



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté Des Sciences Et De La Technologie
Département De Genie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. :/2021

Présenté et soutenu par :
BOUAFIA Okba

Le : juin 2021

Développement thermique de l'écoulement d'un nanofluide entre deux plaques parallèles

Jury :

| | | | | |
|----|-------------------------|------------|----------------------|-----------|
| Pr | BELGHAR Nouredine | Professeur | Université de Biskra | Président |
| Dr | GUERBAAI Salah | MCA | Université de Biskra | Encadreur |
| Pr | BENMACHICHE Abdelmoumen | Professeur | Université de Biskra | Examineur |

DÉDICACE

*Avant tout, merci **Allah** de m'avoir donné la force et la volonté de terminer ce modeste travail. Je dédie ce mémoire*

*À mes chers parents «**Ma mère**» et «**Mon père** », aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler . Que dieu leur procure bonne santé et longue vie .*

*À mon encadreur « **GUERBAAI Salah** » .*

*À tous « **Mes collègues** » de promotion de **énergétique 2021**.*

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, je tiens à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné l'aide, le courage et la patience d'accomplir ce travail.*

*En premier lieu , je tiens à remercier chaleureusement mon encadreur Mr « **GUERBAAI Salah** » , D.r à l'université de Biskra , pour ses précieux conseils , sa disponibilité , sa compétence et son aide durant toute la période.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury , Mr « **BELGHAR Noureddinne** » , P.r à l'université de Biskra et Mr « **BENMACHICHE Abdelmoumin** » , P.r à l'université de Biskra , pour l'intérêt qu'ils port à ma on ma recherche en acceptant d'examiner mon travail, et de l'enrichir par leurs propositions.*

J'adresse mes plus sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures , mes aimables amis , mes collègues d'étude .

Enfin , je tiens à remercier tout particulièrement mes parents et ma famille qui m'ont toujours encouragé, soutenu et qui étaient toujours à mes côtés . Merci à tous et à toute .

Table des matières

| | |
|--------------------|------|
| Dédicace | I |
| Remerciements | III |
| Table des matières | III |
| Nomenclature | V |
| Liste des figures | VII |
| Liste des tableaux | VIII |
| Introduction | 1 |

Chapitre I Généralités sur les nanofluides

| | | |
|---------|--|----|
| I.1 | Définition | 2 |
| I.2 | Les nanoparticules et le fluide porteur | 3 |
| I.2.1 | Taille des nanoparticules | 3 |
| I.2.2 | Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides | 4 |
| I.2.3 | Les liquides de base les plus utilisés | 5 |
| I.2.4 | Types de nanoparticules | 7 |
| I.3 | Fabrication et préparation des nanofluides | 7 |
| I.3.1 | Les applications de nanofluides | 8 |
| I.3.2 | Propriétés thermo physiques des nanofluides | 9 |
| I.3.2.1 | La fraction volumique | 9 |
| I.3.2.2 | Conductivité thermique (K) | 10 |
| A | Modèle de Maxwell | 10 |
| B | Modèle de Hamilton – Crosser (1962) | 11 |
| C | Modèle de Yu et Choi | 11 |
| D | Bhattacharya et al | 12 |
| I.3.2.3 | Viscosité dynamique (μ) | 12 |
| A | Modèle d'Einstein | 13 |
| B | Modèle de Brinkman | 13 |
| I.3.2.4 | La masse volumique (ρ) | 13 |
| I.3.2.5 | La chaleur massique (Cp) | 14 |
| I.4 | Comment un nanofluide peut-il améliorer le transfert thermique ? | 14 |
| I.5 | Les avantages des nanofluides | 15 |
| I.6 | Les inconvénients des nanofluides | 15 |
| I.7 | Conclusion | 16 |

Table des matières

Chapitre II Formulation mathématique du problème

| | |
|---|----|
| II.1 Configurations étudiées | 17 |
| II.2 Hypothèses simplificatrices | 17 |
| II.3 Forme adimensionnelle de l'équation de l'énergie | 17 |
| II.4 Adimensionnement de l'équations de conservation de l'énergie | 18 |
| II.5 Les conditions aux limites | 19 |
| II.6 Le nombre de nusselt | 20 |

Chapitre III Résolution numérique

| | |
|---|----|
| III.1 Principe de la méthode des volumes finis | 21 |
| III.2 Maillage | 21 |
| III.3 La discrétisation | 22 |
| III.3.1 Discrétisation des différents termes de l'équation de transport | 23 |
| III.3.1.1 Terme convectif suivant X | 23 |
| III.3.1.2 Terme convectif suivant Y | 23 |
| III.3.1.3 Terme diffusif suivant X | 24 |
| III.3.1.4 Terme diffusif suivant Y | 24 |
| III.3.1.5 Terme source | 24 |
| III.4 Résolution des systèmes d'équations linéaires (méthode de Jacobi) | 25 |

Chapitre IV Résultats et discussion

| | |
|---|----|
| IV.1 Introduction. | 26 |
| IV.2 Les Propriétés thermo-physiques du nanofluide | 26 |
| IV.3 Résultats et discussion | 27 |
| IV.3.1 Cas de parois soumises à des températures constantes | 27 |
| IV.3.2 Cas de parois soumises à un flux constantes | 31 |

| | |
|---------------------|----|
| Conclusion générale | 34 |
|---------------------|----|

| | |
|---------------|----|
| Bibliographie | 35 |
|---------------|----|

Nomenclature

Symboles Latins:

| | |
|------------------|--|
| A | Surface d'échange thermique (m^2). |
| C _p | La chaleur spécifique à pression constante (J/(kg.K)). |
| F _i | Représente les forces de volume |
| g | L'accélération de la pesanteur (m/s^2). |
| h | Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W .m^{-2} .°C^{-1}$). |
| k | La conductivité thermique (W/(m.K)). |
| K _f | La conductivité du fluide (W/(m.K)). |
| K | Longueur de dissipateur (m). |
| L _f | La longueur selon laquelle se fait l'écoulement (cm). |
| m | Débit massique, en (kg/s). |
| P | Périmètre (m). |
| Q | Source de chaleur (W). |
| q _c | Quantité de chaleur. |
| T | Température (K). |
| T _{ext} | La température externe (°C). |
| T _p | La température des parois (°C). |
| T ₀ | Température d'entrée (°C). |
| U | La vitesse (m/s). |

Symboles grecs :

| | |
|---------------|--|
| α | La diffusivité thermique (m^2/s). |
| β | Le coefficient de dilabilité ou d'expansion thermique ($1/K$). |
| ε | Facteur d'émission de la surface. |
| σ | Constante de Stefan ($W.m^{-2}.K^{-4}$). |
| λ | Conductivité thermique du milieu ($W m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$). |
| ν | La viscosité cinématique (m^2/s). |
| ρ | La masse volumique (kg/m^3). |
| ρ_{nf} | La masse volumique du nano fluide ($Kg m^{-3}$). |
| ρ_f | La masse volumique de fluide de base ($Kg m^{-3}$). |
| ρ_s | La masse volumique des nanoparticules solides ($Kg m^{-3}$). |
| ρ_{nf} | La masse volumique du nanofluide ($Kg m^{-3}$). |
| μ | La viscosité respectivement dynamique ($Pa \cdot s$). |
| φ | La fraction volumique des particules. |
| Φ | Flux de chaleur transmis par convection (W). |

Liste des figures

| | | |
|----------------|---|----|
| Figure (I-1) | Les nanoparticules dans un tube | 4 |
| Figure (I-2-1) | Nanotube de carbon | 5 |
| Figure (I-2-2) | Nanoparticules d'argen | 5 |
| Figure (I-3-1) | Nanoparticules sphérique | 7 |
| Figure (I-3-2) | Nanotubes de carbone | 7 |
| Figure (II-1) | Géométrie du problème étudié et les conditions aux limites | 17 |
| Figure (III-1) | Volume de contrôle bidimensionnel. | 21 |
| Figure (III-2) | Schéma représentant le maillage décalé | 22 |
| Figure (VI-1) | Le maillage utilisé. | 26 |
| Figure (VI-2) | Répartition de la température à la sortie du canal pour l'eau ($\phi = 0$) à des différents instants | 27 |
| Figure (VI-3) | Répartition de la température à la sortie du canal pour le nanofluide ($\phi = 0.02$) à des différents instants | 28 |
| Figure (VI-4) | Distribution de la température moyenne le long du canal pour le nanofluide ($\phi = 0.02$) à des différents instants. | 28 |
| Figure (VI-5) | Variation du nombre de Nusselt local le long du canal pour le fluide de base ($\phi = 0.0$) à des différents instants | 29 |
| Figure (VI-6) | Variation du nombre de Nusselt local le long du canal pour le le nanofluide ($\phi = 0.02$) à des différents instants | 30 |
| Figure (VI-7) | Les isothermes pour le fluide de base (a) et pour le nanofluide (b) . | 30 |
| Figure (VI-8) | Répartition de la température à la sortie du canal pour l'eau ($\phi = 0$) à des différents instants (cas de flux constant) | 31 |
| Figure (VI-9) | Répartition de la température à la sortie du canal pour l'eau ($\phi = 0.02$) à des différents instants (cas de flux constant) | 32 |
| Figure (VI-10) | Variation du nombre de Nusselt local le long du canal pour le le nanofluide ($\phi = 0.02$) à des différents instants (cas de flux constant) | 32 |
| Figure (VI-11) | Distribution de la température moyenne le long du canal pour le nanofluide ($\phi = 0.02$) à des différents instants (cas de flux constant) | 33 |

Liste des tableaux

| | | |
|----------------|--|----|
| Tableau (I -1) | Combinaisons nanoparticules/fluides de base. | 6 |
| Tableau (VI-1) | Les propriétés physiques utilisées.. . . . | 26 |

Introduction

Le développement des nanotechnologies constitue un challenge 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) comme par exemple des particules d'Oxyde d'Aluminium (Al_2O_3), d'Oxyde de Cuivre (CuO), le cuivre (Cu) ou des nanotubes de carbone dans un fluide tel que l'eau ou le glycol pouvaient augmenter le transfert de chaleur par rapport au cas du fluide pur (eau par exemple), en modifiant de manière significative la conductivité thermique du fluide porteur. Différents modèles ont été élaborés en vue d'expliquer cette améliorations des transferts convectifs.

