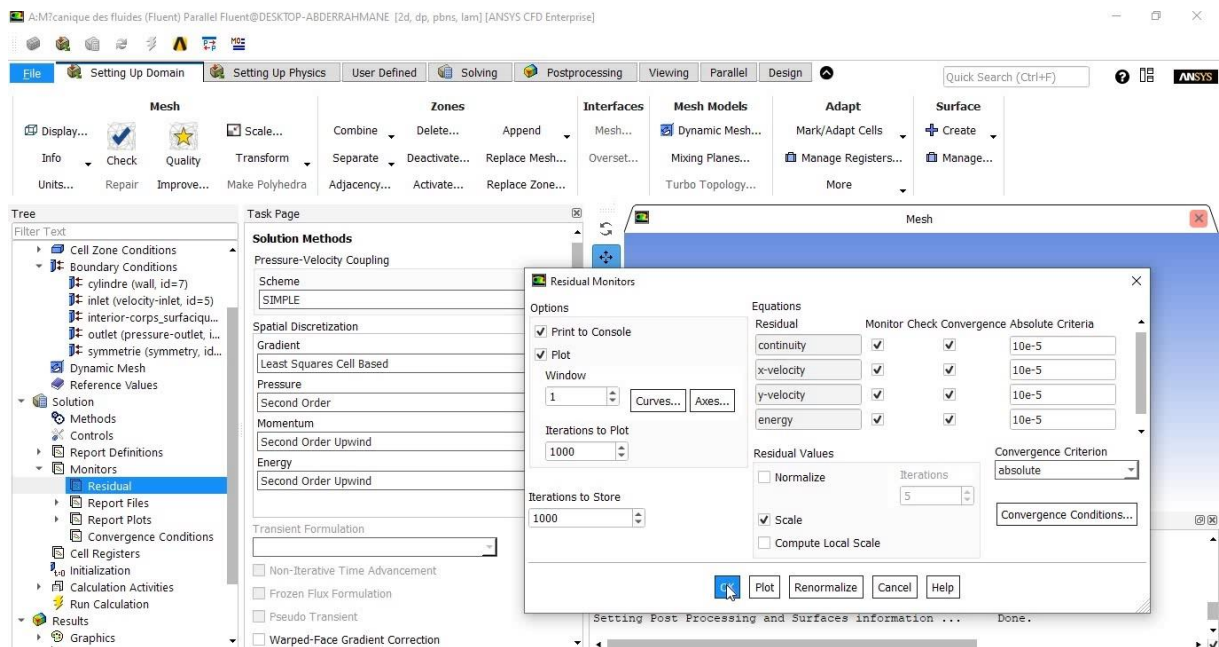


Figure III.15 : Définition des valeurs de convergence pour les graphes : Continuity, X-velocity, Y-velocity et energy.

On passera après à l'initialisation où on choisit **Hybrid Initialization** et on initialise.

Ensuite on clique sur **Run Calculations>Data File Quantities** et on sélectionne les paramètres suivantes (Figure III.16) :

CHAPITRE III : MANIPULATION AVEC ANSYS FLUENT

- ✓ Static Pressure.
- ✓ Pressure Coefficient.
- ✓ Velocity Magnitude.
- ✓ Stream Function.
- ✓ Velocity Angle.
- ✓ Skin Friction Coefficient.
- ✓ Surface Heat Transfer Coef.
- ✓ Surface Nusselt Number.
- ✓ Surface Stanton Number.

On change le nombre d'itérations à 10000000 et on commence le calcul.

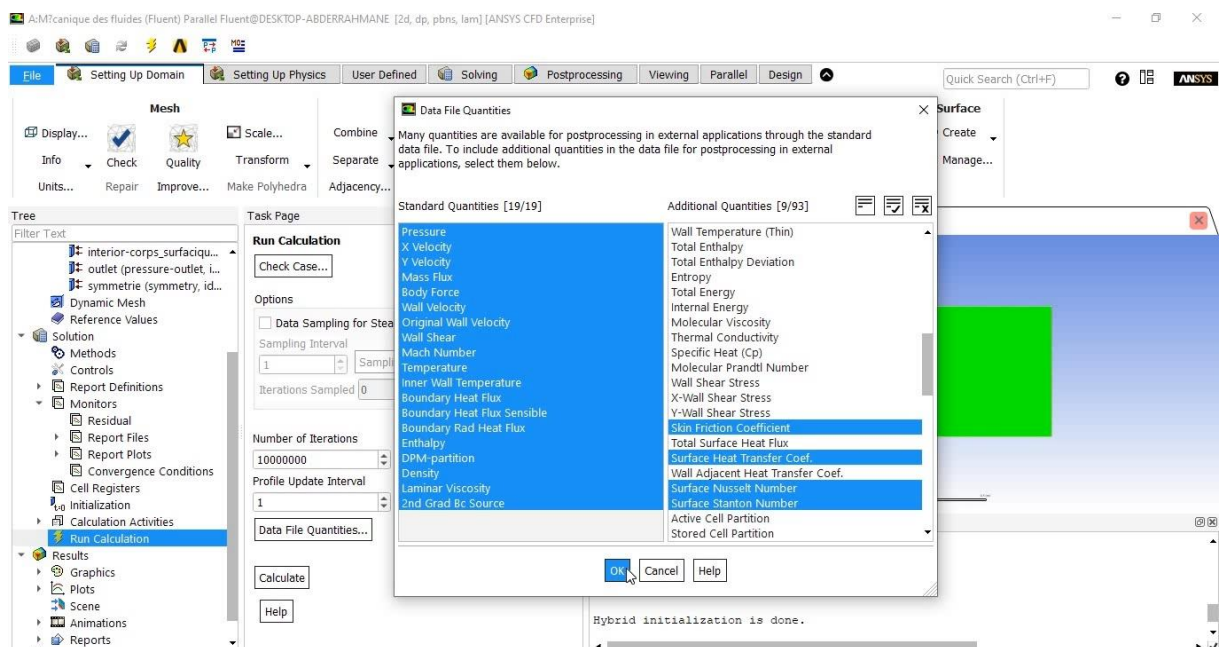


Figure III.16 : Choix des quantités à traiter.

