

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : ENERGÉTIQUE

PAR :

BAZIZI RACHIDA

HAMIMI SOFIANE

Thème

Analyse numérique d'un écoulement en convection mixte d'un nanofluide dans un milieu poreux avec le modèle de buongiorno en présence d'une réaction chimique

Soutenu le mercredi 27 juin 2018 devant le jury :

Président : Mr. F. MENDIL

Examineur : Mr. N. BOUTALBI

Encadreur : Mr. H. ALI AGHA

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté d'entamer et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de

Mr H.ALI AGHA,

On le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également au membre du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

Enfin nous tenons à remercier tous les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le

Respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce travail:

A Ma tendre Mère :

Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A Mon très cher Père :

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A Mon Encadreur Mr H. ALI AGHA

Votre compétence, votre encadrement ont toujours suscité mon profond respect.

Je vous remercie pour votre accueil et vos conseils.

A mes très cher frères et sœurs:

Pour leurs soutient moral m'a permis de réussir mes études. Ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.

A monsieur Mr H. BENSLIMANE, Mr M. AZZI et Mr M. ADNANI:

Qui n'ont cessé pas de m'encourager et me conseillée. Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma profonde estime.

A tous mes amis et mes collègues :

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

A ma très chère sœur Uihak , a mon cher frère Zbdellah et à mon binôme Sofiane.

Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma profond estime, que dieu vous procure bonne santé et long vie

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

RACHIDA

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le

Respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce travail:

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur,
celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon
bonheur ; maman que j'adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères et mes sœurs,
je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils,
aides, et encouragements.*

A Mon Encadreur Mr H. ALI AGHA

Votre compétence, votre encadrement ont toujours suscité mon profond respect.

Je vous remercie pour votre accueil et vos conseils.

A toute ma famille, et mes amis,

*Zui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont
accompagné durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues
d'étude.*

A ma cher et aime djidji, et mon binôme Rachida

*Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma profond estime, que dieu
vous procure bonne santé et long vie.*

*A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études, et à tous ceux qui me soutiennent
et que j'ai omis de citer qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible,
je vous dis merci.*

SOFIENE

SOMMAIRE

| | |
|------------------------------------|----|
| Nomenclature..... | I |
| Liste des figures et tableaux..... | IV |
| Introduction générale | 1 |

Chapitre I : Théorie et contexte scientifique

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction | 3 |
| I.2. Milieux poreux | |
| I.2.1. Définition du milieu poreux..... | 3 |
| I.2.2. Classification des milieux poreux..... | 4 |
| I.2.3. Propriétés des milieux poreux..... | 4 |
| I.2.4. Caractéristiques du milieu poreux..... | 5 |
| I.2.5. Modèle des écoulements à travers les milieux poreux | 5 |
| I.2.5.1. Modèle de Darcy..... | 6 |
| I.2.5.2. Modèle de Brinkman..... | 6 |
| I.2.5.3. Modèle Forchheimer..... | 6 |
| I.3. Nanofluides | |
| I.3.1. Définition..... | 7 |
| I.3.2. Fabrication des nanofluides..... | 8 |
| I.3.3. Propriétés thermophysique des nanofluides..... | 8 |
| I.3.3.1. Fraction volumique (ϕ)..... | 9 |
| I.3.3.2. Conductivité thermique (k)..... | 9 |
| I.3.3.3. Viscosité dynamique (μ)..... | 10 |
| I.3.3.4. Masse volumique (ρ)..... | 10 |
| I.3.4. Applications des nanofluides..... | 10 |

| | |
|---|----|
| I.4.Mécanismes du transfert de chaleur..... | 11 |
| I.4.1.Transfert de chaleur par conduction..... | 11 |
| I.4.2.Transfert de chaleur par convection..... | 11 |
| I.4.2.1. Convection forcée..... | 12 |
| I.4.2.2.Convection naturelle..... | 13 |
| I.4.2.3.Convection mixte..... | 13 |
| I.4.3.Domains d’application du transfert de chaleur par convection..... | 13 |
| I.5. Couche limite | |
| I.5.1.Couche limite dynamique..... | 13 |
| I.5.2. Couche limite thermique..... | 14 |
| I.5.3. Couche limite massique..... | 14 |
| I.5.4. Concept de couche limite..... | 15 |
| I.5.5.Aspect physique de l’écoulement..... | 15 |
| I.5.6.Aspect mathématique..... | 16 |
| I.5.6.1.L’équation de continuité..... | 16 |
| I.5.6.2.Équation de quantité de mouvement..... | 16 |
| I.5.6.3.L’équation d’énergie..... | 17 |
| I.5.6.4.L’équation massique..... | 17 |
| I.6. Conclusion..... | 17 |

Chapitre II : Synthèse bibliographique et modélisation mathématique

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction..... | 18 |
| II.2. Synthèse bibliographique..... | 18 |
| II.3. Description du problème physique..... | 23 |
| II.4. Equations gouvernantes..... | 23 |

| | |
|-----------------------|----|
| II.5. Conclusion..... | 28 |
|-----------------------|----|

Chapitre III : Résultats et discussion

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction..... | 29 |
| III.2. Méthode numérique..... | 29 |
| III.3. Validation de programme..... | 29 |
| III.4. Résultats et discussions..... | 31 |
| III.4.1. Profils de vitesse adimensionnelle..... | 31 |
| III.4.2. Profils de température adimensionnelle..... | 33 |
| III.4.3. Profils de concentration adimensionnelle..... | 35 |
| III.4.4. Profils de fraction volumique adimensionnelle..... | 36 |
| III.5. Variation du taux de transfert de chaleur local Nu_x | 38 |
| III.6. Variation du taux de transfert de masse local Sh_x et Sh'_x | 40 |
| III.7. Conclusion..... | 43 |
| Conclusion générale..... | 44 |

Nomenclature

| Symboles | Définitions | Unités(SI) |
|-----------------|---|---------------------------------|
| C | Concentration massique | kg.m^{-3} |
| D | Diffusivité massique | $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ |
| D_B | Coefficient de diffusion Brownien | $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ |
| D_T | Coefficient de diffusion thermophorèse | $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ |
| D_{sm} | Diffusivité solutale de milieu poreux | $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ |
| F | Fraction volumique adimensionnelle | / |
| F | Paramètre de Forchheimer | / |
| g | Accélération de gravité | m.s^{-2} |
| H | Coefficient de transfert de chaleur | $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ |
| h | Concentration adimensionnelle | / |
| K | Perméabilité | m^2 |
| Kr | Paramètre de la réaction chimique | / |
| L | Longueur | m |
| l | Longueur de chemin direct | m |
| Le | Nombre de Lewis | / |
| Le_p | Nombre de Lewis des nanoparticules | / |
| lm | Longueur de chemin parcouru | m |
| m | Masse de fluide | kg |
| Nb | Paramètre de mouvement Brownien | / |
| Nc | Taux de flottabilité de fluide de base | / |
| Nr | Taux de flottabilité des nanoparticules | / |

Nomenclature

| | | |
|------------|---|-------------|
| N_t | Paramètre de mouvement thermophorèse | / |
| Nu | Nombre Nusselt | / |
| Pe_x | Nombre de Peclet | / |
| q_w | Flux massique de la paroi | W |
| q'_w | Flux massique à la surface | W |
| q''_w | Flux massique de nanoparticules | W |
| Ra | Nombre de Rayleigh | / |
| S | Section [chapitre I] | m^2 |
| s | Fonction de lignes de courant adimensionnelle | / |
| s' | Vitesse adimensionnelle | / |
| Sh | Nombre Sherwood | / |
| Sh'_x | Nombre de Sherwood local de nanofluide | / |
| T | Température | K |
| Tu | Tortuosité | / |
| T_w | Température à la paroi | K |
| T_∞ | Température de fluide à l'infini | K |
| P | Pression de fluide [chapitre I] | Pa |
| Q | Débit massique | $kg.s^{-1}$ |
| V | Vitesse de Darcy | $m.s^{-1}$ |
| V_f | Volume de fluide de base | m^3 |
| V_s | Volume de solide | m^3 |

Nomenclature

| Symboles grecs | Définitions | Unités (SI) |
|-----------------------|---|--------------------|
| k_f | Conductivité thermique de fluide de base | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| k_m | Conductivité thermique de milieu poreux | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| k_{nf} | Conductivité thermique de nanofluide | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| k_s | Conductivité thermique des particules solides | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| ε | Porosité | / |
| μ | Viscosité dynamique | $kg.m^{-1}.s^{-1}$ |
| μ_f | Viscosité dynamique de fluide de base | Pa.s |
| μ_{nf} | Viscosité dynamique d'un nanofluide | Pa.s |
| ρ | Masse volumique | $kg.m^{-3}$ |
| ρ_f | Masse volumique de fluide | $kg.m^{-3}$ |
| ρ_{nf} | Masse volumique de nanofluide | $kg.m^{-3}$ |
| α_m | Diffusivité thermique | $m^2.s^{-1}$ |
| η | Variable de similitude | / |
| ϕ | Fraction volumique de nanoparticules | / |
| λ | Paramètre Convectif | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| λ_{eff} | Conductivité effectif | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| λ_d | Conductivité thermique statique | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| λ_t | Conductivité de dispersion | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| ΔP | Différence de pression | Pa |