Le présent document s'organise en quatre chapitres présenté dans la suite :

Le premier chapitre inclue des généralités sur les nanofluides. Le deuxième chapitre est consacré à la formulation mathématique du problème. L'équation de conservation de l'énergie sous forme dimensionnelle et adimensionnelle ainsi que les conditions aux limites sont présentées.

La présentation de la méthode de résolution et l'application de cette méthode sur notre problème constitue le contenu du troisième chapitre.

Le quatrième chapitre rassemble les principaux résultats de calcul concernant cette étude.

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

I.1 Définition :

Les nanofluides sont une nouvelle génération de mélanges. alors que de nombreuses études ont été réalisées pour mieux comprendre leurs propriétés, d'autres études sont encore nécessaires pour établir de bonnes définitions de leurs caractéristiques. Un bref aperçu des développements sur le sujet a été rassemblé dans cette partie. Il ne couvre pas tous les travaux sur le terrain, mais il montre la complexité du problème des propriétés des nanofluides et la vaste gamme d'efforts qui ont été consacrés pour le résoudre [1].

Les nanofluides sont des solutions colloïdales constituées de particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide porteur. Ce type de solution suscite un grand intérêt depuis la découverte de leurs propriétés thermiques particulières. En effet, les fluides de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent leur capacité de transfert de chaleur. L'idée est alors d'insérer au sein des liquides de base des nanoparticules de conductivité très élevée, afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange et ainsi améliorer ces performances thermiques.

Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agréations, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule, les solvants les plus utilisés sont:

- l'eau.
- l'éthylène glycol, EG.
- les huiles.
- le Toluène.
- Les fluides de réfrigération.

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

I.2 Les nanoparticules et le fluide porteur :

Les nanoparticules sont des particules dont les 3 dimensions sont dans la gamme 1-100 nm environ. Les nanomatériaux sont des objets dont au moins une de leurs trois dimensions est nanométrique, c'est-à-dire inférieure à 100 nm. Cette définition est cependant encore en discussion et certaines définitions parlent de nanoparticules dès qu'une ou deux de leurs dimensions est inférieure à 100nm [2].

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

I.2.1 Taille des nanoparticules :

Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de recherches pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en œuvre et pour obtenir des particules de taille voulue. Diverses techniques chimiques et physiques sont donc disponibles pour élaborer des nanoparticules. Ces différentes méthodes permettent d'obtenir des nanoparticules libres ou enrobées, encapsulées dans une matrice hôte.

Si l'idée même d'utiliser des particules solides en suspension pour perfectionner l'échange thermique est ancienne, puisqu'elle découle notamment des études analytiques de Maxwell vers 1873 [3], ce n'est que depuis les années 1990 que l'utilisation de particules d'échelle nanométrique est étudiée. Cela a été rendu possible grâce au développement de procédés de fabrication particuliers et novateurs.

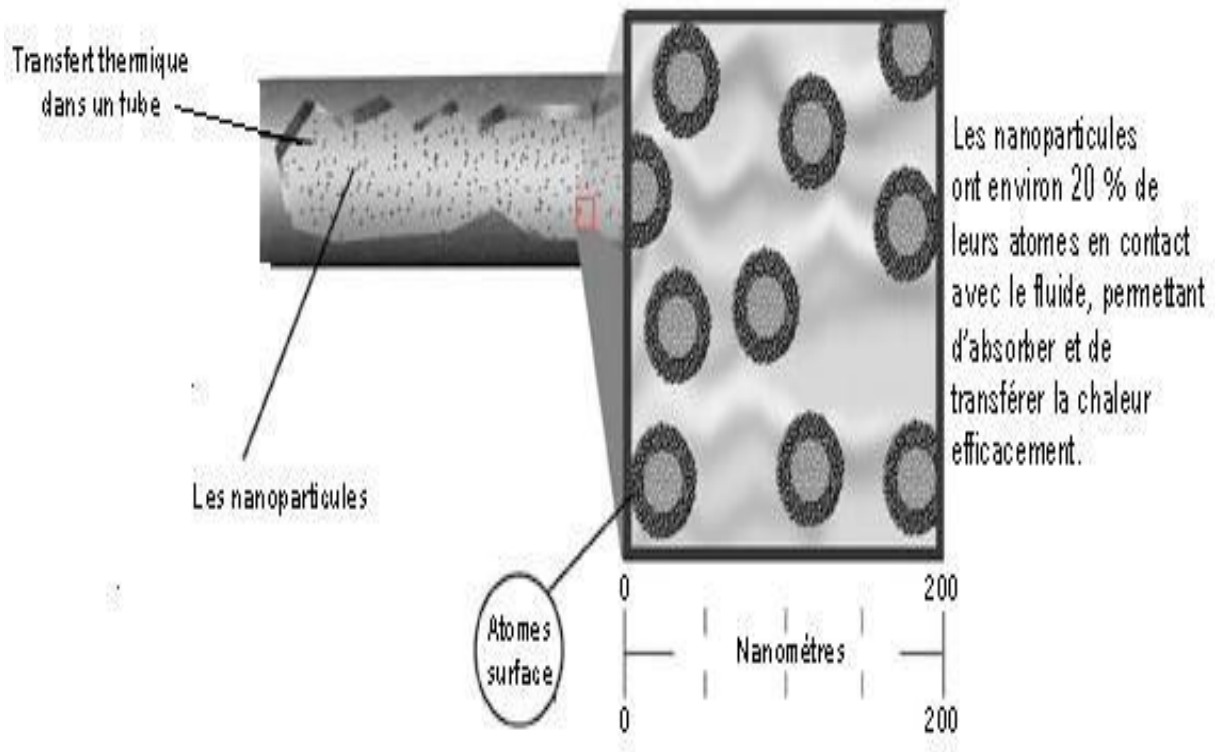


Figure (I-1) les nanoparticules dans un tube.

I.2.2 Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont:

- Les nanoparticules des oxydes métalliques :
 - 1- L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)
 - 2 - L'oxyde de cuivre (CuO)
 - 3 - L'oxyde de silicium (SiO_2)
 - 4 - L'oxyde de titanium (TiO_2)
- Les nanoparticules métalliques :
 - 1 -L'aluminium (Al)
 - 2 -Le cuivre (Cu)
 - 3 -L'or (Au)
 - 4 -L'argent (Ag)
 - 5 -La silicone (Si)
- Les nanoparticules non métalliques :
 - 1 -Les nanotubes de carbone (CNT)
 - 2 -Le diamant (C)

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

I.2.3 Les liquides de base les plus utilisés sont:

- 1- L'eau.
- 2- L'éthylène-glycol, EG.
- 3- Les huiles et autres lubrifiants
- 4- Le Toluène
- 5- Les fluides de réfrigération (R12.R22.....)

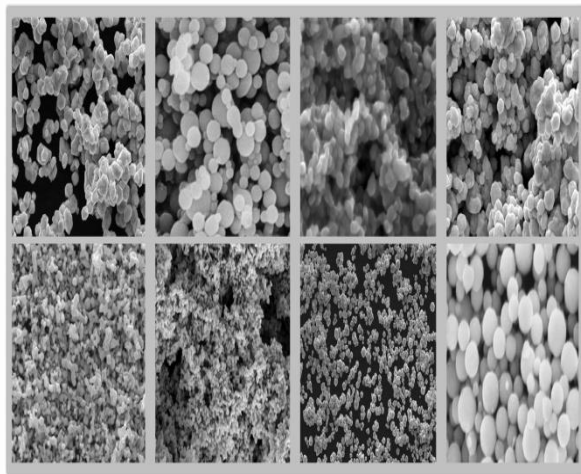
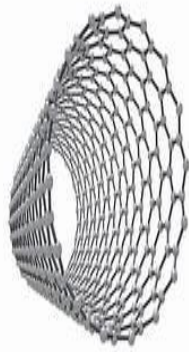
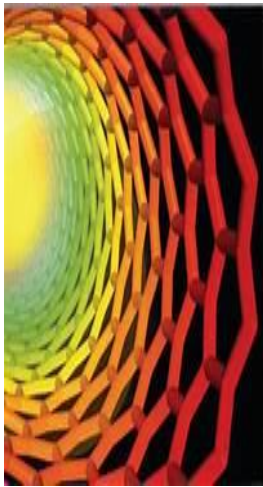


Figure (I-2-1) nanotube de carbon.

Figure (I-2-2) nanoparticules d'argen.

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

Le tableau suivant regroupe une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base préparés par différents groupes de recherche.

| | Acétone | Eau | Ethylène glycol | Huile | Toluène | Décène | éthanol |
|-----------------------------------|---------|-----|-----------------|-------|---------|--------|---------|
| 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 | | | | |
| SiC | | x | | | | | |
| SiO ₂ | | x | x | | | | |
| TiO ₂ | | x | x | | | | |
| WO ₃ | | | x | | | | |
| ZrO ₂ | | x | | | | | |

Tableau (I-1) Combinaisons nanoparticules/fluides de base [4].

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

I.2.4 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.

Les nanoparticules sphériques : pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication

Les nanotubes : les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO_2 , Nanotube de silicium.

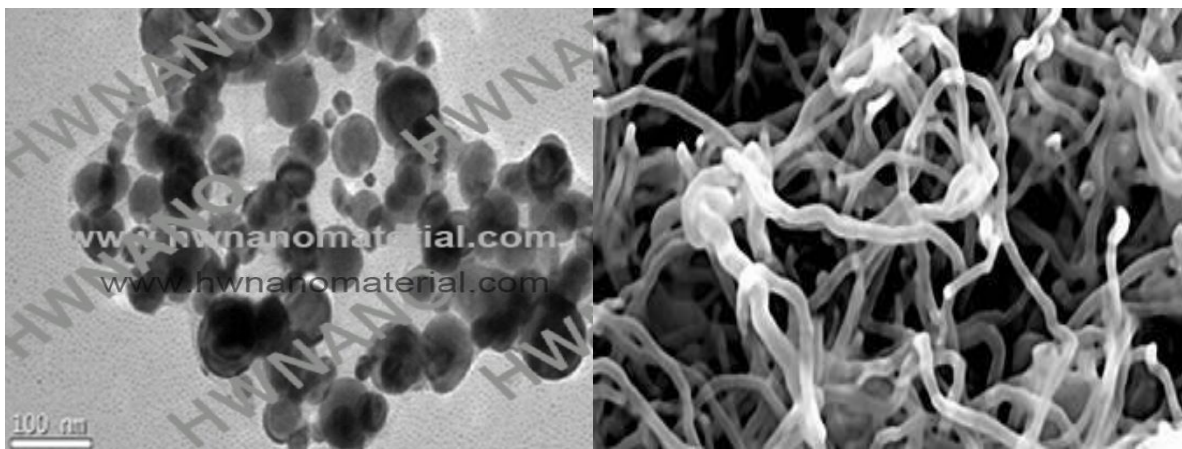


Figure (I-3-1) Nanoparticules sphérique.