Avec ça on est fini avec le Chapitre III, maintenant au Chapitre IV pour analyser et comparer les résultats.

CHAPITRE IV :

RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE IV :

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. L'étude de Magnétisme :

La convection naturelle d'un cylindre chauffé et remplie de MgO en présence d'un champ magnétique est examiné.

Cette étude a été réalisée pour les paramètres suivants :

- Nombre de Rayleigh du fluide de base.
- Nombre de Hartmann.
- Coefficient du déviation de phase.
- Fraction volumique de nanoparticules.

IV.2. Première Partie ($\gamma = 0$) :

a) $Ra = 7.10^3$; $Ha = 25$:

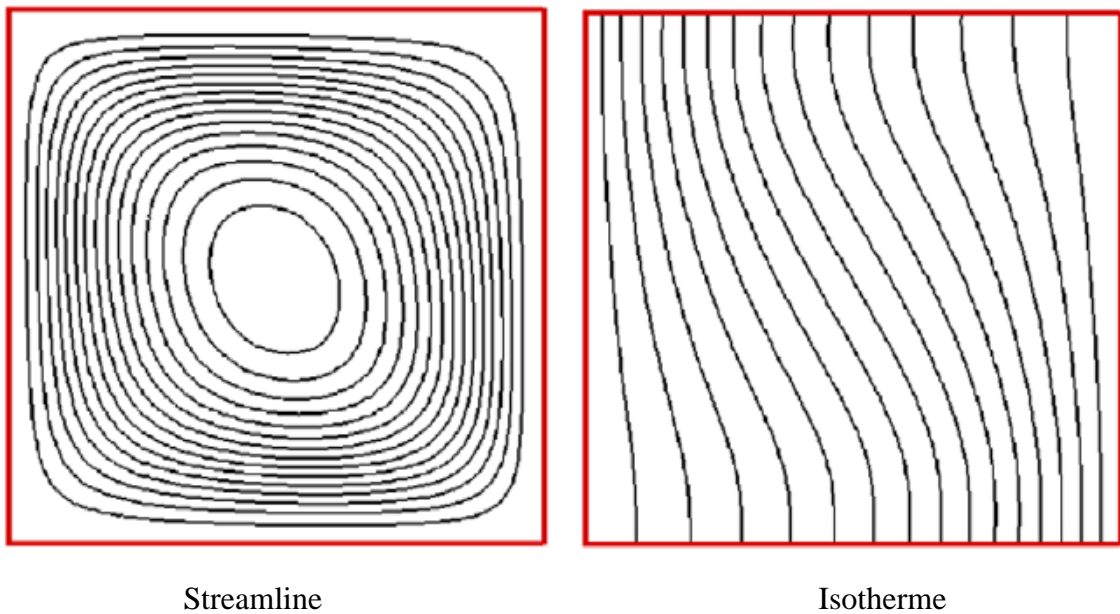


Figure IV.1: Simulation avec $Ra=7.10^3$, $Ha=25$.

b) $Ra=7.10^5$; $Ha=100$:

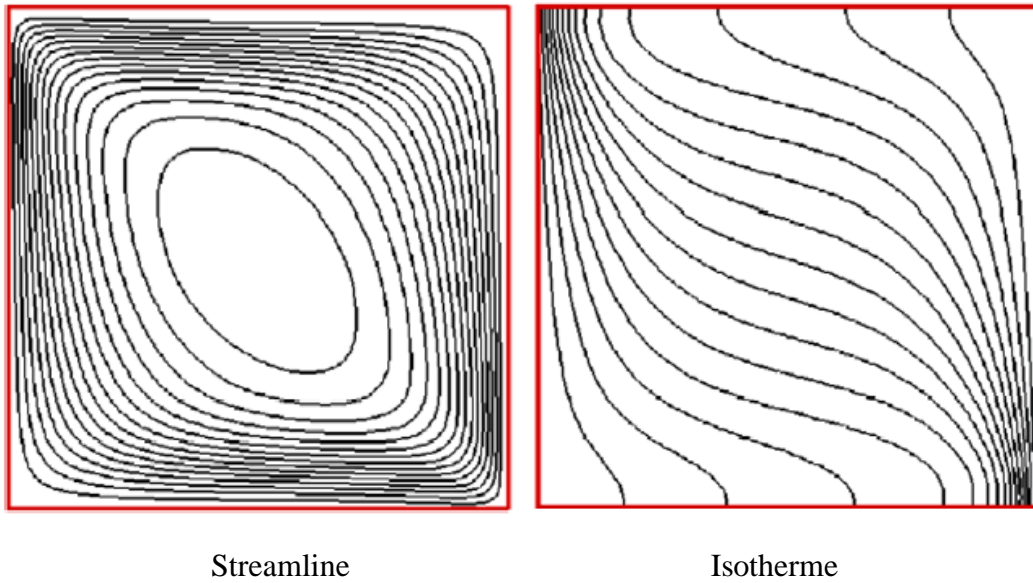


Figure IV.2: Simulation avec $Ra=7.10^5$, $Ha=100$.