Nomenclature

ΔT Différence de température K

C_p Capacité calorifique thermique $J.kg^{-1}$

Indices

Définitions

eff

Effective

f

Fluide

fb

Fluide de base

nf

Nanofluide

np

Nanoparticule

W

Paroi

Liste de figures

| | |
|---|----|
| Figure (I.1) Nanofluide vue au microscope électronique..... | 7 |
| Figure (I.2) Procèdes de synthèse de nanofluide a une seul étape..... | 8 |
| Figure (I.3) Variation de l'épaisseur et de la vitesse de la couche limite dynamique..... | 14 |
| Figure (I.4) Couche limite thermique..... | 14 |
| Figure (I.5) Développement d'une couche limite massique le long d'une plaque plane... | 15 |
| Figure (I.6) Représentation schématique du modèle..... | 16 |
| Figure (II.1) Modèle de flux est système de coordonnées physique..... | 18 |
| Figure (II.2) Illustration physique du problème..... | 20 |
| Figure (II.3) Schéma de l'écoulement de la couche limite sur la feuille d'étirement..... | 21 |
| Figure (II.4) Géométrie du problème et système de coordonnées..... | 23 |
| Figure (III.1) Variation de profils de vitesse avec η pour N_b et N_t | 31 |
| Figure (III.2) Variation de profils de vitesse avec η pour F_o et λ | 32 |
| Figure (III.3) Variation de profils de vitesse avec η pour N_c et λ | 32 |
| Figure (III.4) Effet de N_t et λ sur le profile de température adimensionnelle..... | 33 |
| Figure (III.5) Effet de N_r et λ sur le profile de température adimensionnelle..... | 34 |
| Figure (III.6) Effet de F_o et N_b sur le profile de température adimensionnelle..... | 34 |
| Figure (III.7) Effet de Le et N_c sur le profile de concentration adimensionnelle..... | 35 |
| Figure (III.8) L'effet de F_o et λ sur le profile de concentration adimensionnelle..... | 35 |
| Figure (III.9) L'effet de Kr et Le sur le profile de concentration adimensionnelle..... | 36 |
| Figure (III.10) Profile de fraction volumique pour F_o et N_r | 37 |
| Figure (III.11) Profile de fraction volumique pour Le_p et λ | 37 |

| | |
|--|----|
| Figure (III.12) Effet de Nb et Nt sur le profile de fraction volumique adimensionnelle | 38 |
| Figure (III.13) Variation de $Nu_x/Pe^{0.5}$ avec Fo et λ | 38 |
| Figure (III.14) Variation de $Nu_x/Pe^{0.5}$ avec Nt, Nb et λ | 39 |
| Figure (III.15) Variation de $Nu_x/Pe^{0.5}$ avec Nr et λ | 39 |
| Figure (III.16) Variation de $Sh_x/Pe^{0.5}$ avec Nc et λ | 40 |
| Figure (III.17) Variation de $Sh_x/Pe^{0.5}$ avec Le et λ | 41 |
| Figure (III.18) Variation de $Sh_x/Pe^{0.5}$ avec Kr et λ | 41 |
| Figure (III.19) Variation de $Sh'_x/Pe^{0.5}$ avec Lep et λ | 42 |
| Figure (III.20) Variation de $Sh'_x/Pe^{0.5}$ avec Nr et λ | 42 |
| Figure (III.21) Variation de $Sh'_x/Pe^{0.5}$ avec Nt, Nb et λ | 43 |

Liste de Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau (III.1) Comparaison des résultats avec Murthy..... | 30 |
| Tableau (III.2) Comparaison des résultats avec Murthy..... | 30 |

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

De nos jours, l'un des objectifs de la recherche scientifique dans les industries se rapporte à la résolution des questions relatives aux économies des opérations de transformations d'énergie pour atteindre l'optimum. Dans ce contexte, les études menées se fixent comme objectifs une connaissance détaillée et fiable du comportement des systèmes complexes induits par des matériaux ou fluides nouveaux et en présence des phénomènes de plus en plus variés et induisant des mécanismes nouveaux.

La recherche théorique et appliquée dans l'écoulement du fluide et les transferts convectifs thermiques et massique à travers les milieux poreux ont reçu l'attention soutenue pendant les trois décennies passées en raison des phénomènes particuliers dans ces milieux et qui sont souvent rencontrés dans les procédés industriels et surtout en industrie chimique, dans l'ingénierie des réservoirs de gaz et pétrole, notamment lors de la récupération tertiaire. Le refroidissement par évaporation, ainsi que par solidification sont quelques applications où la convection mixte thermo-solutale dans les milieux poreux est observée.

Le transfert de chaleur et de masse par convection mixte dans un milieu poreux comprend plusieurs effets physiques importants, par exemple, l'effet d'un milieu poreux non Darcéen dû aux forces d'inertie à l'échelle des pores, sur la quantité de mouvement, l'énergie, et transport de masse a été étudié en profondeur pour plusieurs configurations géométriques et conditions aux limites, de telle sorte qu'il existe actuellement le modèle couplé de Brinkman - Forchheimer (modèle généralisé) qui est utilisé par les chercheurs, si le modèle classique (de Darcy) n'est pas valide. Ainsi cette matrice qu'est le milieu poreux n'est pas modélisable simplement et requiert une attention soutenue.

Par conséquent, il existe des effets qui ont un intérêt significatif sur le transport thermique et massique dans les milieux poreux, on peut citer à titre exemple, la variation de la porosité, la dispersion thermique et massique, la variation des propriétés physiques de fluide comme la viscosité et la conductivité thermique, l'effet de l'équilibre thermique entre le fluide et le solide, la radiation thermique, la réaction chimique... etc., et parfois, on est dans une situation où un couplage fort de ces effets est mis en place, alors l'étude des phénomènes de transport devient très compliquée.

L'une des nouvelles stratégies d'optimisation des échanges thermique, consiste à modifier la nature du fluide caloporteur afin d'améliorer ses propriétés thermiques. Les nanofluides

Introduction générale

sont aujourd'hui considérés comme étant une nouvelle catégorie de fluide, permettent d'améliorer les performances thermiques des systèmes faisant intervenir les échanges convectif. Ces derniers sont des solutions contenant des nanoparticules en suspension dans un fluide à base classique telle l'eau par exemple. Grâce à leurs propriétés améliorées de transfert thermique, les nanofluides peuvent être utilisés dans une multitude d'applications en ingénierie : l'industrie automobile, le génie biomédical, le refroidissement des éléments électroniques...etc.,

Dans ce travail, nous présentons, une étude numérique d'un écoulement en convection mixte d'un nanofluide dans un milieu poreux non Darcéen au voisinage d'une plaque verticale isothermique en présence d'une réaction chimique qui se déroule dans le milieu.

Le présent travail est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est dédié aux caractéristiques des milieux poreux, l'écoulement de fluide à travers ces milieux et le transfert thermique dans les milieux poreux saturés d'un fluide, suivi par une partie concernant les nanofluides (caractérisation et application).

Le deuxième chapitre est destiné à l'étude numérique d'un écoulement d'un nanofluide en convection mixte en présence d'une réaction chimique d'ordre 1 sur une plaque verticale dans un milieu poreux non-Darcéen. Débuté par un état de l'art réalisé dans ce domaine d'intérêt, et suivi par une formulation mathématique du problème physique sous forme d'équations différentielles.

Quant au chapitre suivant il est consacré à la présentation de la méthode de résolution suivi par une analyse des principaux résultats obtenus pour décrire l'influence de différents paramètres qui contrôlent le problème.

Une conclusion générale rassemble les principaux résultats obtenus dans cette étude et des perspectives qui peuvent être envisagées comme projets de recherche.

Chapitre I : Théorie et contexte scientifique

I.1. Introduction

Les milieux poreux sont très divers et utilisés dans de nombreuses applications industrielles et expérimentales. Le transfert de chaleur et de masse à travers les milieux poreux saturés est en développement important et constitue une zone de croissance très rapide dans la recherche en domaine des transferts contemporains. Ces milieux complexes sont très difficiles à modéliser.

Les phénomènes qui se déroulent dans les milieux poreux dépendent, en général, d'un certain nombre de propriétés dont : les propriétés de stockage des fluides (soit sous forme adsorbée sur le solide, soit remplissant les pores), les propriétés de transfert (masse, quantité de mouvement, énergie) et enfin les propriétés mécaniques. Comme pour tous les systèmes hétérogènes polyphases, ces propriétés sont évidemment fonction de la morphologie de la matrice et des phénomènes qui se développent et interagissent dans les différentes phases, ce qui rend le champ d'étude des transferts thermique et massique en milieux poreux particulièrement vaste.

Les efforts visant à améliorer les échangeurs thermiques dans de nombreux secteurs industriels (automobile, électronique...) nécessitent l'intensification des transferts de chaleur par convection. Les améliorations dites « passives », au niveau des surfaces d'échange, sont une voie déjà largement explorée et atteignent leurs limites. De nouvelles voies d'optimisation doivent donc être étudiées. L'une d'elles consiste à utiliser de nouveaux fluides capables d'accroître les transferts thermiques : c'est le cas des nanofluides.

Ces fluides comportent des nanoparticules en suspension qui présentent l'avantage d'accroître de façon significative la conductivité thermique du fluide. Ces développements restent limités au niveau pré industriel mais peuvent constituer à terme une évolution importante de la technologie des fluides thermiques.

I.2. Milieux poreux

I.2.1. Définition du milieu poreux

Un milieu poreux est un matériau massif formé de cavités de volume et de surfaces variées appelés les pores, interconnectés partiellement ou totalement entre eux par des canaux. L'écoulement du fluide se fait seulement à travers les pores interconnectés. [1]

I.2.2. Classification des milieux poreux :

Les milieux poreux ont généralement deux formes :

- **milieu poreux consolidé :**

Où la phase solide est compactée rigide (les roches, les gènes, la céramique ...)