Figure (I-3-2) Nanotubes de carbone.

I.3 Fabrication et préparation des nanofluides :

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

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

En outre, il existe deux méthodes principales pour produire des nanofluides :

Procédé en une étape: Consiste à la dispersion des nanoparticules directement dans un fluide de base synthèse direct dans un fluide de base et de prévenir l'oxydation des particules de métal pur.

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

L'intégration en une seule étape directe minimise ces agglomérations, mais l'inconvénient de ces techniques de vaporisation sous atmosphère est de ne pouvoir utiliser que des liquides à faible pression de vapeur saturante (pour éviter qu'ils ne se vaporisent eux-mêmes trop vite dans l'enceinte) et le contrôle sur la taille des nanoparticules formées est limité. Cependant, elle est recommandée pour des métaux purs afin d'éviter l'oxydation rapide des nanoparticules par l'air ambiant.

Procédé en deux étapes: La première étape consiste à fabriquer les nanoparticules et dans la seconde étape les nanoparticules sont dispersées dans un fluide de base.

La fabrication en deux étapes présente un peu plus de risques, car le collage se produit déjà dans la nanopoudre. Les nanoparticules à base d'oxydes métalliques seraient a priori moins sujettes aux regroupements que les nanoparticules à base de métaux purs dans les procédés en deux étapes.

Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de recherches pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en œuvre et pour obtenir des particules de taille voulue. Chaque méthode a ses inconvénients et certains ne sont pas aptes à produire de grandes quantités de nanoparticules pour une production de masse vu les contraintes inhérentes au procédé.

I.3.1 Les applications de nanofluides :

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications pour leurs propriétés magnétiques (paliers magnétiques à ferrofluides, agents de contraste en imagerie médicale), pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électromouillage pour lentilles liquides), et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules fonctionnalisées.

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

Les nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance, ainsi que des Micro Electro Mechanical Systems [5].

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

I.3.2 Propriétés thermo physiques des nanofluides :

Les propriétés thermo-physiques des solutions sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de facteurs ont un effet non négligeable sur cette modification en citant : le type de matériau, la taille et la forme des nanoparticules utilisées ainsi que la concentration volumique des particules en suspension et la conductivité du fluide de base. de nombreux groupes de recherche tentent de comprendre quels sont le ou les mécanismes à l'origine de telles différences mais aucune phénoménologie n'a pu être encore formulée de manière concise et satisfaisante.

L'introduction des nanoparticules dans un fluide modifie ses propriétés physiques (masse volumique, chaleur spécifique, conductivité thermique, viscosité dynamique, etc.).

De nombreuses études ont été menées afin de mesurer, mais aussi d'expliquer et de prédire, l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides. Différentes méthodes de mesure de conductivité thermique ont été employées, la plus courante reste la méthode utilisant un fil chaud en régime transitoire [6].

Les propriétés physiques du nanofluide dépendent essentiellement de fluide de base liquide et de la phase disperser nanoparticules sous forme solide, donc leur définition nécessite un retour aux propriétés de chacun de ses composants fluide de base et nanoparticule[7].

I.3.2.1 la fraction volumique :

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 :

$$\varphi = \frac{\text{Volume solide}}{\text{Volume totale d'un nanofluide}} = \frac{V_p}{V_t} \quad (\text{I.1})$$

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

I.3.2.2 Conductivité thermique (K) :

La conductivité thermique est la propriété la plus importante des nanofluides. La principale raison d'ajouter des nanoparticules dans le fluide de base est d'augmenter sa conductivité thermique. Il existe des modèles standards pour la conductivité thermique des mélanges solides-liquides. Ces modèles ne sont pas précis pour les nanofluides [1].

Ainsi, de nombreux chercheurs ont introduit des mécanismes différents de paramètres influents et développé de nouveaux modèles pour la conductivité thermique des nanofluides. De nombreux travaux traitant l'augmentation de la conductivité thermique peuvent être trouvés dans la littérature. Nous retenons dans la suite de ce travail les différents modèles :

A-Modèle de Maxwell :

Maxwell a présenté son modèle pour calculer la conductivité thermique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique de nanofluide, mais ce modèle est valable uniquement dans le cas des nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, et que cette condition peut être considérée comme un point négatif pour le modèle, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules de forme sphériques. Le modèle de Maxwell [9] a été l'un des premiers qui a étudié analytiquement la conduction thermique d'un fluide contenant des particules sphériques en suspension en ignorant les effets d'interaction entre ces particules. L'équation qui en résulte est :

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2\phi(K_s - K_f)}{(K_s + 2K_f) - \phi(K_s - K_f)} \quad (I.2)$$

Où k_{nf} , k_f et k_s désignent respectivement les conductivités thermiques du nanofluide, du fluide porteur et des particules solides et ϕ la fraction volumique des particules.

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

B-Modèle de Hamilton – Crosser (1962) :

Le modèle de Hamilton[10] est une extension de modèle de Maxwell. Il concerne les particules de forme quelconque. Puisque ce dernier n'a valable que dans le cas des particules sphériques une chose qui rend le modèle nos efficace pour la description du phénomène étudié.

Pour cela le modèle du Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la conductivité thermique du nanofluide quelque soit la forme de la nanoparticule, et ça en introduisant la notion du facteur géométrique appelé la sphéricité. Ce facteur est définit 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 est donnée par l'expression suivante.

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_s)\varphi}{K_s + (n-1)K_f + (K_f - K_s)\varphi} \quad (I.3)$$

Où n : facteur de forme empirique donné par $n = \frac{3}{\Psi}$ (n=3 pour les particules sphériques)

avec Ψ est la sphéricité définit comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule et φ la concentration volumique des nanoparticules dans le fluide.

C-Modèle de Yu et Choi :

pour calculer la conductivité thermique a été introduite par Yu et Choi [11]. Ils ont proposé de modéliser les nanofluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique. Cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules. De plus, ils ont supposé que la conductivité thermique da la couche nanométrique est plus grande que la conductivité thermique de liquide. Le modèle de Maxwell est donné par la formule suivante :

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2\varphi(K_s - K_f)(1 + \beta)^3}{K_s + 2K_f - \varphi(K_s - K_f)(1 + \beta)^3} K_f \quad (I.4)$$

β est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

D-Bhattacharya et al :

Bhattacharya et al. [12] (2004) ont représenté théoriquement une nouvelle relation ressemblant à la formule de Xuan and Roetzel définissant la masse volumique d'un nanofluide, en prenant en considération le mouvement Brownien des particules. On définit le mouvement Brownien autant qu'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. Les nanoparticules sont suffisamment petites pour être poussées par les chocs reçus et elles peuvent alors parcourir une certaine distance (très petite), avant de repartir dans une autre direction suite à de nouveaux chocs et ainsi de suite. Il en résulte un mouvement d'ensemble chaotique que l'on appelle le mouvement brownien. La formule de la conductivité thermique calculée par Bhattacharya et al. est exprimée comme suit :

$$K_{nf} = K_s \varphi + (1 - \varphi)K_f \quad (I.5)$$

I.3.2.3 Viscosité dynamique (μ) :

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler, c'est un paramètre important pour les applications pratiques car elle affecte directement la chute de pression à convection forcée. L'ajout de particules solides dans un liquide provoque une augmentation, plus ou moins importante de la viscosité du mélange obtenu. Là encore, de nombreux facteurs peuvent être à l'origine des disparités constatées. Pour des nanoparticules identiques (nature, taille) et un même fluide de base, la qualité de la dispersion, et la température peuvent influencer considérablement sur la viscosité. Par conséquent, pour permettre l'utilisation de nanofluides dans des applications pratiques, le degré d'augmentation de la viscosité des nanofluides par rapport aux fluides purs doivent être soigneusement étudiée. Afin d'expliquer l'effet des nanoparticules sur la viscosité, de nombreuses corrélations ont été présentées.

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

A-Modèle d'Einstein :

Einstein [13] (1906) a été le premier qui a étudié la viscosité dynamique d'un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides en faible concentration volumique. La relation est présentée comme suit :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi) \quad (I.6)$$

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 $\varphi=0.03$

B-Modèle de Brinkman :

Brinkman [14] (1952) a étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques. Sa relation conduit à la relation d'Einstein pour les faibles fractions volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (I.7)$$

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.

I.3.2.4 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 :

$$\rho = \left[\frac{m}{v} \right] = \frac{m_f + m_s}{v_f + v_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (I.8)$$

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

Alors on peut déduire la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (I.9)$$

Où ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules.

I.3.2.5 La chaleur massique (Cp) :

La chaleur massique ou la chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène. 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.

I.4 Comment un nanofluide peut-il améliorer le transfert thermique ?

Pour améliorer les performances, il faut réduire autant que possible l'épaisseur de la couche limite et l'empêcher de se développer à sa guise. Pour cela, on augmente la vitesse du fluide (passages étroits, jets d'eau...) ou bien on dispose des petits obstacles (picots, aspérités...) pour augmenter le brassage au niveau de la paroi notamment. Tout ça pour la contrarier autant que possible et repousser le fluide froid le plus près possible de la paroi chaude pour augmenter l'échange diminution de l'épaisseur de la couche limite thermique.