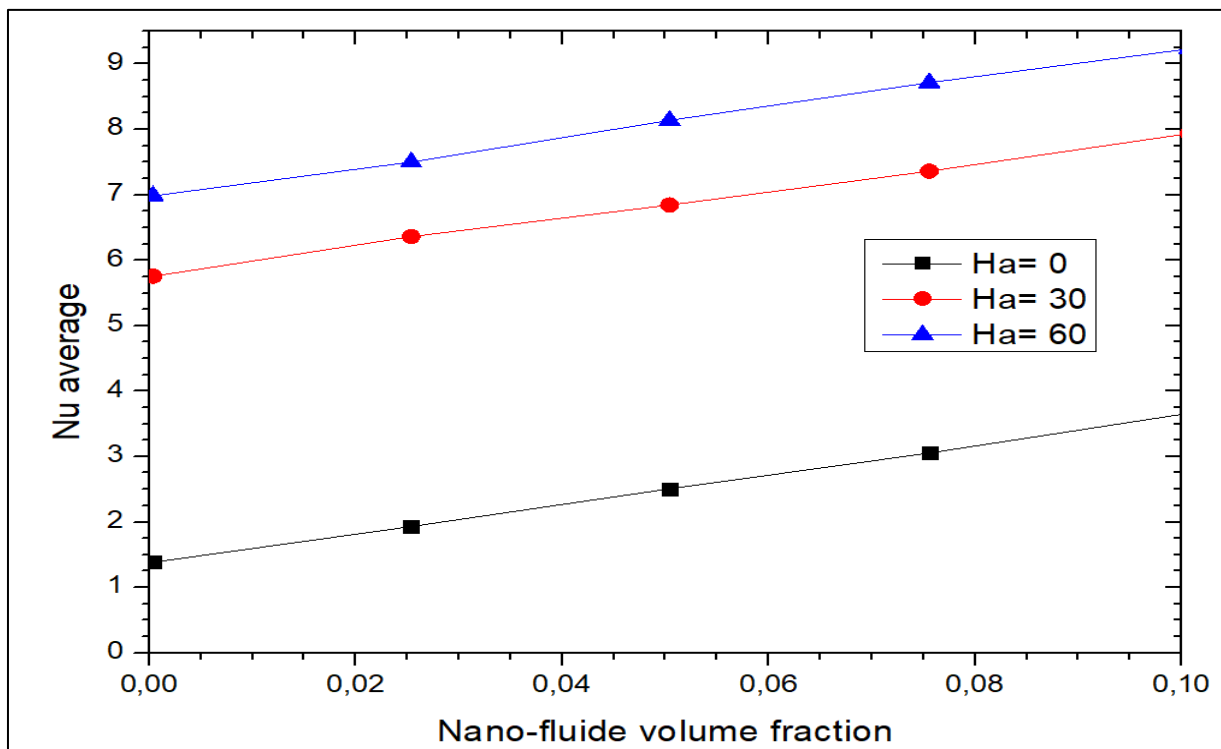


Figure IV.3 : Exemple d'études paramétriques dans le présent calcul, diagramme du nombre Nu moyen en fonction de la fraction volumique de nanofluide pour divers nombres Ha et à $Re = 250$.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

La Figure IV.3 montre la variation du nombre Nu moyen du cylindre horizontal avec la fraction volumique nanofluide (ϕ) pour différents nombres de Hartmann $Ha=0, 30$ et 60 dans $Re H=250$.

Comme le montre cette figure, à mesure que les fractions volumiques de nanofluide augmentent, le nombre moyen de Nu augmente, car la conductivité thermique du nanofluide augmente. En outre, cette figure montre qu'à mesure que le nombre Ha augmente, le nombre Nu moyen augmente, car un champ magnétique est appliqué.

Par conséquent, la vitesse d'écoulement augmente près des surfaces chaudes. À mesure que le gradient de vitesse augmente, le gradient de température augmente également, ce qui, à son tour, améliore l'échange de chaleur entre les parois horizontales et le flux central.

IV.3. Deuxième partie (γ se varie) :