- **milieu poreux non consolidé :**

Dans lequel la phase solide est formée de grains (gravier, sable, ..) ou fibres (laine de verre, coton, ...) non soudés entre eux.

I.2.3. Propriétés des milieux poreux

I.2.3.1. Porosité

La porosité d'un matériau caractérise l'importance des vides (pores) qu'il contient et représente la fraction du volume occupé par les pores sur le volume totale du milieu poreux.

C'est un concept indépendant de la forme et des connexions entre les pores dont seuls les volumes sont considérés, elle est définie par :

$$\varepsilon = \frac{V_{pore}}{V_{total}} \quad (I.1)$$

I.2.3.2. Perméabilité

Elle est définie comme la capacité du milieu à laisser le fluide sous un gradient de pression. Lorsque le milieu poreux contient un seul liquide la perméabilité est donnée par la loi exponentielle de Darcy (1856) [2] :

$$K = \frac{\mu V}{\frac{\Delta p}{l}} \quad (I.2)$$

V : Vitesse Darcienne (m/s)

μ : Viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

$\frac{\Delta p}{l}$: Gradient de pression (Pa/m)

I.2.3.3. Tortuosité

C'est le rapport entre la longueur traversée par une particule fluide entre deux points de la matrice solide et la longueur du chemin directe entre les mêmes points [2].

$$Tu = \frac{lm}{l} \quad (I.3)$$

Tu : tortuosité ;

lm : longueur de chemin parcouru (m) ;

l : longueur de chemin directe (m).

I.2.4. Caractéristiques du milieu poreux

I.2.4.1. Viscosité effective

La notion de viscosité effective a été initialement introduite par Brinkman (1947) afin de traiter la discontinuité des contraintes aux interfaces fluides poreuses. Il a suggère de prendre la viscosité effective égale à la viscosité du fluide [1].

I.2.4.2. Conductivité effective :

La complexité de la structure géométrique du milieu poreux, ainsi que la présence de deux phases (solide et fluide) et leurs propriétés thermiques différentes, fait que la notion de la conductivité thermique effective soit introduite.

$$\lambda_{eff} = \lambda_d + \lambda_t \quad (I.4)$$

λ_d : Conductivité thermique statique (W/m.K)

λ_t : Conductivité thermique de dispersion (W/m.K)

La conductivité thermique statique dépend de celle du fluide et celle de solide. Par contre, la conductivité thermique de dispersion représente l'interaction entre le champ de vitesse à l'échelle des pores.

I.2.5. Modèle des écoulements à travers les milieux poreux :

En raison de la complexité géométrique de l'espace des pores, l'approche de la mécanique des milieux continus pour établir les modèles de conservation de la quantité du mouvement et

de l'énergie, ne peut être appliquée qu'après passage à une échelle macroscopique qui permet d'établir une équivalence entre le milieu réel dispersé et un milieu continu fictif.

Le premier modèle a été proposé par Darcy (1856) et depuis pour tenir compte de certains effets négligés par ce dernier [1].

I.2.5.1. Modèle de Darcy :

Pour l'étude de la convection en milieu poreux, la grande majorité des études utilise la formulation classique de Darcy. Qui exprime la proportionnalité entre les variations de pression Δp et le débit Q lié à la vitesse de filtration v . Ceci se traduit pour un échantillon de longueur L et de section S , par la relation suivante [3] :

$$Q = \frac{K}{\mu_f} S \frac{\Delta p}{L} \quad (\text{I.5})$$

μ_f : Viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

K : Perméabilité (m^2)

I.2.5.2. Modèle de Brinkman :

Brinkman a introduit dans la loi de Darcy, un terme équivalent au terme de dissipation visqueuse dans la loi de Stokes. Sa formule est donnée par :

$$\vec{\nabla} p = -\frac{\mu}{K} \vec{V} + \mu_{\text{eff}} \vec{\nabla} V + \rho \vec{g} \quad (\text{I.6})$$

I.2.5.3. Modèle Forchheimer :

Lorsque la vitesse débitante augmente, les forces d'inertie ne sont plus négligeables. Dans ce cas, on montre expérimentalement pour un gradient de pression fixe, le débit mesuré est plus petit qu'il ne le serait avec la loi de Darcy. Forchheimer a proposé une modification empirique de la loi de Darcy en ajoutant une relation non linéaire du second ordre entre le gradient de pression et la vitesse de filtration.

$$\vec{\nabla} p = -\frac{\mu}{K} \vec{V} - \frac{f \rho_f}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (\text{I.7})$$

f : Paramètre caractéristique de la géométrie du milieu poreux

I.3. Nanofluides

I.3.1. Définition

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées des particules de taille nanométrique (nanoparticules) en suspension dans un liquide qui s'appelle un liquide de base afin d'améliorer certaines propriétés.

Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. Or les fluides les plus employés tels que l'eau, l'huile ou l'éthylène glycol (EG) ne disposent que d'une conductivité thermique faible par rapport à celle des solides cristallins, avec les nanofluides l'idée est alors d'insérer au sien du fluide de base des nanoparticules afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange [4].

Parmi les nanoparticules utilisés pour obtenir les nanofluides on peut citer : [5]

- **Métalliques** : le cuivre (Cu), l'aluminium (Al), l'or (Au), l'argent (Ag)
- **Oxydes** : l'oxyde de cuivre (CuO), l'oxyde de l'aluminium (Al_2O_3) le dioxyde de titane (TiO_2)

Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps d'éviter tout phénomène d'aggrégation, 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 - les huiles - toluène.

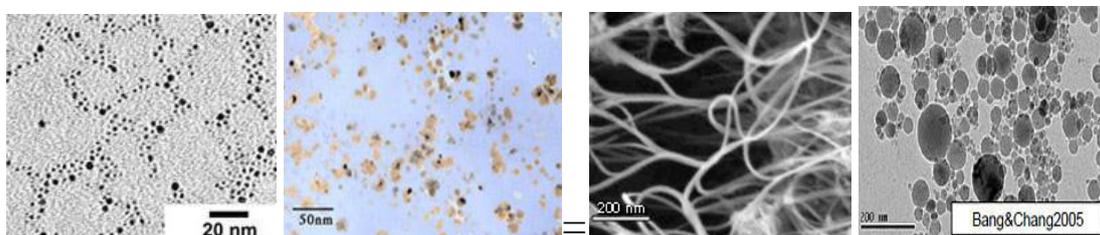


Figure (I.1) : Nanofluides vus au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% ; eau + Nanotube ; eau + alumine ; eau + or à 2nm [4]

I.3.2. Fabrication des nanofluides

Il existe plusieurs procédés de fabrication de nanoparticule, on peut les classer en deux classes :

- **les procédés physiques**, comme le broyage mécanique
- **les procédés chimiques**, comme la précipitation chimique

Par contre pour la préparation des nanofluides il existe deux méthodes différentes :

- **La méthode en deux étapes** : consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base.
- **La méthode en une seule étape** : consiste à la dispersion des nanoparticules directement dans un fluide de base (synthèse directe dans un fluide de base). [6]

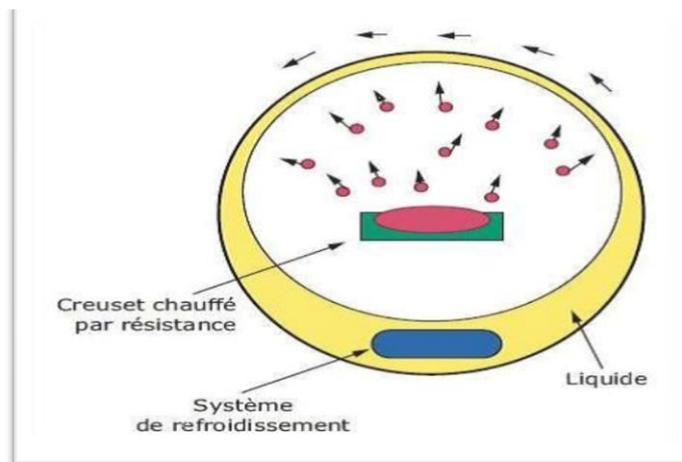


Figure (I.2) : Procédés de synthèse de nanofluides en une seule étape (Argonne National Laboratoire, USA) [4].

I.3.3. Propriétés thermophysique des nanofluides

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 une file chaude en régime transitoire. Les méthodes stationnaires utilisant une différence de température entre deux plaques ou deux cylindres et les méthodes optiques basées sur la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température [7].

I.3.3.1. Fraction volumique (φ)

La fraction volumique et le rapport entre le volume de solide (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base) sa valeur est variée entre 0 et 1 [8].

$$\varphi = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (\text{I.8})$$

V_s : Volume de particule solide (m^3)

V_f : Volume du fluide de base (m^3)

I.3.3.2. Conductivité thermique (k)

La conductivité thermique est une propriété très importante dans notre étude parce qu'elle joue un rôle essentiel dans le phénomène de transfert de chaleur, elle dépend de la température et aussi elle varie en fonction de la fraction volumique. On peut calculée la conductivité thermique avec deux modèle différents :

- **Modèle de maxwell (1873)**

Le modèle de maxwell est valable uniquement dans le cas des nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules sphériques.