Grâce à sa plus grande conductivité thermique, un nanofluide améliore directement le transit conductif de l'énergie thermique au travers de la sous-couche visqueuse. La suspension des nanoparticules peut modifier sensiblement le comportement rhéologique du liquide en adoptant un arrangement structurel particulier dans la couche limite. Selon leur nature et leur forme, on peut observer un comportement rhéofluidifiant (diminution de viscosité lors de l'augmentation de la vitesse de cisaillement) qui tend à réduire la viscosité apparente tout près de la paroi (effet lubrifiant). Cette réduction de viscosité induit alors une diminution de l'épaisseur de la couche limite dynamique et donc thermique par implication. Le résultat est encore une fois une augmentation directe du coefficient d'échange à la paroi.[15]

Chapitre I : Généralités sur les nanofluides

I.5 Les avantages des nanofluides :

Il est indéniable qu'un bon nanofluide apporte un coup de pouce à l'efficacité d'un système de refroidissement liquide quelconque sans avoir plus de bruit et sans consommer plus. Au contraire, l'efficacité générale étant améliorée, on peut penser à réduire la ventilation ou à prendre une pompe moins puissante, tout en gardant un niveau de performance identique si le silence de fonctionnement est la priorité. Cependant les nanofluides offrent les avantages suivants :

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Volume réduit par rapport au liquide pur pour obtenir une équivalence d'intensification de transfert de chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux fluides conventionnelles, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

I.6 Les inconvénients des nanofluides :

On a vu que l'érosion des surfaces et la sédimentation sont des effets que l'on peut négliger avec un nanofluide. La corrosion reste un point à vérifier, mais si on le choisit bien en prenant quelque chose d'inerte ou en l'adaptant à son circuit, alors il n'y aura aucun souci. Mais il présente pas mal d'inconvénients tels que :

- le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs.
- le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés.
- instabilité des nanoparticules dispersion.
- chute de pression accrue lors du pompage.
- le coût élevé des nanofluides
- difficultés dans le processus de production

I.7 Conclusion :

L'utilisation de nanofluides en tant que fluide caloporteur est un nouveau domaine qui est encore en phase de recherche. Les nanofluides contribuent à l'amélioration du transfert thermique de plusieurs dizaines de pour-cent, l'augmentation du transfert thermique a une dépendance directe de type, taille et la concentration volumique des nanoparticules utilisé. Néanmoins, compte tenu des diverses méthodes de synthèse et de caractérisation, les résultats expérimentaux ne sont pas reproductibles entre les différents groupes de recherche travaillant sur le sujet. En outre, l'influence d'un certain nombre de paramètres, tels que la taille et la forme, les phénomènes aux interfaces entre liquide et particules, sont encore mal compris et caractérisés. A travers cette thèse, nous présentons une étude sur les caractéristiques du transfert thermique en utilisant des nanofluides dans le tube linéique d'un capteur cylindro-parabolique en prenant en considération l'influence de type, la taille et la fraction volumique des nanoparticules en suspension.

Chapitre II Formulation mathématique du problème

II.1 Configurations étudiées:

La configuration étudiée est représentée sur la figure (II.1). Elle est principalement constituée de deux plaques parallèles de longueur finie L et d'espace b .

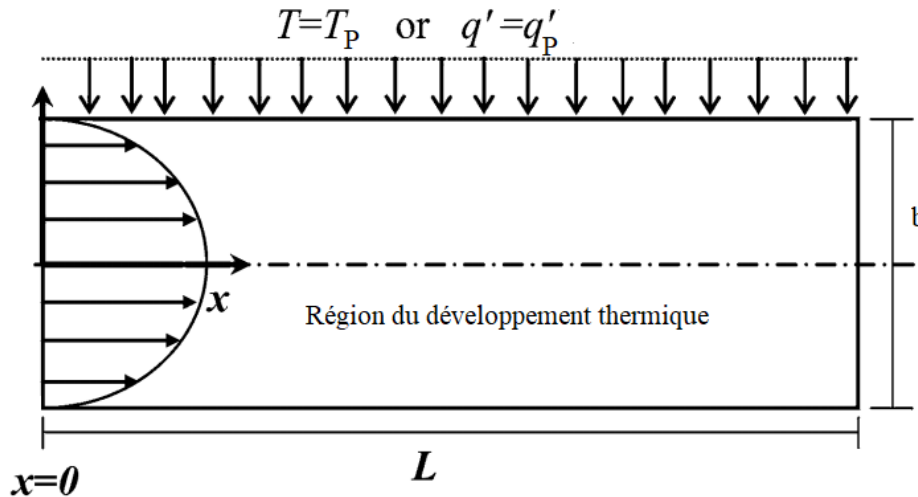


Figure (II-1) géométrie du problème étudié et les conditions aux limites.

II.2 Hypothèses simplificatrices:

Les hypothèses simplificatrices retenues dans notre étude sont les suivantes:

- Le fluide de base utilisé est un fluide newtonien, incompressible et qui satisfait l'hypothèse de Boussinesq.
- Le nanofluide est supposé incompressible et l'écoulement est laminaire, instationnaire et bidimensionnel totalement développé.
- Les propriétés thermophysiques du nanofluide sont constantes.

II.3 Forme adimensionnelle de l'équation de l'énergie :

Compte tenu des hypothèses formulées précédemment, l'équation de l'énergie s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (II.1)$$

Nous avons :

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{eff}}{(\rho C_p)_{nf}}$$

Chapitre II Formulation mathématique du problème

La masse volumique effective du nanofluide est donné par :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (\text{II.2})$$

La capacité calorifique du nanofluide est donnée Par l'expression:

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s \quad (\text{II.3})$$

La conductivité thermique effective du nanofluide est approximée par le modèle de Maxwell–Garnetts :

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{k_s + 2K_f - 2\varphi(K_f - K_s)}{K_s + 2K_f + \varphi(K_f - K_s)} \quad (\text{II.4})$$

II.4 Adimensionnement de l'équations de conservation de l'énergie :

L'emploi des variables adimensionnelles dans les équations permet une meilleure approche de la réalité des phénomènes physiques, car elles sont indépendantes du système d'unités de mesure utilisé pour les étudier. On peut dire aussi que ces variables permettent d'obtenir des informations générales, qui jouent un rôle prépondérant dans les similitudes. Pour ramener les équations précédentes à une forme adimensionnelle, il est nécessaire de définir des changements de variables.

Le dimensionnement se fait comme suit :

$$t^* = \frac{tU_0}{b}, \quad U = \frac{u}{U_0}, \quad \theta = \frac{T - T_0}{\Delta T}, \quad X = \frac{x}{b}, \quad Y = \frac{y}{b}$$

Le système d'équations définissant le problème s'écrit alors sous la forme adimensionnelle suivante:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} \Delta T + U U_0 \frac{\partial \theta}{\partial x} \Delta T = a_{nf} \left(\frac{\partial^2 \theta}{b^2 \partial x^2} \Delta T + \frac{\partial^2 \theta}{b^2 \partial x^2} \Delta T \right) \quad (\text{II.5.1})$$

$$\frac{U_0}{b} \frac{\partial \theta}{\partial t^*} + \frac{U_0}{b} \frac{U}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{a_{nf}}{b^2} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right)$$

$$B U_0 \frac{\partial \theta}{\partial t^*} + b U_0 \frac{U}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} = a_{nf} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{a_{nf}}{b U_0} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right)$$

Nous savons que :

$$\text{Re} = \frac{b U_0}{\nu}$$

Chapitre II Formulation mathématique du problème

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\nu a_{nf}}{\nu b U_0} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{2}{Re} \frac{\alpha_{nf}}{\nu} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right)$$

Avec :

$$Pr = \frac{\nu}{a_f}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{2}{Re} \frac{a_f}{a_f} \frac{\alpha_{nf}}{\nu} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{2}{Re} \frac{1}{Pr} \frac{\alpha_{nf}}{a_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{2}{Re Pr} \frac{\alpha_{nf}}{a_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.5.2})$$

II.5 Les conditions aux limites :

Sur les parois :

$$u=v=0$$

$$T=T_c$$

A l'entrée :

$$v=0$$

$$u=6U_0 \left(\frac{y}{b} - \frac{y^2}{b^2} \right)$$

$$T=T_0$$

A la sortie :

$$u=6U_0 \left(\frac{y}{b} - \frac{y^2}{b^2} \right)$$

$$v=0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}=0$$

Adimensionnement des conditions limites :

Sur les parois :

$$U=V=0$$

$$\theta = 1$$

Chapitre II Formulation mathématique du problème

A l'entrée :

$$\theta = 0$$

$$V=0$$

$$U=6(y - y^2)$$

A la sortie :

$$U=6(y - y^2)$$

$$V=0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x}=0$$

II.6 Le nombre de Nusselt :

L'expression du nombre de Nusselt moyen qui nous avons utilisé dans cette étude est :

$$Nu = \frac{hH}{k_f} \quad (\text{II.6.})$$

Le coefficient de transfert de chaleur et de conductivité thermique sont données par les relations suivantes respectivement :

$$H = \frac{q_w}{T_h - T_L} \quad (\text{II.7.1})$$

$$k_{nf} = - \frac{q_w}{\partial T / \partial x} \quad (\text{II.7.2})$$

D'après les deux relations précédentes et les variables adimensionnelles, nous concluons que le nombre de Nusselt écrit par la forme :

$$Nu = - \left(\frac{K_{nf}}{K_f} \right) \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (\text{II.8.1})$$

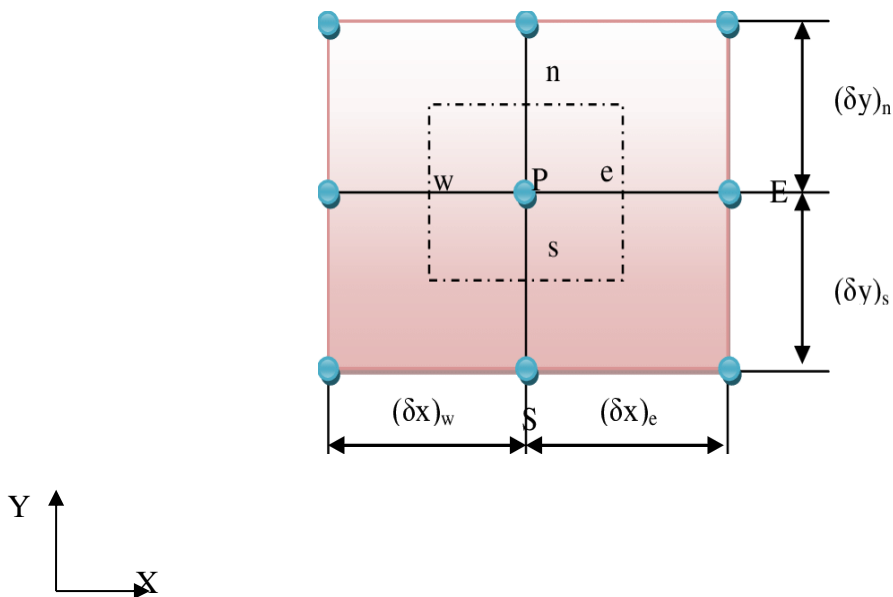
Le nombre de Nusselt de moyenne est défini par :

$$Nu_m = \int_0^1 Nu(Y) dY \quad (\text{II.8.2})$$

Chapitre III Resolution numerique

III.1 Principe de la méthode des volumes finis:

Si on parle de la simulation par la méthode des volumes finis, on parle d'un domaine de calcul composé d'un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles, décrites au chapitre précédent, sur chaque volume de contrôle. Chacun de ces derniers volumes de contrôle contenant un nœud dit: "nœud principal". Un exemple de volume de contrôle est présenté dans la figure ci-dessous. Pour un nœud principal ('P), les points E et W (E: Est, W: West) sont des voisins dans la direction X, tandis que N et S (N: Nord, S: Sud) sont ceux dans la direction Y. Le volume de contrôle entourant ('P) est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points (e) et (w) dans la direction X, (n) et (s) dans la direction Y.