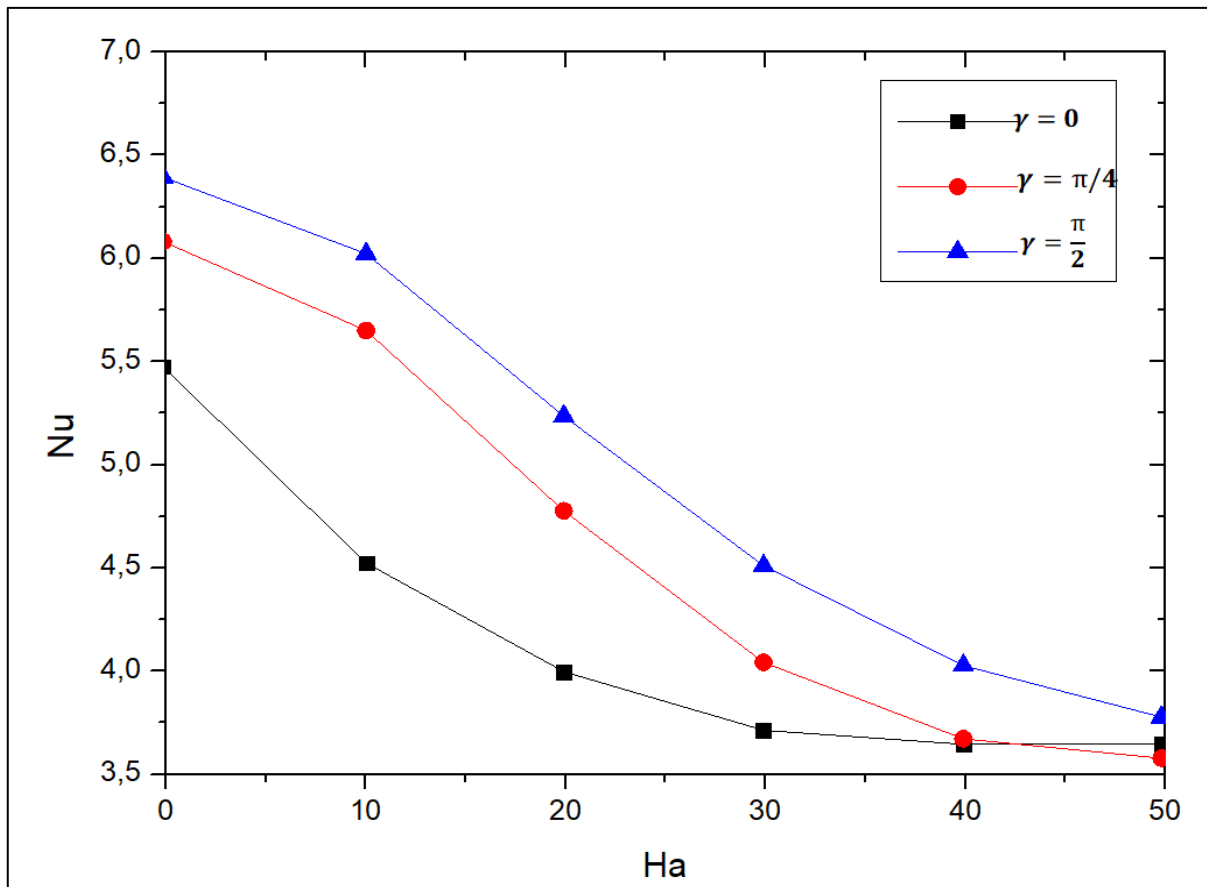


Figure IV.4 : Variation du nombre de Nusselt avec le nombre de Hartmann pour différents phase déviation pour $Ra=5.10^4$ et $\phi=0$.

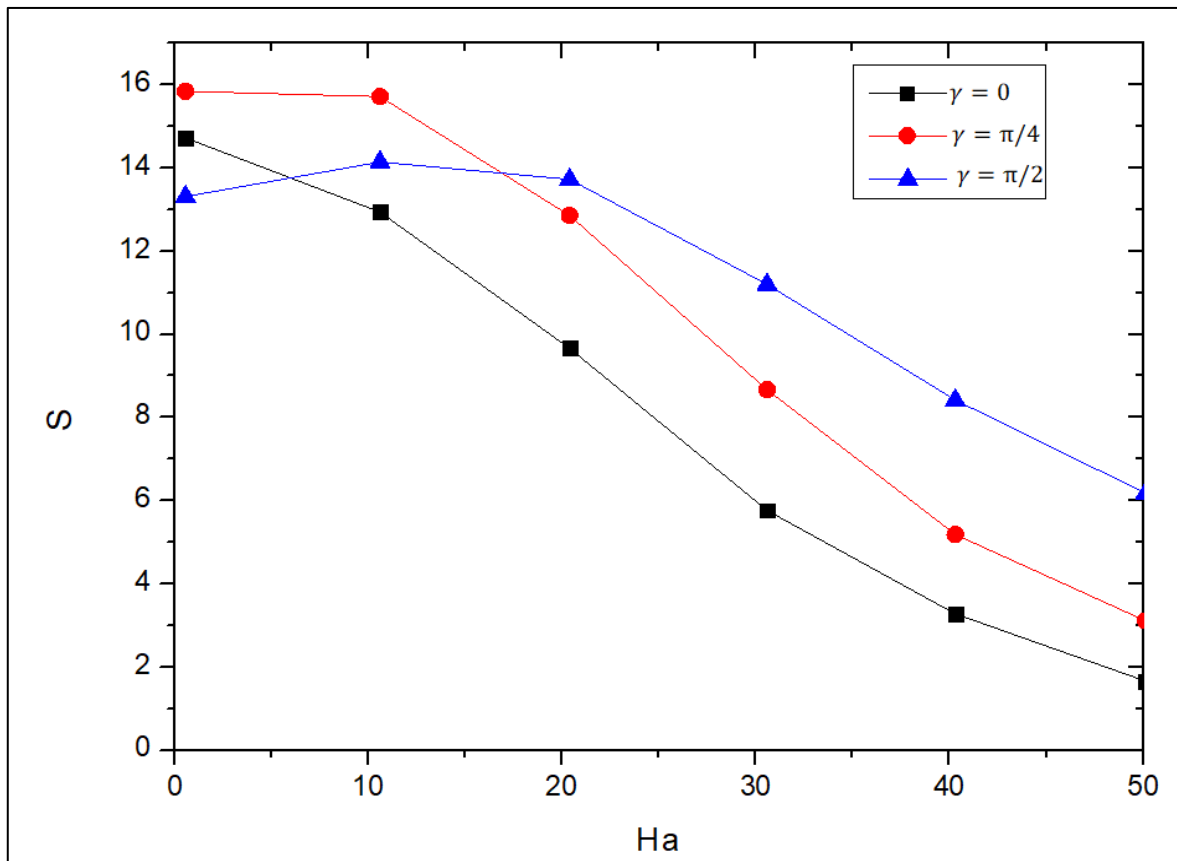


Figure IV.5 : Génération d'entropie avec le nombre de Hartmann pour différents phase déviation pour $Ra=5 \cdot 10^4$ et $\varphi=0$.

Les Figures IV.4 et IV.5 illustrent que l'augmentation du nombre de Hartmann diminue le taux de transfert de chaleur et la génération d'entropie.