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\varphi k_f}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)\varphi} \quad (\text{I.9})$$

k_{nf} : La conductivité thermique du nanofluide

k_f : La conductivité thermique de fluide de base

k_s : La conductivité thermique des particules solides

- **Modèle de Hamilton et Grosseur (1962)**

Puisque le modèle de maxwell est valable seulement pour les nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, le modèle de Hamilton et grosseur a été développé pour le calcul de la conductivité thermique du nanofluide quel que soit la forme des nanoparticules, et ça en introduisant le facteur géométrique appelé la sphéricité (ψ).

$$k_{nf} = \frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)(k_s - k_f)\varphi k_f}{k_s + (n-1)k_f - (k_s - k_f)\varphi} \quad (\text{I.10})$$

Avec “ n ” le facteur de forme = $3/\psi$. ψ Étant la sphéricité de la particule

I.3.3.3. Viscosité dynamique (μ)

La viscosité dynamique est la résistance d’un fluide aux déformations lorsqu’il est mis en mouvement, comme étant une mesure de frottement interne d’un fluide.

La dispersion des nanoparticules dans le liquide de base a un effet sur la viscosité dynamique, cette dernière peut être influence par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide. Les deux modèles les plus courants pour le calcul de la viscosité dynamique :

- **Modèle d’Einstein (1906) :**

Pour un mélange contenant des particules fines sphériques et rigides la viscosité dynamique d’Einstein est donne par la relation suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5 \varphi) \quad (\text{I.11})$$

μ_{nf} : La viscosité dynamique d’un nanofluide

μ_f : Viscosité dynamique de fluide de base

φ : Fraction volumique des nanoparticules

- **Modèle de Brinkman (1952) :**

Brinkman (1952) a étudié la formule d’Einstein pour avoir la formule suivante :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (\text{I.12})$$

Remarque : pour les faibles fractions volumiques, la relation de Brinkman conduit exactement à celle d’Einstein.

I.3.3.4. Masse volumique (ρ)

Dans le cas d’un mélange la masse volumique est donne par la relation suivante :

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V} \right)_{nf} \quad (\text{I.13})$$

ρ_{nf} : Masse volumique de nanofluide

I.3.4.Applications des nanofluides

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaine d’application pour leur propriétés magnétiques (paliers magnétique, agent de contraste en imagerie médicale),

pour leur propriété électriques (dépôt conducteur électro mouillage pour lentilles liquides), et de marquage des de cellules ou de contrefaçon avec les nanoparticules fonctionnalisées.

En thermique, les nanofluides peuvent être utilisés partout où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquide 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 systèmes micros électromécanique [4].

Autre applications :

- L'échangeur de chaleur
- Le refroidissement d'élément électronique
- Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs
- Aéronautique et spatial
- Refroidissement des systèmes nucléaires
- Transport (gestion de refroidissement / véhicule moteur thermique)

I.4.Mécanismes du transfert de chaleur

I.4.1.Transfert de chaleur par conduction

La conduction est le transfert de chaleur d'une partie d'un corps à une autre partie du même corps sans déplacement appréciable des particules de ce corps. La conduction caractérise également le transfert de chaleur d'un corps à un autre corps en contact physique avec le premier. [9]

I.4.2.Transfert de chaleur par convection

Le mécanisme de transfert de chaleur appelé convection correspond au transfert de chaleur par un fluide en mouvement. A la différence du rayonnement thermique mais à l'identique de la conduction, ce mode de transfert existe à condition qu'il ait un support matériel, lorsque l'on veut transférer de la chaleur d'un point à un autre. Ce mécanisme de transfert de chaleur est donné par la loi de Newton [9] :

$$\phi = h A(T_w - T_\infty) \quad (\text{I.14})$$

ϕ : Flux de chaleur (W) ;

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$).

A : Aire de la surface de contact solide / fluide (m^2)

T_w : Température de la surface solide (K)

T_∞ : Température de la surface fluide loin de la surface (K)

Selon la géométrie du problème physique et le régime d'écoulement on utilise les appellations suivantes :

- convection externe ou interne
- régime laminaire ou turbulent
- Convection externe ou interne

En régime externe l'écoulement libre le long d'une paroi (plaque plane) et les écoulements libres sans présence de paroi (jets et couches cisillées) et en convection interne le fluide s'écoule entre des parois. [10]

➤ **Convection laminaire ou turbulente**

En régime de convection laminaire la vitesse du fluide et la température ne dépendent pas du temps opposition, en régime de convection turbulente l'écoulement est composé d'un ensemble de tourbillons de différentes tailles, la conséquence est que la vitesse et la température sont en fonction du temps. [10]

I.4.2.1. Convection forcée

Le phénomène de convection forcée apparaît quand le mouvement du fluide est imposé par une cause mécanique extérieure au système (pompe, ventilateur ...) [1-6]

I.4.2.2. Convection naturelle

Le phénomène de la convection thermique naturelle apparaît spontanément, sous le seul effet des différences de masse volumique résultantes des différences de températures sur les frontières et sous un champ de forces extérieures (gravité...) [1-6]

I.4.2.3. Convection mixte

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

L'étude de la convection a suscité et suscite encore aujourd'hui l'intérêt de nombreux scientifiques et industriels. Les recherches menées dans ce domaine, s'étendent sur peu plus d'un siècle. Un nombre considérable de travaux a été entrepris, suite à la découverte du phénomène par les expériences de Bernard et l'analyse théorique de Rayleigh au début de vingtième siècle.

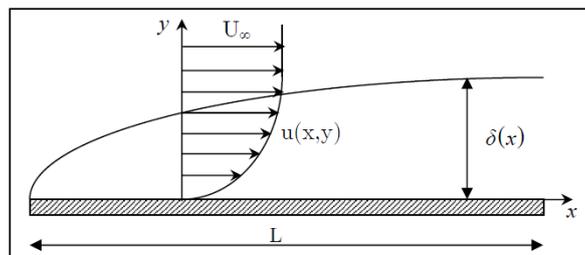
I.4.3. Domaines d'application du transfert de chaleur par convection

Les domaines d'applications des transferts de chaleur par convection sont variés et à différentes échelles spatiales. Aux grandes échelles, par exemples, on peut citer la prédiction météorologique, le climat et la circulation océanique. A plus petites échelles cela concerne de nombreuses applications industrielles comme le refroidissement dans les centrales nucléaires, des aubages de turbine ou des microprocesseurs, le dimensionnement des échangeurs de chaleur, le dégivrage des entrées d'air de réacteur, des applications domestiques comme le confort thermique les déperditions d'un double vitrage. [10]

I.5. Couche limite

I.5.1. Couche limite dynamique

Une des caractéristiques principales d'un fluide est la viscosité, elle varie avec la température et ne s'annule jamais. A la paroi, la vitesse du fluide est nulle et on observe des forces de frottement qui freinent l'écoulement.

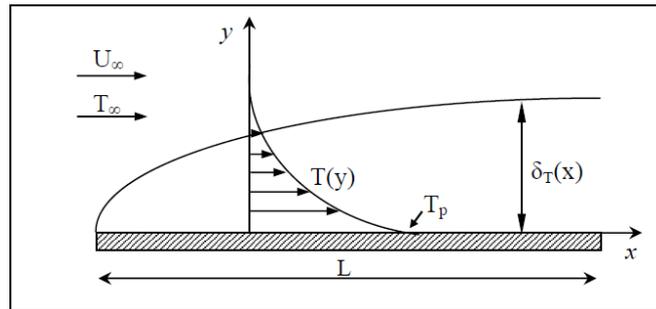


Figure(I.4) : variation de l'épaisseur et de la vitesse de la couche limite dynamique sur une paroi plane. [11]

I.5.2. Couche limite thermique

Lorsqu'un fluide de température à l'infini, s'écoule sur une paroi de température T_p , des échanges thermiques s'établissent. Les particules du fluide s'échauffent ou se refroidissent au contact de la paroi.

Ces particules échangent de la chaleur de proche en proche avec leur voisines et un gradient de température se forme.

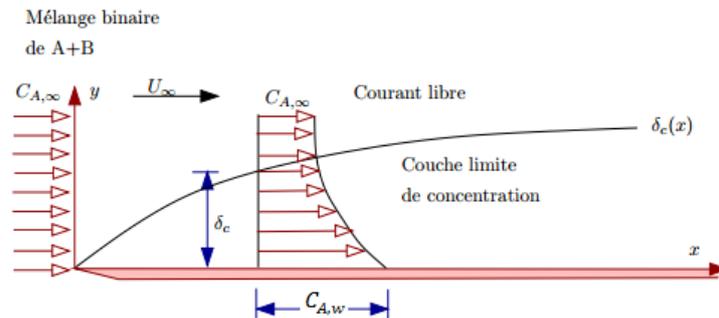


Figure(I.5) : Couche limite thermique sur un plaque plane [11]

I.5.3. Couche limite massique :

A l'image de la couche limite thermique la couche limite massique se développe au sien d'un écoulement de fluide en contact avec un corps lorsque les concentrations molaires de l'espèce considère à la surface de ce corps et dans le courant libre sont différents.

Considérons un mélange des espèces(a)et(b) qui s'écoule au-dessus d'une surface, la concentration molaire de l'espèce (a) a la surface est $C_{a,w}$ et est égale a $C_{a,\infty}$ au sien de l'écoulement libre ; si les deux concentration sont différentes il y'aura un transfert de l'espèce (a) par diffusion. La concentration de (a) est maximale au voisinage de la paroi et diminue lorsqu'on s'en éloigne, d'abord très rapidement puis de plus en plus lentement. [12]



Figure(I.6) : développement d'une couche limite massique le long d'une plaque plane. [12]

I.5.4. Concept de couche limite

Considérons l'écoulement d'un fluide avec une vitesse à l'infini amant U_∞ , et une température T_∞ sur une plaque plane à une température T_p . Au voisinage de la paroi, les valeurs de la vitesse et de la température sont différentes de celles de l'écoulement et varient en fonction de la distance à la paroi. Cette zone de gradients de vitesse et de température est appelée couche limite, elle résulte d'un échange de quantité de mouvement et de chaleur entre le fluide et la paroi. Son épaisseur est généralement petite par rapport à l'ensemble de l'écoulement.