Figure(III-1) Volume de contrôle bidimensionnel.

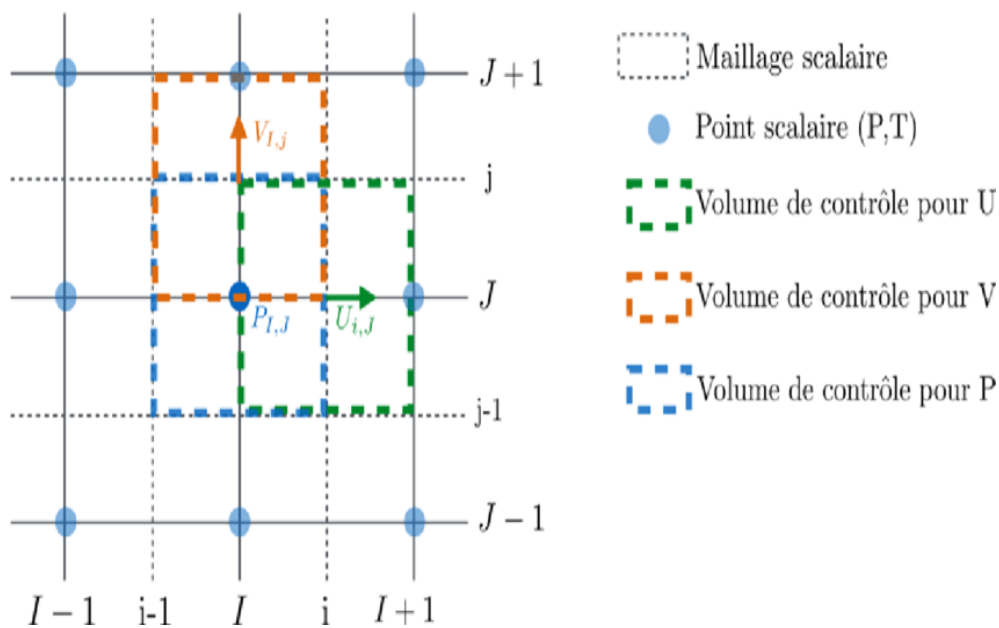
III.2 Maillage :

Le maillage est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection représente un nœud. La discrétisation du domaine est obtenue par un maillage constitué d'un réseau de points nœuds. Ainsi un élément de volume volume de contrôle est déterminé autour de chaque nœud.

Les grandeurs scalaires sont stockées dans le nœud ('P) du maillage, tandis que les grandeurs vectorielles sont stockées aux milieux des segments reliant les nœuds.

Chapitre III Resolution numerique

L'équation générale de transport est intégrée sur le volume de contrôle associé aux variables scalaires et les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur le volume de contrôle associé aux composantes de la vitesse. Le volume de contrôle de la composante longitudinale (U) est décalé suivant la direction (X) par rapport au volume de contrôle principal, celui de la composante transversale (V) est décalé suivant la direction (Y). Ce type de maillage dit: «maillage décalé» permet une bonne approximation des flux convectifs et une stabilisation numérique de la solution. La construction des volumes de contrôle et le maillage décalé sont montrés dans le schéma suivant :



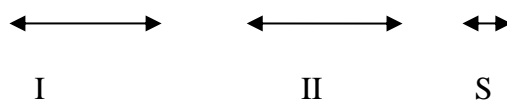
Figure

(III-2) Schéma représentant le maillage décalé.

III.3 La discrétisation:

Les équations de conservation présentées au chapitre précédent peuvent être écrites sous une forme commune. Cette formulation permet de ne pas répéter le travail de discrétisation pour chaque équation. Si on note ϕ la variable étudiée, chacune des équations peut être réduite à une seule équation générale, en coordonnées cartésiennes selon la forme suivante :

$$\sum_{j=1} \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j \phi) = \sum_{j=1} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (\text{III.1})$$



Chapitre III Resolution numerique

Où:

I : Terme convectif.

II : Terme diffusif.

S : Terme source.

Γ : Coefficient de diffusion.

L'évaluation des différentes intégrales de l'équation de transport ci-dessous demande que l'on fasse un certain nombre d'approximations de façon à former un système d'équation linéaires reliant entre elles les valeurs de la fonction ϕ aux points du maillage ($P'_{i,j}$)

$$\int_{V_c} \left(\frac{\partial}{\partial X} (U\phi) + \frac{\partial}{\partial Y} (V\phi) \right) dv = \int_{V_c} \left(\frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial}{\partial X} (\phi) \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial}{\partial Y} \phi \right) + S_\phi \right) dv \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$dv = dX \cdot dY \cdot 1$$

III.3.1 Discrétisation des différents termes de l'équation de transport:

III.3.1.1 Terme convectif suivant X:

$$\int_{V_c} \left(\frac{\partial}{\partial X} (U\phi) \right) dv = U\phi|_w^e \cdot \Delta Y = ((U\phi)_e - (U\phi)_w) \cdot \Delta Y = (F_e\phi_e - F_w\phi_w) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$F_e = U_e \cdot \Delta Y \quad , \quad F_w = U_w \cdot \Delta Y$$

III.3.1.2 Terme convectif suivant Y:

$$\int_{V_c} \left(\frac{\partial}{\partial Y} (V\phi) \right) dv = V\phi|_s^n \cdot \Delta X = ((V\phi)_n - (V\phi)_s) \cdot \Delta X = (F_n\phi_n - F_s\phi_s) \quad (\text{III.4})$$

Avec:

$$F_n = V_n \cdot \Delta X \quad , \quad F_s = V_s \cdot \Delta X$$

Chapitre III Resolution numerique

III.3.1.3 Terme diffusif suivant X :

$$\begin{aligned}
 \int_{Vc} \left(\frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right) \right) dX \cdot dY &= \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_w^e \Delta Y = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_e - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_w \right) \Delta Y \\
 &= \left(\Gamma_e \frac{\phi_E - \phi_{P'}}{\delta X_{P'E}} - \Gamma_w \frac{\phi_{P'} - \phi_W}{\delta X_{WP'}} \right) \cdot \Delta Y = \left(\frac{\Gamma_e \cdot \Delta Y}{\delta X_{P'E}} \cdot (\phi_E - \phi_{P'}) - \frac{\Gamma_w \cdot \Delta Y}{\delta X_{WP'}} (\phi_{P'} - \phi_W) \right) \\
 &= \left(D_e \cdot (\phi_E - \phi_{P'}) - D_w (\phi_{P'} - \phi_W) \right)
 \end{aligned} \tag{III.5}$$

Avec :

$$D_e = \frac{\Gamma_e \cdot \Delta Y}{\delta X_{P'E}}, \quad D_w = \frac{\Gamma_w \cdot \Delta Y}{\delta X_{WP'}}$$

III.3.1.4 Terme diffusif suivant Y :

$$\begin{aligned}
 \int_{Vc} \left(\frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right) \right) dX \cdot dY &= \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \Big|_s^n \Delta X = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \Big|_n - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \Big|_s \right) \Delta X \\
 &= \left(\Gamma_n \frac{\phi_N - \phi_{P'}}{\delta Y_{P'N}} - \Gamma_s \frac{\phi_{P'} - \phi_S}{\delta Y_{SP'}} \right) \cdot \Delta X = \left(\frac{\Gamma_n \cdot \Delta X}{\delta Y_{P'N}} \cdot (\phi_N - \phi_{P'}) - \frac{\Gamma_s \cdot \Delta X}{\delta Y_{SP'}} (\phi_{P'} - \phi_S) \right) \\
 &= \left(D_n \cdot (\phi_N - \phi_{P'}) - D_s (\phi_{P'} - \phi_S) \right)
 \end{aligned} \tag{III.6}$$

Avec :

$$D_n = \frac{\Gamma_n \cdot \Delta X}{\delta Y_{P'N}}, \quad D_s = \frac{\Gamma_s \cdot \Delta X}{\delta Y_{SP'}}$$

III.3.1.5 Terme source:

$$\int_{Vc} (\mathbf{S}_\phi) d\mathbf{v} = \overline{\mathbf{S}_\phi} \Delta X \cdot \Delta Y = (\mathbf{S}_{P'} \cdot \phi_{P'} + \mathbf{S}_c) \cdot \Delta X \cdot \Delta Y \tag{III.7}$$

Où :

$\overline{\mathbf{S}_\phi}$: est la valeur moyenne du terme source.

Suite à la résolution des équations algébriques adoptées, le terme source est linéarisé de façon à forcer la convergence, de sorte que:

$$\overline{\mathbf{S}_\phi} = \mathbf{S}_c + \mathbf{S}_{P'} \phi_{P'}$$

Où :

\mathbf{S}_c : Est la partie constante qui ne dépend pas explicitement de $\phi_{P'}$, $\mathbf{S}_{P'}$: étant la pente de $\phi_{P'}$.

Chapitre III Resolution numerique

Il est nécessaire que le coefficient ($S_{P'}$) soit inférieur à zéro pour que la solution soit numériquement stable et que la convergence soit plus rapide.

Après une substitution dans l'équation de transport on obtient la forme discrétisée suivante:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{F}_e \phi_e - \mathbf{F}_w \phi_w) + (\mathbf{F}_n \phi_n - \mathbf{F}_s \phi_s) = & (III.8) \\ & (D_e \cdot (\phi_E - \phi_{P'})) - D_w(\phi_{P'} - \phi_w) + (D_n \cdot (\phi_N - \phi_{P'}) - D_s(\phi_{P'} - \phi_S)) \\ & + (S_{P'} \cdot \phi_{P'} + S_c) \cdot \Delta X \cdot \Delta Y \end{aligned}$$

Pour aboutir à une forme finale, on doit choisir un schéma de discrétisation des termes convectifs, le schéma employé pour la discrétisation étant le schéma hybride.