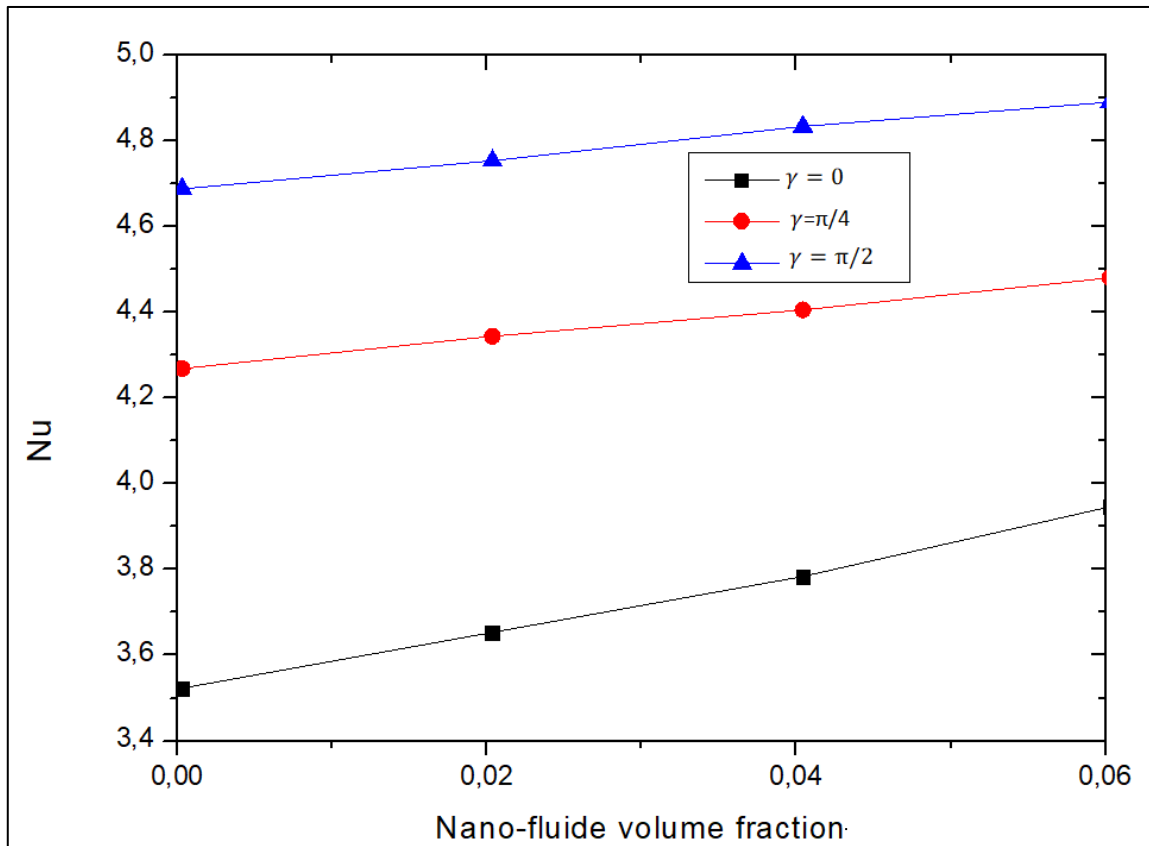


Figure IV.6 : Variation du nombre de Nusselt avec ϕ et γ pour $Ra=5.10^4$ et $Ha=20$.

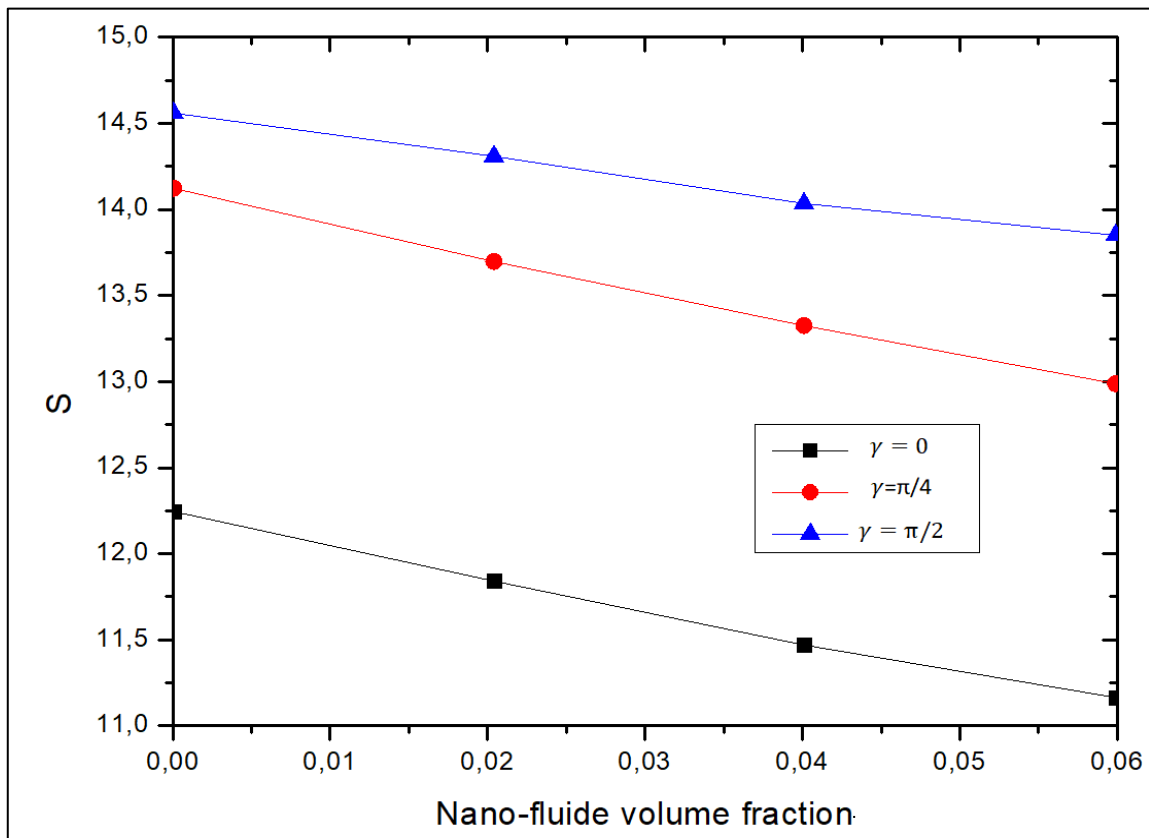


Figure IV.7 : Génération d'entropie avec ϕ et γ pour $Ra=5.10^4$ et $Ha=20$.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