I.5.5. Aspect physique de l'écoulement

Dans notre environnement quotidien, les manifestations de la convection naturelle sont plus présentes que les effets de la convection forcée, même si elles ne sont pas toujours directement perceptibles par nos sens. C'est ainsi que dans n'importe quelle salle d'habitation nous sommes entourés en permanence de mouvement d'air, celui-ci se réchauffe en montant le long des parois les plus chaudes et se refroidit en descendant le long des parois les plus froides. La diversité des situations est également plus grande en convection libre ou naturelle que la convection forcée.

Les courants libres de la convection provoqués par des différences de la température, l'écoulement est également affecté par les différences des constitutions matérielles, par exemple dans les écoulements atmosphériques il existe des différences de concentration de l'eau et par conséquent l'écoulement est affecté par une telle différence de concentration.

On considère comme il est représenté sur la figure une plaque plane de longueur semi-finie, cette dernière est immergée dans un fluide. Soit T_w et C_w la température et la concentration de

la paroi de la plaque, T_∞ et C_∞ la température et la concentration du fluide, une convection naturelle thermique et massique prend alors naissance.

I.5.6. Aspect mathématique

I.5.6.1. L'équation de continuité

L'équation de continuité exprime le principe de la conservation de la masse d'un fluide en mouvement. Dans un volume élémentaire, la masse du fluide prélevé ou injecté est égale à la somme de variation de la masse volumique du fluide durant un intervalle de temps élémentaire et des flux massiques traversant la surface de ce volume. Elle est définie par :

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho_f \vec{V}) = 0 \quad (\text{I.15})$$

Et lorsque le fluide est incompressible $\rho_f = Cte$

L'équation précédente est de forme :

$$\vec{\nabla}(\vec{V}) = 0 \quad (\text{I.16})$$

I.5.6.2. Équation de quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle et égale à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. Il s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{D(\rho \vec{V})}{Dt} = \rho \vec{F} - \overrightarrow{\text{grad}}(p) + \mu \Delta \vec{V} + \frac{1}{3} \mu \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}(\vec{V})) \quad (\text{I.17})$$

I.5.6.3. L'équation d'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique.

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = k_m \nabla^2 T \quad (\text{I.18})$$

Où $(\rho c)_m$, $(\rho c)_f$, et k_m sont respectivement la capacité calorifique thermique du milieu poreux saturé, la capacité calorifique thermique du fluide et la conductivité thermique.

I.5.6.4.L'équation massique

Le principe de conservation de la masse mène à l'équation de concentration suivante :

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V} \vec{\nabla} C = D \nabla^2 C \quad (\text{I.19})$$

Avec D étant la diffusivité massique du soluté dans la matrice poreuse saturée.

I.6. Conclusion

Le phénomène de transfert de chaleur et de masse en milieu poreux est encore en plein progressions, malgré les efforts des chercheurs et scientifiques dans ce domaine.

Le transfert de chaleur par convection mixte attire son attention dans divers progrès industriels comme le refroidissement d'équipement électronique, la technologie solaire et la sûreté nucléaire ...etc.

L'efficacité de tel processus est généralement limitée par les propriétés thermo-physiques de fluides utilisés. L'évolution des recherches traitant les nanofluides dans le but de progresser de façon appréciable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pur une faible concentration de nanoparticules.

Chapitre II : Synthèse
bibliographique et
modélisation mathématique

II.1. Introduction

L'étude du phénomène de transfert thermique et massique par l'écoulement de fluide à travers les milieux poreux est d'un grand intérêt. Le phénomène de l'écoulement est relativement complexe par rapport au processus de la convection thermique pur. Les processus du transfert thermique et massique dans les milieux poreux sont souvent rencontrés dans l'industrie chimique, particulièrement dans le « réservoir engineering », en convection avec processus de relèvement, refroidissement par évaporation, et solidification sont quelques applications où la convection thermo-solutale dans les milieux poreux sont observées. D'excellentes revues et critiques de l'écoulement à travers les milieux poreux en convection mixte sans ou avec une réaction chimique ont été présentés par de nombreux auteurs. Dans cette partie, nous présentons d'abord une synthèse bibliographique sur la convection en milieux poreux et saturés en écoulement réactif par des fluides. Ensuite, nous entamons la modélisation mathématique de notre problème ciblé.

II.2. Synthèse bibliographique

Dans ce stade d'intérêt, **D.srinivasa et G.swamy** [13] ont étudié le transfert chaleur par convection mixte et le transfert de masse le long d'une plaque verticale encastré dans une loi de puissance, milieu poreux de Darcy saturé d'un fluide en présence d'une réaction chimique sous l'effet de rayonnement. Les équations différentielles partielles sont transformées en équations ordinaires en utilisant les transformations de similitude, puis elles ont résolues numériquement avec la méthode de Rung-kutta technique de tir.

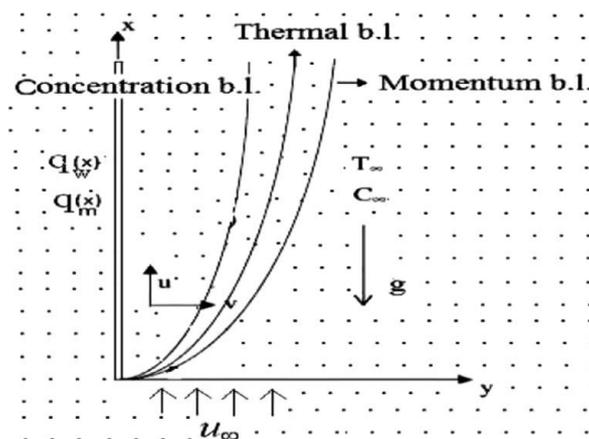


Figure II.1. Modèle d'écoulement et le système de coordonnées [13].

Les résultats montrent qu'une augmentation du paramètre de la réaction chimique provoque une diminution de la vitesse, la concentration et le taux de transfert de chaleur accompagnés par une augmentation de la température et de taux de transfert de masse. Les valeurs plus élevées du paramètre de rayonnement R provoquent une vitesse plus élevée.

J.V. Ramana, et al.[14] ont présenté l'étude d'un écoulement de convection libre instationnaire d'un nanofluide de type ((l'eau + Ag) et (l'eau + TiO_2)) au voisinage d'une plaque plane verticale en milieu poreux dans un système rotatif avec des conditions aux limites convectives. Les équations gouvernantes sont résolues analytiquement en utilisant une technique de perturbation. Les résultats montrent un excellent accord dans quelques cas spéciaux limites. De plus, ils ont observés que, le taux de transfert de chaleur dans le nanofluide (Ag + eau) est plus élevé que celui du nanofluide (eau + TiO_2) et les nanoparticules de formes sphériques améliorent le taux de transfert de chaleur par rapport aux formes cylindriques. Les paramètres de rayonnement et de champ magnétique ont tendance à réduire le coefficient de frottement. Une augmentation du nombre de Reynolds et de la fraction volumique des nanoparticules améliorent le taux de transfert de chaleur.

Dulal Pal, Babulal Talukdar [15] ont étudiés la combinaison de la convection et de rayonnement thermique d'un fluide visqueux le long d'une plaque verticale poreuse mobile semi-infinie immergée dans un milieu poreux en présence d'une source de chaleur et d'une réaction chimique de premier ordre avec un couplage d'un champ magnétique. La plaque se déplace avec une vitesse constante dans le sens de l'écoulement du fluide. Les résultats montrent que, la vitesse diminue avec l'augmentation du paramètre de la réaction chimique, le paramètre de source de chaleur, nombre de Prandtl et le paramètre de rayonnement, tandis que la tendance inverse est observée pour le paramètre d'indice exponentiel.

K. Sastry et al. [16] ont étudié un écoulement convectif mixte sur une surface verticale dans un milieu poreux non Darcy rempli d'un fluide non newtonien en présence de double dispersion thermique et massique et une réaction chimique. Les équations de la couche limite gouvernante à savoir celle de mouvement, l'énergie et la concentration sont converti en équations différentielles ordinaires en introduisant les variables de similitude, et ensuite résolus numériquement au moyen de la méthode de Rung-kutta avec technique de double tir.

K. U. Rehman et al. [17] ont présentés un écoulement magnétohydrodynamique d'un fluide non-Newtonien type Casson, en convection mixte le long une surface cylindrique inclinée dans un milieu stratifié en présence d'une source de chaleur et une réaction chimique. Les équations gouvernantes sont converti en équations différentielles ordinaires à l'aide d'une transformation appropriée, ensuite elles étaient résolues numériquement avec la méthode de Rung-kutta technique de tir. Ils ont observés que, la température du fluide diminue en fonction de nombre de Prandtl, paramètre d'absorption de chaleur et paramètre stratifié thermique S . La concentration est affectée par le nombre de Schmidt, les effets du double milieu stratifié sur le flux de fluide est discutée dans cette étude.