III.4 Résolution des systèmes d'équations linéaires (méthode de Jacobi) :

Afin de discrétiser l'équation de transport et de Poisson, on a la relation générale ayant la forme suivante:

$$a_{P'} \cdot \phi_{i,j} = (a_w \cdot \phi_{i-1,j} + a_e \cdot \phi_{i+1,j} + a_s \cdot \phi_{i,j-1} + a_n \cdot \phi_{i,j+1} + b_{i,j}) \quad (III.9)$$

La méthode de Jacobi consiste à estimer une solution ($\phi_{i,j}^k$) dans l'itération (K) pour calculer ($\phi_{i,j}^{k+1}$) comme suit :

$$\phi_{i,j}^{k+1} = (a_w \cdot \phi_{i-1,j}^k + a_e \cdot \phi_{i+1,j}^k + a_s \cdot \phi_{i,j-1}^k + a_n \cdot \phi_{i,j+1}^k + b_{i,j}) / a_{P'} \quad (III.10)$$

La condition de convergence est : $\phi_{i,j}^{k+1} - \phi_{i,j}^k \leq 10^{-3}$

Si la condition précédente n'est pas encore satisfaite, on pose que : $\phi_{i,j}^k = \phi_{i,j}^{k+1}$ et on recalcule la même formule jusqu'à ce qu'elle vérifie la condition de convergence.

Chapitre IV Résultats et discussion

IV.1 Introduction:

Après avoir écrit le programme de calcul en langage Fortran, les principaux résultats obtenus reflétant le comportement des champs thermiques pour notre configuration, sont exposés dans ce chapitre. La restitution de ces champs a été réalisée en utilisant le logiciel de visualisation Tecplot 360, quant aux courbes, elles ont été réalisées en utilisant le logiciel Origine 2019b.

La figure (VI-1) montre le maillage utilisé. Ce maillage est un maillage uniforme de (100 x50).

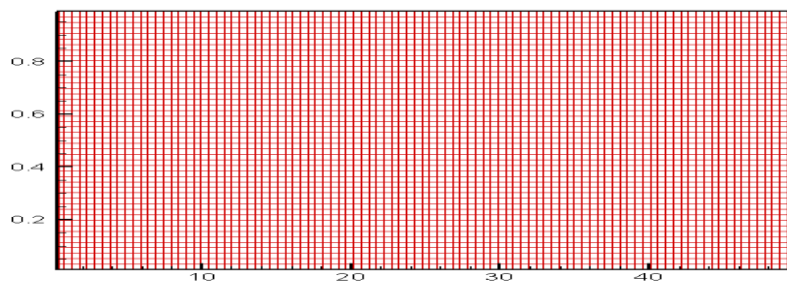


Figure (VI-1) le maillage utilisé.

IV.2 Les Propriétés thermo-physiques du nanofluide:

Le tableau (VI-1) montre les propriétés thermo-physiques du nanofluide (eau + cuivre) utilisées pour la présente simulation numérique.

| Les propriétés thermo-physiques | Eau pure | Cuivre |
|---------------------------------|------------------------|--------|
| C_p ($J.kg^{-1}.K$) | 4179 | 383 |
| ρ ($kg.m^3$) | 997.1 | 8954 |
| K ($W.m^{-1}.K^{-1}$) | 0.6 | 400 |
| μ ($kg.m^{-1}.s^{-1}$) | 7.975×10^{-4} | - |

Tableau (VI-1) Les propriétés physiques utilisées.

IV.3 Résultats et discussion

Les simulations numériques sont effectuées pour un nombre de Reynolds $Re=200$ et pour différentes fractions volumiques à chaque instant pour le fluide pure ($\phi = 0$) et pour les nanofluide (eau + Cu).

La présentation des résultats concernant les champs de température et la variation du nombre de Nusselt à chaque instant.

IV.3.1 Cas de parois soumises à des températures constantes

Les effets du changement brusque de la température de la paroi et les conditions de flux thermique de paroi sont obtenus en résolvant l'équation d'énergie transitoire en utilisant la méthode des volumes finis. La distribution de la température et du nombre de Nusselt sont donnés à des différents instant et différent valeur de la fraction volumique des particules.

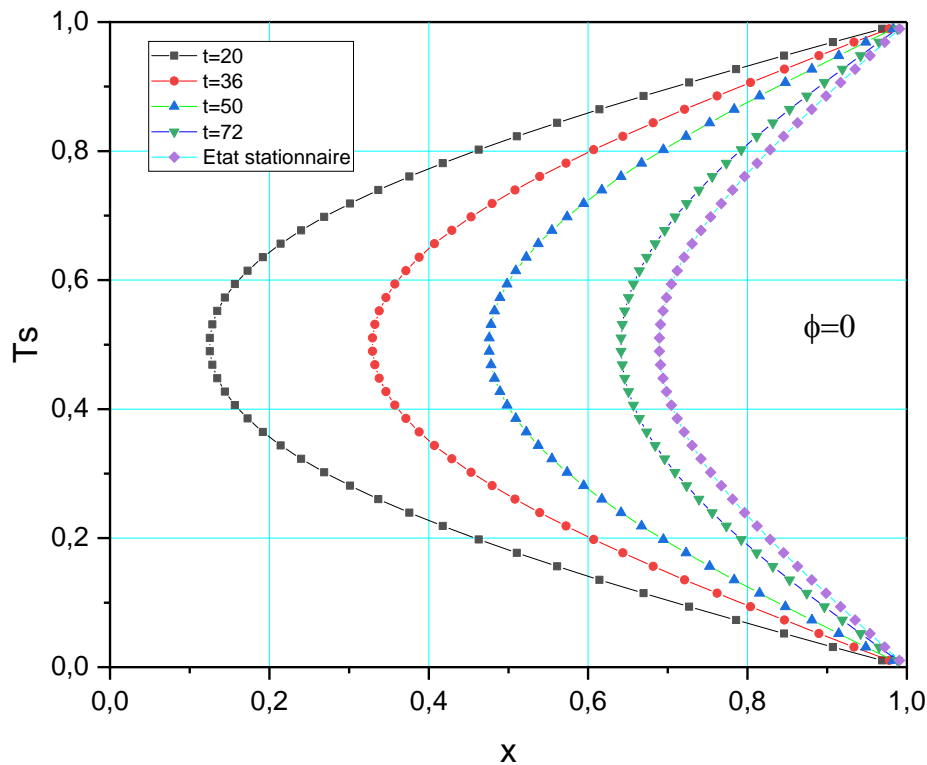


Figure (VI-2) Répartition de la température à la sortie du canal pour l'eau ($\phi = 0$) à des différents instants.

Chapitre IV Résultats et discussion

Sur la figure (VI-2), le profil de température transversale du fluide de base (eau) à la sortie du canal est donné à des différents instants. La variation de température est presque la même avec différentes fractions volumiques de particules comme le montre la figure (VI-3).

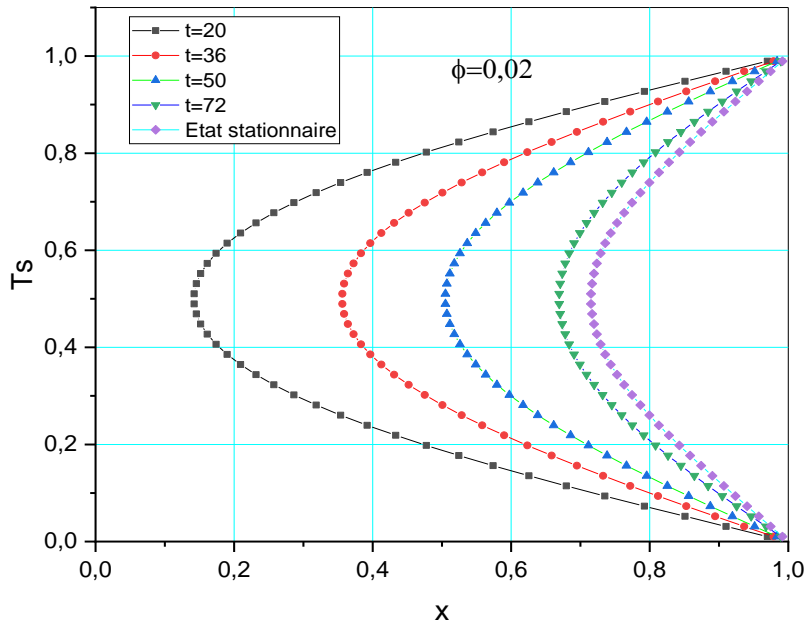


Figure (VI-3) Répartition de la température à la sortie du canal pour le nanofluide ($\phi = 0.02$) à des différents instants.

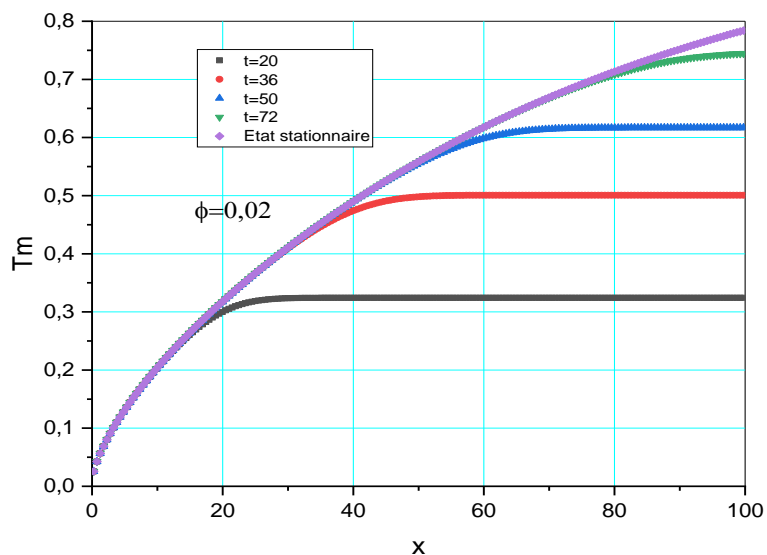


Figure (VI-4) Distribution de la température moyenne le long du canal pour le nanofluide ($\phi = 0.02$) à des différents instants.