La Figure IV.6 montre l'effet de la fraction du solide pour plusieurs phase déviation sur le nombre de Nusselt et la génération d'entropie pour $Ha=20$ et $Ra=5.10^4$.

On remarque que le taux de transfert de chaleur augmente avec ϕ alors que l'effet contraire se produit pour la génération d'entropie (Figure IV.7).

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail de thèse nous avons mené une étude théorique et numérique en vue de quantifier l'importance du transfert de chaleur par convection autour d'un cylindre fixe .

Nous avons utilisé un nanofluide de type (**MgO + eau**). Nous avons supposé que le nanofluide peut être assimilés à un fluide homogène. Il est vrai que l'addition de nanoparticules dans l'eau pure augmente sa conductivité thermique et donc améliore le transfert de chaleur par conduction dans les nanofluides comparé au transfert de chaleur par conduction dans le fluide de base. La structure de sillage derrière un cylindre circulaire avec la présence des nanoparticules a été calculée pour un écoulement bidimensionnel, en utilisant le logiciel Fluent. Des calculs ont été effectués pour nombres de Reynolds compris entre **5** et **48**.

Le coté de transfert de chaleur, l'étude numérique quant à elle a révélé que les nanofluides sont effectivement supérieurs au fluide caloporteur traditionnel et qu'ils accroissent très rapidement les transferts thermiques pour le cylindre fixe. Mais le nombre de Nusselt normalisé décroît proportionnellement avec e taux de rotation et le nombre de Reynolds.

Une étude paramétrique sur l'effet de la fraction volumique de nanofluide et de la force magnétique (nombre Ha) sur l'amélioration de l'échange de chaleur entre un conduit isotherme et le flux central a été étudiée dans cet étude. Il est observé que la présence de champ magnétique et l'ajout de nanoparticules au fluide pur peuvent améliorer considérablement l'échange de chaleur entre la cylindre et l'écoulement.

Dans les applications industrielles à des fins de refroidissement ou de chauffage, les Seaways peuvent aider les fabricants à améliorer leur efficacité sans augmenter la surface de l'échangeur de chaleur. Les valeurs quantitatives sont données ci-dessous :

- On observe que l'ajout de **10 %** de nanoparticules (ici du cuivre) peut augmenter l'échange thermique jusqu'à **26 %** dans le **ReH=250** par exemple.
- On observe que la présence d'un champ magnétique avec **Ha=30** dans un fluide pur peut améliorer l'échange de chaleur jusqu'à **50%** dans **ReH=250** par exemple.
- On observe que la présence de champ magnétique et de nanofluide a des effets incrémentiels sur l'échange de chaleur entre les parois chaudes et le flux de cœur. Par exemple avec **Ha=30** et **0.1**, le Nu moyen peut augmenter jusqu'à **76%** en **ReH=250**.
- En augmentant **ReH** de **50** à **1000**, le nombre moyen de **Nu** peut augmenter.

CONCLUSION GENERALE

Les effets du nombre de **Rayleigh**, nombre de **Hartmann** et la déviation de phase sur le taux de transfert de chaleur et l'entropie génération ont été analysé avec la méthode de Lattice Boltzmann. Les résultats trouvés sont résumés comme suivant :

- Le taux de transfert de chaleur augmente avec le nombre de Rayleigh et diminue avec le nombre de Hartmann.
- Le taux de transfert de chaleur augmente avec la déviation de phase.
- L'addition des nanoparticules diminue la génération d'entropie.

D'autres recherches théoriques et expérimentales sont nécessaires afin d'être en mesure d'utiliser les nanofluides pour l'amélioration du transfert de chaleur par convection.

Bibliographie

- [1] **S. U. S. Choi and J. A. Eastman**, “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles.” Oct. 01, 1995.
- [2] **S. U. S. Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood, and E. A. Grulke**, “Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 14, pp. 2252–2254, Oct. 2001, doi: 10.1063/1.1408272.
- [3] **J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. J. Thompson**, “Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 6, pp. 718–720, Feb. 2001, doi: 10.1063/1.1341218.
- [4] **P. Keblinski, J. A. Eastman, and D. G. Cahill**, “Nanofluids for thermal transport,” *Mater. Today*, vol. 8, no. 6, pp. 36–44, Jun. 2005, doi: 10.1016/S1369-7021(05)70936-6.
- [5] **Y. Yang, Z. G. Zhang, E. A. Grulke, W. B. Anderson, and G. Wu**, “Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 6, pp. 1107–1116, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.038.
- [6] **W. Daungthongsuk and S. Wongwises**, “A critical review of convective heat transfer of nanofluids,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 5, pp. 797–817, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2005.06.005.
- [7] **P. Vadasz**, “Heat conduction in nanofluid suspensions,” *J. Heat Transfer*, vol. 128, no. 5, pp. 465–477, May 2006, doi: 10.1115/1.2175149.
- [8] **M. F. A. DAAS, S. DERFOUF, N. BELGHAR**, “Simulation numérique de l’échange thermique dans une enceinte rectangulaire,” *Third Int. Conf. Energy, Mater. Appl. Energ. Pollution.*, no. ICEMAE p 2016.
- [9] **Z. B. et R. S. k. Najid, F. Dahami**, “Modélisation de l’échange thermique par convection naturelle de nano fluide (Cu-eau) dans une enceinte à paroi ondulée,” *13ème Congrès de Mécanique*.
- [10] **S. Tabet**, “Etude numérique de la convection naturelle dans une enceinte fermée partiellement chauffée,” Université d’Oran 2, 2017.
- [11] **KROUMA Saadia**, “Influence de la géométrie des nanoparticules dans un nano fluide sur le transfert thermique,” Université de Khider Mohamed Biskra, 2017.
- [12] **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,” *Mater. Lett.*, vol. 58, no. 9, pp. 1461–1465, Accessed: May 20, 2021. [Online]. Available: https://www.academia.edu/22368750/Effect_of_structural_character_of_gold_nanoparticles_in_nanofluid_on_heat_pipe_thermal_performance
- [13] **C. . lind and K. . huang Tseng S.C**, “heat transfer enhancement of naofluids in Rotary