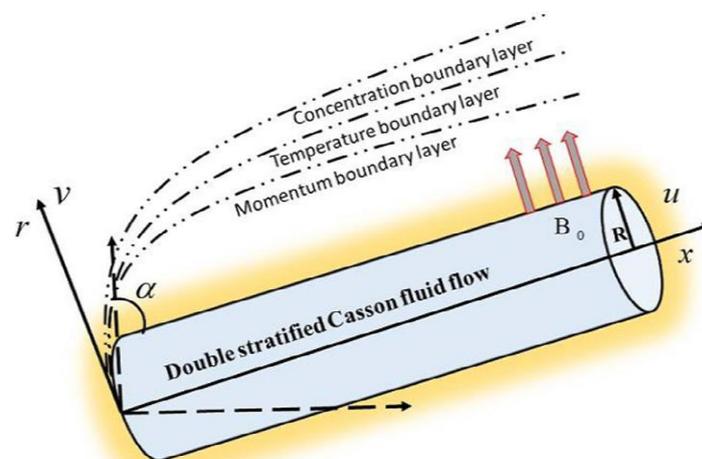


Figure II.2. Illustration physique du problème [16]

M.R. Krishnamurthy et al. [18] ont étudié numériquement l'effet de la radiation et de la réaction chimique sur un écoulement magnétohydrodynamique type couche limite d'un fluide à travers un milieu poreux au voisinage d'une feuille horizontale en présence de nanoparticules. Des transformations de similarité adéquates sont utilisées pour dériver un ensemble d'équations différentielles, le problème envisagé est résolu numériquement par la méthode de Rung-kutta d'ordre quatre technique de tir. Les profils de la vitesse, la température et la concentration ainsi les taux de transferts thermique et massique sont influencés par les paramètres de contrôles à savoir le paramètre de réaction chimique, le paramètre magnétique et paramètre de rayonnement thermique.

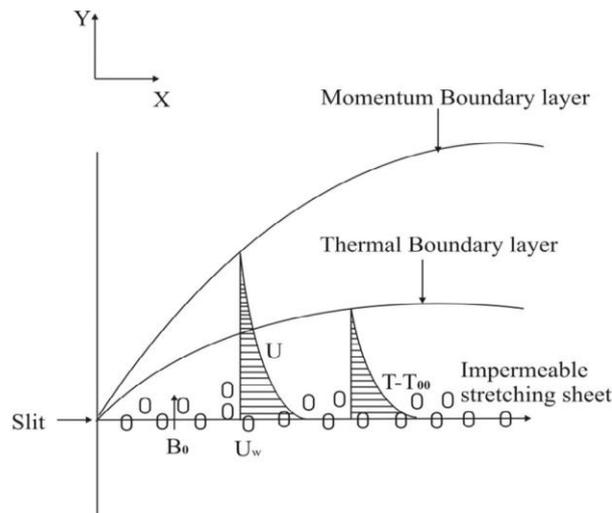


Figure II.3. Schéma de l'écoulement de la couche limite sur la feuille d'étirement [18]

S.R. Mishra et al. [19] ont étudié un transfert thermique convectif naturel d'un fluide micropolaire le long d'une plaque plane immergée dans un milieu poreux en présence d'une source de chaleur volumétrique et d'une réaction chimique de premier ordre. La technique de similarité est utilisée pour transformer les équations différentielles partielles en équation ordinaire. Les résultats ont montré que, le profil de la vitesse réduit en raison de l'augmentation de paramètre magnétique et à la fois la présence et l'absence de la matrice poreuse, l'effet de la porosité du milieu combine à l'inertie donne lieu à une compression transversale produisant une couche limite plus mince, la flottabilité thermique améliore considérablement la distribution de la vitesse. La température du fluide augmente avec l'augmentation de coefficient d'inertie, le coefficient de la réaction chimique et du champ magnétique réduit la couche limite massique.

A. K. Pandey, M. Kumar[20] ont étudié l'influence du rayonnement thermique sur un écoulement MHD d'un nanofluide (Cu + eau), l'approche numérique de non-linéarité appelée RKF 4^{ème} ordre a été utilisée avec la technique de tir pour trouver les résultats numériquement. Ils ont démontrés que, la couche limite massique diminue avec augmentation du paramètre de la réaction chimique, et le profil de la vitesse augmente à mesure que de l'augmentation du paramètre de champ magnétique, l'épaisseur de la couche limite thermique augmente avec l'augmentation du paramètre du champ magnétique, le profil de température de la nanoparticule s'accélèrent avec l'augmentation du nombre d'Eckert, le taux de transfert de masse augmente avec l'augmentation du paramètre de la réaction chimique.

N. Benzema et al. [21] ont étudié numériquement le phénomène convectif lors d'un écoulement d'un nanofluide au sein d'une cavité trapézoïdale ventilée et soumise à l'action d'un champ magnétique externe. Des corrélations empiriques spécifiquement développées pour le nanofluide hybride étudié (Ag-Mgo/ eau) ont été utilisées pour le calcul de la viscosité dynamique du nanofluide ainsi que la conductivité thermique. L'étude portait sur les effets des nombres de Reynolds et de Hartmann ainsi que celui de la fraction volumique des nanoparticules sur les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques au sein de la cavité. Les résultats obtenus ont permis de faire ressortir les points suivants :

- L'application d'un champ magnétique uniforme a montré sur le plan hydrodynamique, un ralentissement de l'écoulement ascendant du nanofluide hybride dans la cavité. Ceci a permis de conclure, qu'en augmentant le nombre de Hartmann, il y a des conséquences sur le champ hydrodynamique.
- Les performances thermiques de la cavité se voient améliorées par l'augmentation de l'inertie du fluide ainsi que l'intensification du champ magnétique. D'une manière générale, l'ajout de nanoparticules permet d'améliorer le transfert thermique. Finalement, il apparaît au travers de cette étude que l'apport des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique, devient moins probant avec l'augmentation du nombre de Hartmann.

Le but du présent travail est d'étudier l'effet combiné de l'inertie microscopique et la réaction chimique sur la convection mixte en régime stable, sur une plaque plane verticale intégrée dans un milieu poreux rempli d'un nanofluide. L'objectif est de répondre à la question fondamentale suivante : comment affecteront-ils globalement et de manière interactive les profils d'intérêt comme la vitesse de filtration, la température et la concentration.

Beaucoup de résultats sont obtenus et présentés par un ensemble de graphiques pour illustrer l'influence des différents paramètres de contrôle du problème. C'est dans l'objectif principal de déterminer l'influence des effets ciblés sur le transfert de chaleur et de masse de la plaque vers le milieu poreux, alors que de nombreux mécanismes agissent. Il est évident que beaucoup de différences seront attendues en rapport des situations classiques.

II.3. Description du problème physique

On considère dans cette partie un écoulement stationnaire, laminaire et bidimensionnel en convection mixte devant une plaque verticale semi-finie immergée dans un milieu poreux Non Darcéen avec l'extension de Forchheimer, rempli d'un nanofluid incompressible qui comporte les effets de mouvement Brownien et la thermophorèse (modèle à une seule phase). L'axe des x est pris le long de la plaque et l'axe y est perpendiculaire à elle (figure II.4).

La paroi est maintenue à une température, une concentration et une fraction volumique constantes notées T_w , C_w , ϕ_w respectivement, et ces valeurs sont supposées supérieures à la température, la concentration et la fraction volumique ambiantes (du fluide) T_∞ , C_∞ , ϕ_∞ respectivement. On néglige le rayonnement thermique et la dissipation visqueuse.

On suppose que, Les propriétés thermo-physiques du fluide et celles du milieu sont constantes à l'exception de ceux causés par des changements de densité, et selon les approximations de Boussinesq.

En outre, il est supposé qu'il existe une réaction chimique homogène de premier ordre avec la constante de vitesse k_0 entre les espèces diffusantes et le fluide. On suppose également que le soluté n'affecte pas le transport des nanoparticules et le fluide et le milieu poreux sont en équilibre thermodynamique local.

- **Approximation de Boussinesq**

L'approximation de Boussinesq est valide, elle consiste à considérer que les variations de la masse volumique sont négligeables aux niveaux de tous les termes des équations de mouvement, sauf aux niveaux du terme de gravité.

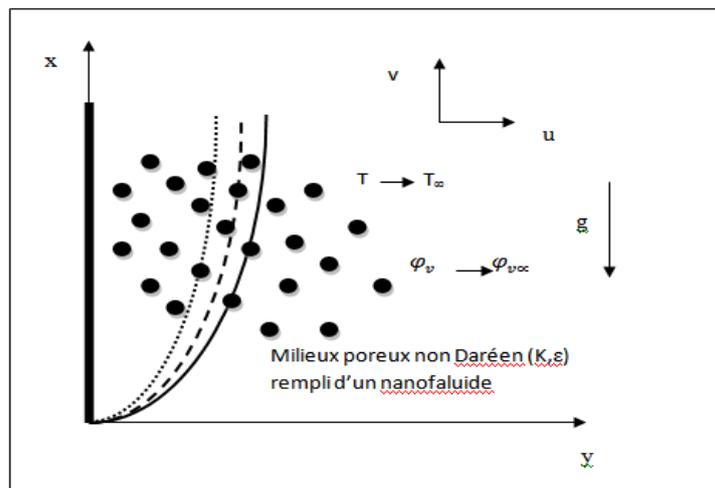


Figure II.4 : Géométrie du problème et système de coordonnées.

II.4. Equations gouvernantes :

Sous ces hypothèses, les équations gouvernantes de couches limites hydrodynamique, thermique et massique peuvent être écrites sous la forme dimensionnelle.