Chapitre IV Résultats et discussion

Sur la figure (VI-4), la variation de la température moyenne le long du canal pour une fraction donnée des nanoparticules est illustrée pour différents instants.

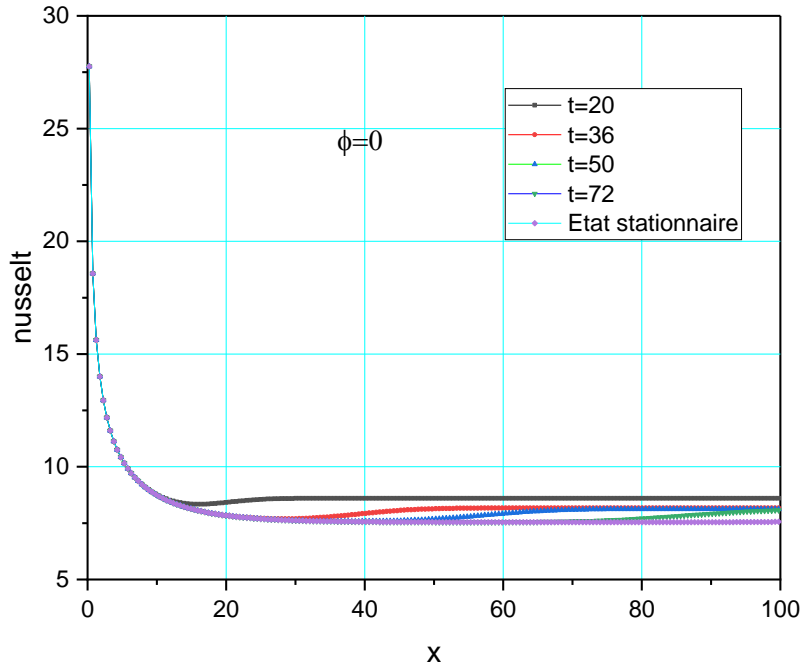


Figure (VI-5) Variation du nombre de Nusselt local le long du canal pour le fluide de base ($\phi = 0.0$) à des différents instants.

La figure (VI-5) montre la variation du nombre de Nusselt local le long du canal à différents moments pour un le fluide de base donnée $\phi = 0.0$. Les valeurs du nombre de Nusselt augmentent avec l'augmentation des valeurs de la fraction volumique de nanoparticules comme le montre la figure (VI-6). Ceci est dû à une amélioration de la conductivité thermique du nanofluide comparable à celle du fluide de base. La chaleur se transmet mieux au fluide pour des fractions élevées qui peut être remarqué sur la figure (VI-7) qui présente les contours des isothermes pour le cas du fluide de base ($\phi = 0.$) et le cas d'un nanofluide avec $\phi = 0.02$

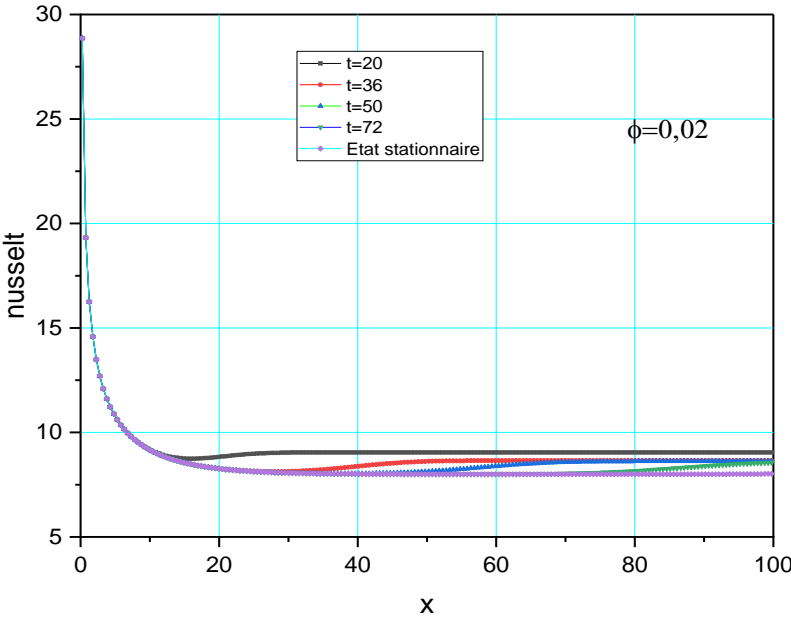


Figure (VI-6) Variation du nombre de Nusselt local le long du canal pour le le nanofluide ($\phi = 0.02$) à des différents instants.

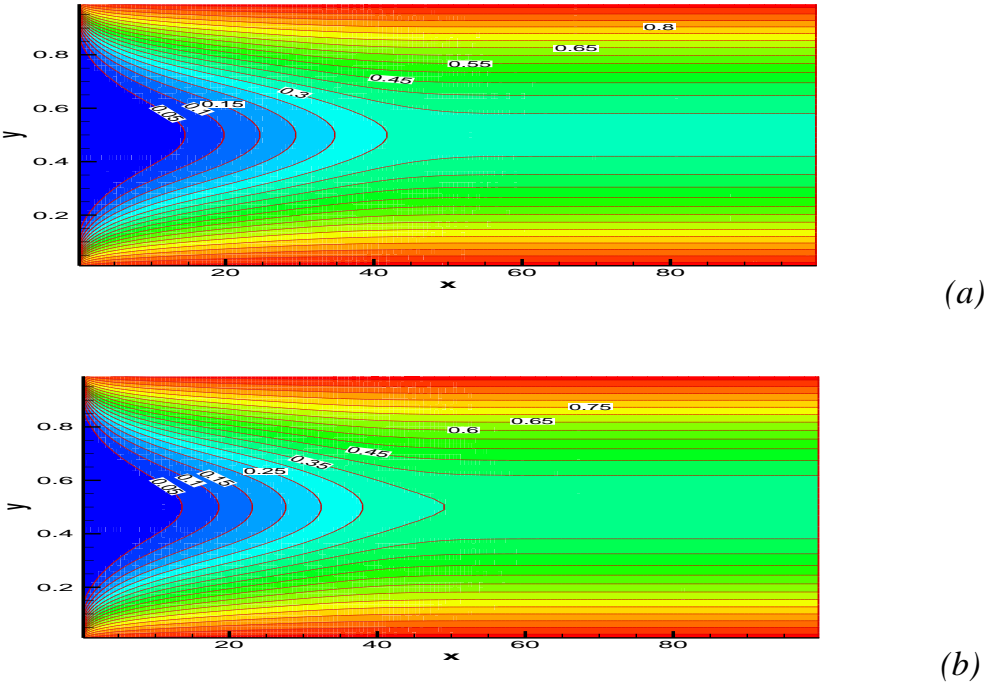


Figure (VI-7) les isothermes pour le fluide de base (a) et pour le nanofluide (b).

IV.3.2 Cas de parois soumises à un flux constantes

Pour le cas de deux plaques soumises à un flux constant, la répartition de la température à la sortie du canal pour chaque instant est représentée sur la figure (VI-8) pour le cas d'un fluide de base et sur la figure (VI-9) pour le cas d'un nanofluide avec une fraction volumique des nanoparticules ($\phi = 0.02$)

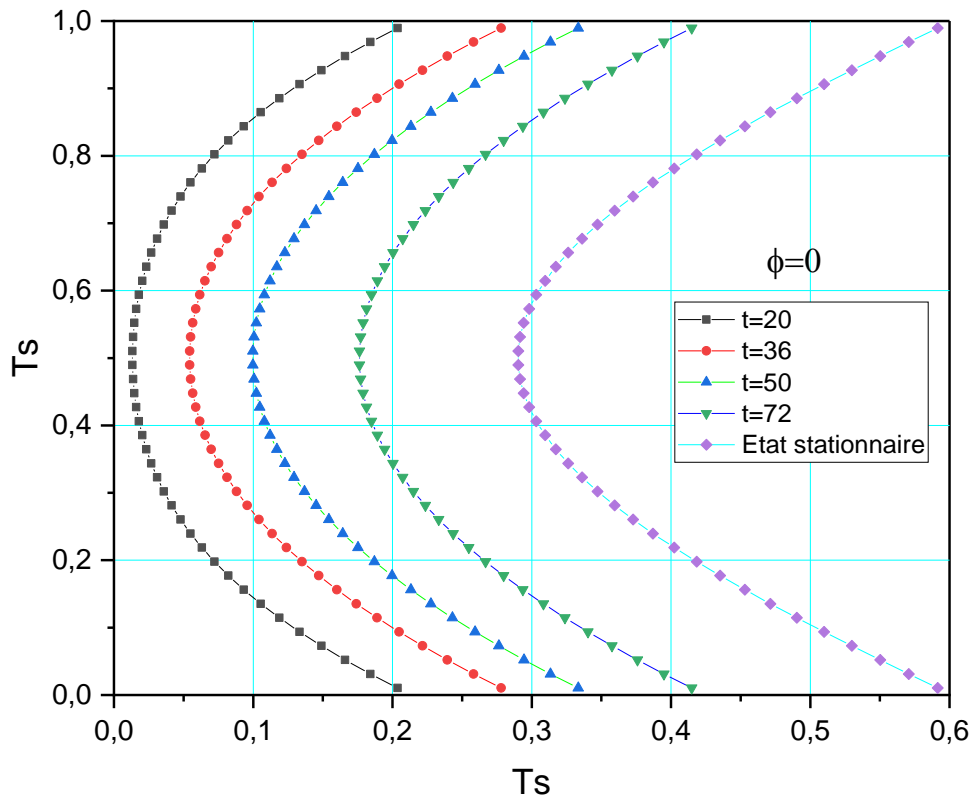
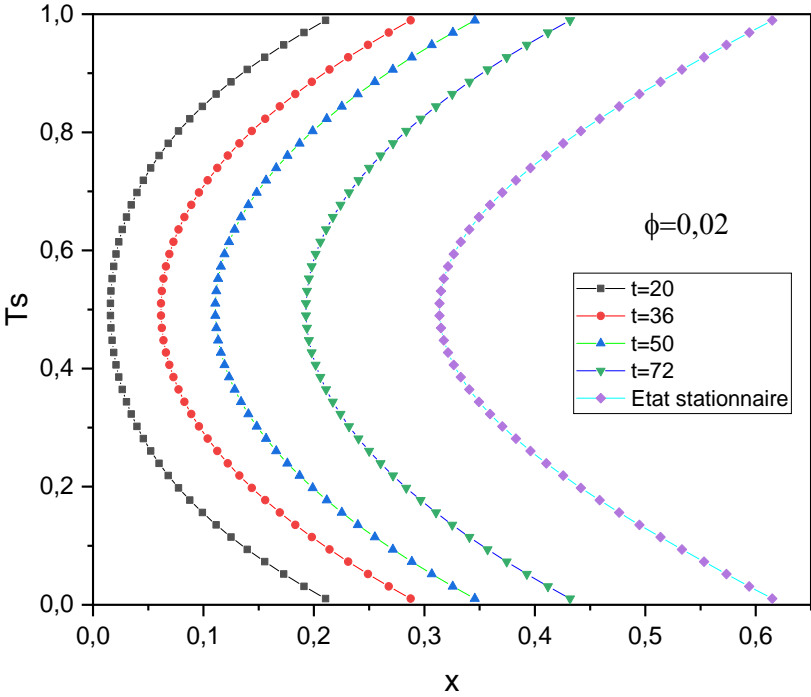


Figure (VI-8) Répartition de la température à la sortie du canal pour l'eau ($\phi = 0$) à des différents instants (cas de flux constant).