- Blade Coupling of new correlations,” *I.J.of Heat Mass Transf.*, pp. 4675–4682, 2009.
- [14] **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.
- [15] **S. M. You, K. J.H, and K. K.H**, “Effet of Nanoparticules on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer,” *Appl. Phys. Lett.* 83, pp. 3374–3376, 2003.
- [16] **V. P, R. Kumar, and Malasekera**, “An Introduction to computational Fluid Dynamics,” *J. Thermophys. Heat Transf.*, no. 13, pp. 407–411, 2004.
- [17] **J. A, R. Scholz, W. P, H. FaMng, and R. Felix**, “Magnetic Fluid Hypothetmia (MFH):Cancer Treatment With AC Magnetic Field Induced Excitation of Biocompatible Superparamagnetic Nanopaticules,” *J. Magn. Magn.*, no. 201, pp. 413–419, 1999.
- [18] **A. Maouassi**, “Intensification des échanges de chaleur par l’utilisation des nanofluides,” 2012. Accessed: May 20, 2021. [Online]. Available: <http://192.168.100.2:8080/handle/123456789/1948>
- [19] **I. C. Bang and S. Heung Chang**, “Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nano-fluids from a plain surface in a pool,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 12, pp. 2407–2419, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.047.
- [20] “<http://www.cooling-masters.com/articles-46-1.html>.” <http://www.cooling-masters.com/articles-46-1.html>
- [21] **J. Gruss, P. Ribeiro, and J. A.**, “Nanofluides pour les applications thermiques,” *Tech. l’ingénieur*, vol. 33, pp. 1 – 9, 2010.
- [22] **H. Sakuma and K. Ishii**, “Gas flow sputtering: Versatile process for the growth of nanopillars, nanoparticles, and epitaxial thin films,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 7, pp. 872–875, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.jmmm.2008.11.053.
- [23] **Y. Singh, J. R. N. Javier, S. H. Ehrman, M. H. Magnusson, and K. Deppert**, “Approaches to increasing yield in evaporation/condensation nanoparticle generation,” *J. Aerosol Sci.*, vol. 33, no. 9, pp. 1309–1325, 2002, doi: 10.1016/S0021-8502(02)00072-1.
- [24] **D. K. Lee, Y. H. Kim, X. L. Zhang, and Y. S. Kang**, “Preparation of monodisperse Co and Fe nanoparticle using precursor of M²⁺-oleate₂ (M = Co, Fe),” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 6, no. 4, pp. 786–790, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.cap.2005.04.040.
- [25] **M. H. U. Bhuiyan, R. Saidur, M. A. Amalina, R. M. Mostafizur, and A. K. M. S. Islam**, “Effect of nanoparticles concentration and their sizes on surface tension of nanofluids,” in *Procedia Engineering*, 2015, vol. 105, pp. 431–437. doi: 10.1016/j.proeng.2015.05.030.
- [26] **R. Benoit et al.**, “Optimisation of the surface properties of SBA-15 mesoporous silica for in-situ nanoparticle synthesis,” *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 120, no. 1–2, pp. 2–6, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.micromeso.2008.12.017.