- **Équation de continuité**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.1})$$

- **Équation de la quantité de mouvement**

Suivant x :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{K}u - \frac{c_f \rho_{f\infty}}{\sqrt{K}} \frac{\partial u^2}{\partial y} + \left[\begin{array}{l} (1-\phi_\infty)\rho_{f\infty}g\{\beta_T(T-T_\infty) + \beta_C(C-C_\infty)\} \\ -(\rho_p - \rho_{f\infty})g(\phi - \phi_\infty) \end{array} \right] \quad (\text{II.2})$$

Suivant y :

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.3})$$

- **Équation de l'énergie**

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_m \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\varepsilon(\rho c)_p}{(\rho c)_f} \left[D_B \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \left(\frac{D_T}{T_\infty} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (\text{II.4})$$

- **Équation de la concentration**

$$\frac{1}{\varepsilon} \left(u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \right) = D_{sm} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - k_0(C - C_\infty) \quad (\text{II.5})$$

- **Équation de la fraction volumique**

$$\frac{1}{\varepsilon} \left(u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = D_B \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \left(\frac{D_T}{T_\infty} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (\text{II.6})$$

Ici, p est la pression, u et v , les composantes de vitesse de Darcy, T la température, C la concentration et ϕ la fraction volumique de nanoparticules. Les paramètres physiques sont notées comme K la perméabilité de milieu poreux avec porosité ε , ρ_f la masse volumique, μ la

viscosité, β_T le coefficient d'expansion thermique de fluide de base, β_C le coefficient d'expansion massique et g l'accélération gravitationnelle.

La masse volumique des particules est ρ_p , $(\rho c)_p$ la capacité thermique effective de nanoparticule, tandis que $(\rho c)_f$ est la capacité thermique de fluide de base. α_m est la diffusivité thermique du milieu poreux. Le coefficient de diffusion Brownienne est notée par D_B , le coefficient de diffusion thermophorétique D_T , et la diffusivité solutale D_{sm} pour le milieu poreux.

Les conditions initiales et aux limites sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} y = 0 : v = 0, T = T_w, C = C_w \text{ et } \phi = \phi_w \\ y \rightarrow \infty : u = 0, T \rightarrow T_\infty, C \rightarrow C_\infty, \phi \rightarrow \phi_\infty \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

L'analyse à grande échelle développé indique que la transformation de variables suivante est appropriée

$$\eta = \frac{y}{x} Pe_x^{1/2} \quad (\text{II.8})$$

$$s(\eta) = \frac{\psi}{\alpha_m Pe_x^{1/2}} \quad (\text{II.9})$$

$$\theta(\eta) = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad (\text{II.10})$$

$$h(\eta) = \frac{C - C_\infty}{C_w - C_\infty} \quad (\text{II.11})$$

$$f(\eta) = \frac{\phi - \phi_\infty}{\phi_w - \phi_\infty} \quad (\text{II.12})$$

Où

$$Pe_x = \frac{U_\infty x}{\alpha_m} \quad (\text{II.13})$$

ψ est la fonction de courant défini comme

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \text{ et } v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (\text{II.14})$$

Les composantes de vitesse de Darcy deviennent :

$$u = \frac{\alpha_m}{x} Pe_x s' \quad (\text{II.15})$$

$$v = -\frac{\alpha_m}{2x} Pe_x^{1/2} (s - \eta s') \quad (\text{II.16})$$

Les équations (II.1 - II.6) avec les variables de similarité ci-dessus peuvent être encore réduits à un ensemble d'équations différentielles ordinaires :

$$s'' + 2 Fo s' s'' = \lambda [\theta' + Nc h' - Nr f'] \quad (\text{II.17})$$

$$\theta'' + \frac{1}{2} s \theta' + Nb f' \theta' + Nt \theta'^2 = 0 \quad (\text{II.18})$$

$$h'' + \frac{1}{2} Le s h' - Kr Le h = 0 \quad (\text{II.19})$$

$$f'' + \frac{1}{2} Le_p s f' + \frac{Nt}{Nb} \theta'' = 0 \quad (\text{II.20})$$

Les conditions aux limites (II.7) deviennent :

$$s(0) = 0, \quad (\text{II.21.a})$$

$$\theta(0) = h(0) = f(0) = 1 \quad (\text{II.21.b})$$

$$s'(\infty) = \theta(\infty) = h(\infty) = f(\infty) = 0 \quad (\text{II.21.c})$$

Où les primes désignent la différenciation par rapport à η .

Dans les équations ci-dessus, Fo est le paramètre d'inertie, Nc est le taux de flottabilité régulier (fluide de base), Nr est le taux de flottabilité de nanoparticules, Nb est le paramètre de mouvement Brownien, Nt est le paramètre de thermophorèse, tandis que Le est le nombre de Lewis usuel, Le_p est le nombre de Lewis pour le nanofluide et Kr représente le paramètre de la réaction chimique

$$Fo = \frac{c_f \sqrt{K} U_\infty}{v} \quad (\text{II.22})$$

$$Nc = \frac{\beta_c (C_w - C_\infty)}{\beta_T (T_f - T_\infty)} \quad (\text{II.23})$$

$$Nr = \frac{(\rho_p - \rho_{f\infty})(\phi_w - \phi_\infty)}{(1 - \phi_\infty)\rho_{f\infty}\beta_T(T_f - T_\infty)} \quad (\text{II.24})$$

$$Nb = \frac{\varepsilon(\rho c)_p D_B (\phi_w - \phi_\infty)}{(\rho c)_f \alpha_m} \quad (\text{II.25})$$

$$Nt = \frac{\varepsilon(\rho c)_p D_T (T_f - T_\infty)}{(\rho c)_f \alpha_m T_\infty} \quad (\text{II.26})$$

$$Le = \frac{\alpha_m}{\varepsilon D_{sm}} \quad (\text{II.27})$$

$$Le_p = \frac{\alpha_m}{\varepsilon D_B} \quad (\text{II.28})$$

$$Kr = \frac{k_0 x}{U_\infty} \quad (\text{II.29})$$

Avec : $\lambda = \frac{Ra_x}{Pe_x}$ est le paramètre de la convection mixte :

$$Ra_x = \frac{(1 - \phi_\infty)\rho_{f\infty} K g \beta_T (T_f - T_\infty) x}{\alpha_m \mu} \quad (\text{II.30})$$

Ra_x est Le nombre de Rayleigh local.

Les quantités physiques d'intérêt sont le nombre de Nusselt local Nu_x , le nombre de Sherwood local régulier Sh_x et nombre de Sherwood de nanofluide Sh'_x qui sont définies comme :

On a le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel utiliser pour caractériser le transfert thermique entre un fluide et une paroi «transfert convectif», défini par :

$$Nu_x = \frac{xq_w}{k(T_w - T_\infty)} \quad (\text{II.31})$$

Le nombre de Sherwood local régulier (fluide de base) Sh_x et nombre de Sherwood de nanoparticules Sh'_x utilisé pour caractériser le transfert de masse définis par :

$$Sh_x = \frac{xq'_w}{D_{sm}(C_w - C_\infty)} \quad (\text{II.32})$$

$$Sh'_x = \frac{xq''_w}{D_B(\phi_w - \phi_\infty)} \quad (\text{II.33})$$

Où q_w est le flux thermique surfacique, q'_w est le flux massique à la surface et q''_w est le flux massique de nanoparticules surfacique sont donnés par :

$$q_w = -k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (\text{II.34})$$

$$q'_w = -D_{sm} \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (\text{II.35})$$

$$q''_w = -D_B \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (\text{II.36})$$

En utilisant les variables sans dimension, on obtient les nombres réduits correspondants.

$$\frac{Nu_x}{Pe_x^{1/2}} = -\theta(0) \quad (\text{II.37})$$

$$\frac{Sh_x}{Pe_x^{1/2}} = -h'(0) \quad (\text{II.38})$$

$$\frac{Sh'_x}{Pe_x^{1/2}} = -f'(0) \quad (\text{II.39})$$

II.5. Conclusion

Les mouvements des fluides dans les milieux poreux ont été largement étudié en raison de leurs importance dans de nombreuses applications fondamentales et industrielles ; tel que le déplacement des eaux dans les nappes aquifères et technologiques comme le séchage. Comme on peut les rencontrer dans la nature et leur domaines d'application sont nombreux aussi et variés, on peut citer les problèmes de purification de l'eau, de dépollution des sols, d'extraction de pétrole et de gaz,...

La formation en variables adimensionnées est importante pour simplifier les équations ; une fois les équations régissant le problème posé avec les conditions aux limites associées et mise sous leurs formes adimensionnelles et étant donné leur présentation sous forme d'équations ou drivées partielles, elle permet une meilleure approche de la réalité des phénomènes physiques, car elles sont indépendantes du système d'unités de mesure utilisé.

Dans le prochain chapitre, nous étudions l'influence des paramètres du contrôle du problème ciblé sur le comportement dynamique et thermique de l'écoulement ainsi les taux de transferts thermique et massique en termes de nombre de Nusselt et Sherwood. Nous avons donc opté pour une résolution numérique en utilisant le Matlab avec la méthode des différences finies.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Introduction

On s'intéresse, dans ce chapitre aux résultats numérique obtenus à l'évolution du transfert de chaleur par convection mixte, dans un milieu poreux rempli de nanofluide en présence d'une réaction chimique, sur le logiciel de calcul MATLAB.

Afin de résoudre le système des équations de quantité de mouvement, d'énergie et de concentration ainsi que de fraction volumique, avec les conditions aux limites, on opte pour la méthode de différence finie, avec le solveur BVP crée sous MATLAB.