On constate que l'effet de la fraction volumique sur la variation de la température à la sortie du canal est négligeable. Le taux de transfert thermique pour le cas de flux constant est supérieur à celui du cas de condition de température constante comme le montre la figure (VI-10).



Figure(VI-9) Répartition de la température à la sortie du canal pour l'eau ($\phi = 0.02$) à des différents instants (cas de flux constant).

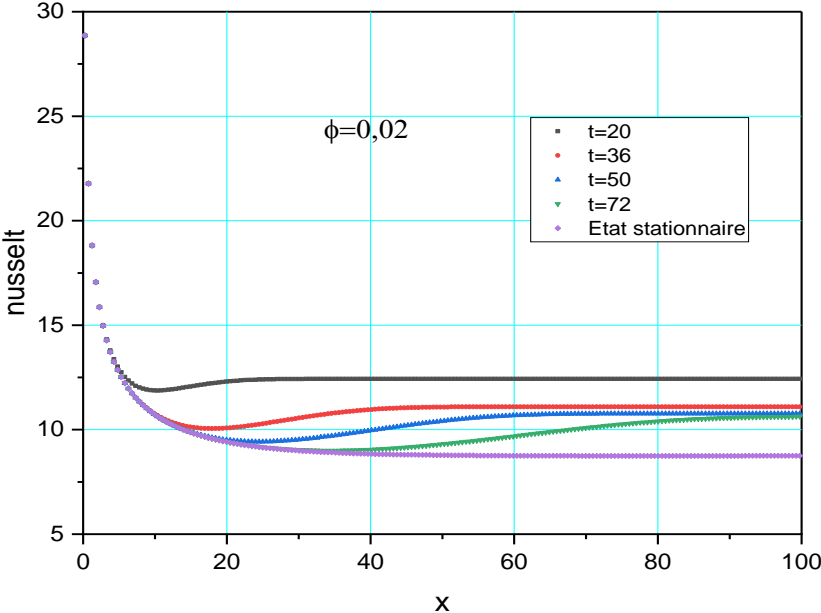


Figure (VI-10) Variation du nombre de Nusselt local le long du canal pour le le nanofluide ($\phi = 0.02$) à des différents instants (cas de flux constant).

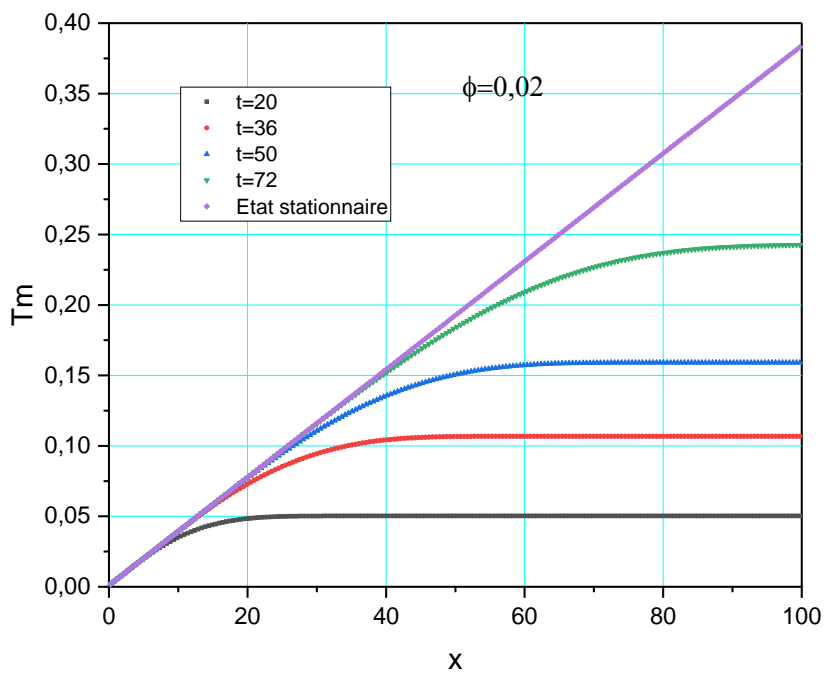


Figure (VI-11) Distribution de la température moyenne le long du canal pour le nanofluide ($\phi = 0.02$) à des différents instants (cas de flux constant).

La distribution de la température moyenne le long du canal à des différents instants est représentée sur la figure (VI-11). On constate que température moyenne subit une variation linéaire pour le cas du régime stationnaire.

Conclusion générale

Dans le cadre de cette étude, le transfert thermique lors de l'écoulement laminaire totalement développé hydrodynamiquement d'un nanofluide entre deux plaques parallèles chauffées à des températures constantes ou à des flux constants est étudié numériquement dans des conditions d'un régime transitoire.

L'addition de nanoparticules de cuivre dans l'eau pure augmente sa conductivité thermique et donc améliore le transfert de chaleur par conduction dans le nanofluide comparé au transfert de chaleur par conduction dans le fluide de base.

Le type de conditions de chauffage (température constante ou flux constant) influe sur le taux de transfert thermique. On a constaté que le transfert augmente pour les conditions du flux constant comparable à celui du cas de température constante.

Bibliographie

- [1] **W. Yu, S.U.S. Choi** (2003). Le rôle des couches interfaciales dans la conductivité thermique améliorée des nanofluides: un modèle Maxwell rénové. , 5 (1-2), 167-171. doi: 10.1023 / a: 1024438603801
- [2] **E.E. (Stathis) Michaelides**, Nanofluidics: Thermodynamic and Transport Properties, Springer International Publishing Switzerland. 2014.
- [3] **Sarit K .Das**, Stephen U.S. Choi, Wenhua Yu. Nanofluids Science and Technology. WILEY 2007.
- [4] **KHENTOUL MOUSSA**, étude numérique de la convection mixte dans un canal horizontal contenant des ailettes, thèse de doctorat 3èmcycle (LMD)en génie mécanique, option : génie thermique et énergétique, université de Constantine 2016.
- [5] **RIBIERO João-Paulo**, Dossier Technique de l'ingénieur, nm5115, Nanofluides pour les applications thermiques, 2009
- [6] **FOHANNO Stéphane et al**, 'Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle', thèse université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2012.
- [7] **LAMRI Zeggar Asma**, Contribution à l'Etude Théorique des Transferts Thermiques Convectifs dans un Nanofluide. Application aux Modèles Monophasique et Diphasique, Thèse de Magister, Université de Frères Mentouri, 2014.
- [08] **J.C. Maxwell**. A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K., (1891).
- [09]**R.L. Hamilton** and O.K. Crosser. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 1(3), 187-191,1962.
- [10]**W. Yu, SUS. Choi**. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. J. nanoparticle Res5: 167-71, 2003.
- [11]**Bhattacharya P**, Saha SK, Yadav A, Phelan PE, Prasher RS. Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. Journal Applied Physics 2004; 95(11):6492–4
- [12]**A. Einstein**. Investigations on the Theory of the Brownian Movement. Dover Publications,New York, 1956.

Bibliographie

[13] **Brinkman HC.** The viscosity of concentrated suspensions and solution. Journal of Chemical Physics 1952;20:571–81.

[14] **David D. (2008).** Nanofluides l'efficacité à la hausse. <http://www.cooling-masters.com>

Résumé

Dans ce travail nous proposons une étude numérique du transfert de chaleur en régime transitoire pour un écoulement totalement développé d'un nanofluide entre deux plaques parallèles. L'équation différentielle de conservation de l'énergie a été intégrée et discrétisée en utilisant la méthode des volumes finis. Les résultats numériques obtenus à des différents moments sont présentés sous formes des lignes isothermes et la variation du nombre de Nusselt local le long de la plaque chaude. Cette étude a été réalisée pour un conduit de longueur $L=50.b$ et une fraction volumique des nanoparticules $\phi=0.02$

Mots clés : transfert de chaleur, nanofluide, plaques parallèles, méthode des volumes finis

Abstract

In this work we propose a numerical study of the heat transfer in transient regime for a fully developed flow of a nanofluid between two parallel plates. The differential energy conservation equation has been integrated and discretized using the finite volume method. Numerical results obtained at different times are presented in the form of isothermal lines and the variation of the local Nusselt number along the hot plate. This study was carried out for a pipe of length $L = 50.b$ and a volume fraction of the nanoparticles $\phi = 0.02$.

Keywords: *heat transfer, nanofluid, parallel plates, finite volume method*

ملخص

في هذا العمل نقترح دراسة عددية لانتقال الحرارة التعلق بالزمن لدفق متطور بالكامل من سائل نانوي بين صفيحتين متوازيتين. تم تكامل المعادلة التفاضلية للحفاظ على الطاقة وتقديرها باستخدام طريقة الحجم المحدودة. يتم عرض النتائج العددية التي تم الحصول عليها في أوقات مختلفة في شكل خطوط متساوية وتغير عدد النيسالت على طول الصفيحة الساخنة. أجريت هذه الدراسة لأنبوب طوله $L=50.b$ وجزء حجمي من الجسيمات النانوية

$$\phi = 0.02$$

الكلمات المفتاحية: نقل الحرارة ، الموائع النانوية ، الصفائح المتوازية ، طريقة الحجم المحدودة