- [27] “Properties: Magnesia - Magnesium Oxide (MgO) Properties & Applications.” <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=54> (accessed Nov. 14, 2021).
- [28] “Properties of water at atmospheric pressure - The Engineering Mindset.” <https://theengineeringmindset.com/properties-of-water-atmospheric-pressure-saturated-liquid/> (accessed Nov. 14, 2021).
- [29] **H. Ozogul**, “Écoulements de fluides à seuil autour d’un cylindre en milieu confiné : études expérimentale et numérique,” *http://www.theses.fr*, Feb. 2016, Accessed: May 28, 2021. [Online]. Available: <http://www.theses.fr/2016GREAI005>
- [30] **C. H. K. Williamson**, “Vortex dynamics in the cylinder wake,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 28, pp. 477–539, Nov. 1996, doi: 10.1146/annurev.fl.28.010196.002401.
- [31] **D. Barkley and R. D. Henderson**, “Three-dimensional Floquet stability analysis of the wake of a circular cylinder,” *J. Fluid Mech.*, vol. 322, pp. 215–241, 1996, doi: 10.1017/S0022112096002777.
- [32] **T. Leweke and C. H. K. Williamson**, “Three-dimensional instabilities in wake transition,” *Eur. J. Mech. B/Fluids*, vol. 17, no. 4, pp. 571–586, Jul. 1998, doi: 10.1016/s0997-7546(98)80012-5.
- [33] **R. D. Henderson**, “Nonlinear dynamics and pattern formation in turbulent wake transition,” *J. Fluid Mech.*, vol. 352, pp. 65–112, Dec. 1997, doi: 10.1017/S0022112097007465.
- [34] **M. Braza, D. Faghani, and H. Persillon**, “Successive stages and the role of natural vortex dislocations in three-dimensional wake transition,” *J. Fluid Mech.*, vol. 439, pp. 1–41, Jul. 2001, doi: 10.1017/S002211200100458X.
- [35] **H. Persillon and M. Braza**, “Physical analysis of the transition to turbulence in the wake of a circular cylinder by three-dimensional Navier-Stokes simulation,” *J. Fluid Mech.*, vol. 365, pp. 23–88, Jun. 1998, doi: 10.1017/S0022112098001116.
- [36] **S. Halelfadl**, “Caractérisation des propriétés thermo-physiques et d’échanges de chaleur des nanofluides à base de nanotubes de carbone,” INSA de Rennes, 2014. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127363>
- [37] **C. C. Cho**, “Influence of magnetic field on natural convection and entropy generation in Cu-water nanofluid-filled cavity with wavy surfaces,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 101, pp. 637–647, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.044.
- [38] **M. A. Sheremet, H. F. Oztop, I. Pop, and K. Al-Salem**, “MHD free convection in a wavy open porous tall cavity filled with nanofluids under an effect of corner heater,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 103, no. 103, pp. 955–964, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.006.
- [39] “Rotor Flettner sur un navire.” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnus_Effect_at_Flettner_Rotor_Boat.svg#/media/File:Magnus_Effect_at_Flettner_Rotor_Boat.svg
- [40] “Nombre de Reynolds — Wikipédia.” https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Reynolds (accessed Jul. 01, 2021).

- [41] “Nombre de Nusselt — Wikipédia.” https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Nusselt (accessed Jul. 01, 2021).
- [42] “Nombre de Hartmann — Wikipédia.” https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Hartmann (accessed Jul. 01, 2021).
- [43] “Nombre de Richardson — Wikipédia.” https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Richardson (accessed Jul. 01, 2021).
- [44] “Nombre de Rayleigh — Wikipédia.” https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Rayleigh (accessed Jul. 01, 2021).
- [45] “Nombre de Grashof — Wikipédia.” https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Grashof (accessed Jul. 01, 2021).
- [46] “Nombre de Prandtl — Wikipédia.” https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Prandtl (accessed Jul. 01, 2021).
- [47] **X. Q. Wang and A. S. Mujumdar**, “Heat transfer characteristics of nanofluids: a review,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, no. 1. Elsevier Masson, pp. 1–19, Jan. 01, 2007. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010.
- [48] **Y. Xuan and Q. Li**, “Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids,” *J. Heat Transfer*, vol. 125, no. 1, pp. 151–155, Feb. 2003, doi: 10.1115/1.1532008.
- [49] **S. U. S. Choi, S. Li, and J. A. Eastman**, “Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles,” *J. Heat Transfer*, vol. 121, no. 2, pp. 280–289, May 1999, doi: 10.1115/1.2825978.
- [50] **B. C. Pak and Y. I. Cho**, “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles,” *Exp. Heat Transf.*, vol. 11, no. 2, pp. 151–170, 1998, doi: 10.1080/08916159808946559.
- [51] **M. James Clerk**, *A treatise on electricity and magnetism*, vol. 9781108014. 1891. doi: 10.1017/CBO9780511709333.
- [52] **D. P. H. Hasselman and L. F. Johnson**, “Effective Thermal Conductivity of Composites with Interfacial Thermal Barrier Resistance,” *J. Compos. Mater.*, vol. 21, no. 6, pp. 508–515, Jul. 1987, doi: 10.1177/002199838702100602.
- [53] **O. M. Wilson, X. Hu, D. G. Cahill, and P. V. Braun**, “Colloidal metal particles as probes of nanoscale thermal transport in fluids,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 66, no. 22, pp. 2243011–2243016, Dec. 2002, doi: 10.1103/PhysRevB.66.224301.
- [54] **R. L. Hamilton**, “Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems,” *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 1, no. 3, pp. 187–191, Aug. 1962, doi: 10.1021/i160003a005.
- [55] **W. Yu and S. U. S. Choi**, “The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model,” *J. Nanoparticle Res.*, vol. 5, no. 1–2, pp. 167–171, Apr. 2003, doi: 10.1023/A:1024438603801.

- [56] **D. A. G. Bruggeman**, “Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen,” *Ann. Phys.*, vol. 416, no. 7, pp. 636–664, Jan. 1935, doi: 10.1002/andp.19354160705.
- [57] **J. Koo and C. Kleinstreuer**, “A new thermal conductivity model for nanofluids,” *J. Nanoparticle Res.*, vol. 6, no. 6, pp. 577–588, Dec. 2004, doi: 10.1007/s11051-004-3170-5.
- [58] **Z. A. LAMRI**, “Contribution à l’Etude Théorique des Transferts Thermiques Convectifs dans un Nanofluide,” Université de Frères Mentouri, 2014.
- [59] **B. C. Pak and Y. I. Cho**, “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles,” *Exp. Heat Transf.*, vol. 11, no. 2, pp. 151–170, 1998, doi: 10.1080/08916159808946559.
- [60] **A. Einstein**, “Investigations on the Theory of the Brownian Movement,” *Phys. Bull.*, vol. 7, no. 10, pp. 281–281, 1956, doi: 10.1088/0031-9112/7/10/012.
- [61] **H. C. Brinkman**, “The viscosity of concentrated suspensions and solutions,” *J. Chem. Phys.*, vol. 20, no. 4, p. 571, 1952, doi: 10.1063/1.1700493.