Afin d'obtenir un aperçu clair sur le phénomène physique du problème, une étude paramétrique est effectuée et les résultats numériques obtenus sont affichés à l'aide d'illustrations graphiques. L'effet du paramètre convectif λ , le paramètre Forchheimer Fo , couplé avec le mouvement Brownien Nb , la thermophorèse Nt , le paramètre de flottabilité Nr et le paramètre de la réaction chimique Kr sur les profils de la vitesse $s'(\eta)$, de température $\theta(\eta)$, de la concentration $h(\eta)$ et la concentration des nanoparticules $f(\eta)$.

III.2. Méthode numérique

L'ensemble des équations différentielle ordinaires couplées (II.17) a (II.20) est fortement non linéaire et ne peut être résolu analytiquement, avec les conditions aux limites, ils forment un problème aux limites à deux points qui peut être résolu pour certaines valeurs des paramètres régissant. La méthode des différences finies qui implémente la formule de Lobatto de troisième degré, fournit une solution continue de manière uniforme dans l'intervalle d'intégration. La technique de collocation utilise un maillage de points pour diviser l'intervalle en sous-intervalles d'intégration.

Le solveur BVP détermine une solution numérique en résolvant un système d'équations algébriques résultant avec les conditions aux limites, l'utilisateur doit fournir les point de maillage initial ainsi qu'une approximation initiale de la solution, les régions de l'écoulement sont contrôlées par des paramètres thermo-physique, à savoir, Fo , Nt , Nc , Nr , Nb , Le , Lep , Kr et λ .

III.3. Validation de programme

Pour examiner l'exactitude de la méthode utilisée, on a comparés les résultats actuels à ceux obtenus par Murthy [22] en terme de nombre du Nusselt local ($-\theta(0)$) et nombre du

Sherwood local $-h'(0)$ (tableau III.1 et tableau III.2). Il ressort de ces tableaux que les résultats actuels sont en bon accord avec ceux rapportés par le travail cité dans une large gamme de λ .

Tableau III.1 : Comparaison des valeurs de $-\theta'(0)$ et $s'(0)$ pour : $Nc = -0.5$; $Fo = 1$;
 $Nt = Nb = Le_p = 0$.

| $\lambda = \frac{Rax}{Pex}$ | $s'(0)$ | | Le= 1 | | Le = 10 | |
|-----------------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| | Murthy[22] | Présent travail | Murthy[22] | Présent travail | Murthy[22] | Présent travail |
| 0 | 1.0 | 1.0 | 0.5642 | 0.5642 | 0.5642 | 0.5642 |
| 1 | 1.1583 | 1.1583 | 0.5922 | 0.5922 | 0.6054 | 0.6054 |
| 5 | 1.6794 | 1.6794 | 0.6793 | 0.6793 | 0.7222 | 0.7244 |
| 10 | 2.1926 | 2.1926 | 0.7580 | 0.7580 | 0.8247 | 0.8247 |
| 20 | 3.0 | 3.0000 | 0.8706 | 0.8706 | 0.9617 | 0.9617 |
| 50 | 4.7262 | 4.7202 | 1.0768 | 1.0768 | 1.203 | 1.203 |
| 100 | 6.7284 | 6.7284 | 1.2797 | 1.2797 | 1.4347 | 1.4347 |

Tableau III.2: Comparaison des valeurs de $-h'(0)$ pour $Nc = -0.5$; $Fo = 1$; $Nt = Nb = Le_p = 0$.

| $\lambda = \frac{Rax}{Pex}$ | $h'(0)$ | | Le= 1 | | Le = 10 | |
|-----------------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| | Murthy[22] | Présent travail | Murthy[22] | Présent travail | Murthy[22] | Présent travail |
| 0 | 1.0 | 1.0 | 0.5642 | 0.5642 | 1.7841 | 1.7842 |
| 1 | 1.1583 | 1.1583 | 0.5922 | 0.5922 | 1.9329 | 1.9329 |
| 5 | 1.6794 | 1.6794 | 0.6793 | 0.6793 | 2.3534 | 2.3534 |
| 10 | 2.1926 | 2.1926 | 0.7580 | 0.7580 | 2.7009 | 2.7009 |
| 20 | 3.0 | 3.0 | 0.8706 | 0.8706 | 3.1686 | 3.1686 |
| 50 | 4.7262 | 4.7202 | 1.0768 | 1.0768 | 3.9815 | 3.9815 |
| 100 | 6.7284 | 6.7284 | 1.2797 | 1.2797 | 4.7585 | 4.7555 |

III.4. Résultats et discussions

Après avoir précédé à la résolution numérique avec la méthode décrite précédemment, un ensemble de résultats ont été obtenus, c'est résultats sont représenté graphiquement pour la vitesse adimensionnelle, la température adimensionnelle, la concentration adimensionnelle, ainsi que la fraction de volume adimensionnelle. Cela pour divers conditions paramétriques, l'effet de paramètre Forchheimer Fo , la thermophorèse Nt , flottabilité de molécule de fluide de base Nc , flottabilité de nanoparticule Nr , nombre de Lewis Le et celui de nanoparticule Le_p , la réaction chimique Kr , ainsi que paramètre convectif λ .

III.4.1. Profils de vitesse adimensionnelle

La variation de la distribution de la vitesse adimensionnelle suivant la variable de similarité η est représentée respectivement sur les figures (III.1)(III.2) et (III.3) pour quelques valeurs de Nt , Nb , Nc , Fo et λ .

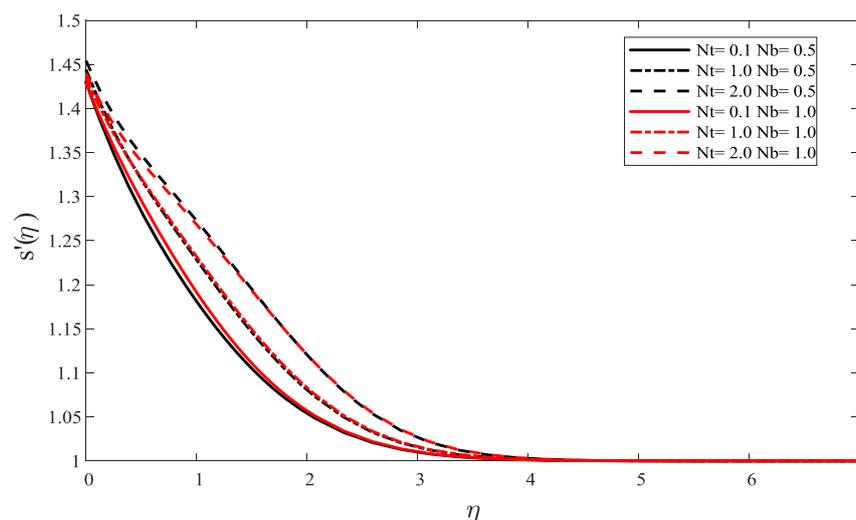


Figure III.1. Variation de profils de vitesse avec η pour Nb et Nt ($Fo = Nr = Kr = 0.5, \lambda = 2.0, Nc = 0.1, Le = Le_p = 10$).

La figure III.1 montre l'effet combiné de la thermophorèse Nt et du mouvement brownien Nb sur le profil de la vitesse. D'après cette figure, on remarque que le paramètre de thermophorèse à un effet remarquable sur le profil de vitesse, l'augmentation de ce paramètre conduit à amplifier la vitesse longitudinale près de la plaque qui implique une augmentation de l'épaisseur de couche limite dynamique par contre pour le paramètre du mouvement Brownien Nb , il y a un écart très faible entre les deux valeurs choisis.

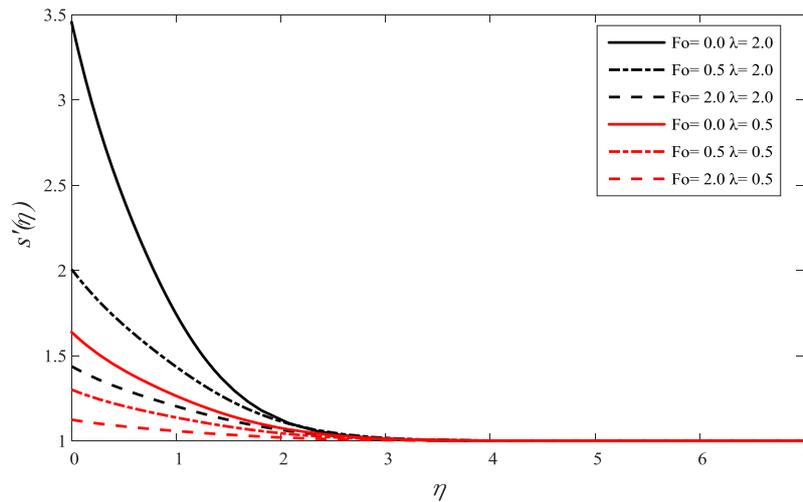


Figure III.2. Variation de profil de la vitesse adimensionnelle avec η
($Nc = 0.1, Nr = Nt = Nb = Kr = 0.5, Le = Le_p = 10$).

La figure III.2 montre l'effet de force d'inertie microscopique en termes de paramètre de Forchheimer Fo couplé avec le paramètre de la convection mixte, $Fo = 0.0$ correspond à un milieu poreux Darceen. On constate que, la présence de ces effets diminue considérablement la vitesse au voisinage de la plaque qui implique une diminution de l'épaisseur de couche limite dynamique. Tandis que l'augmentation de paramètre convectif est suivie d'une augmentation de la vitesse.

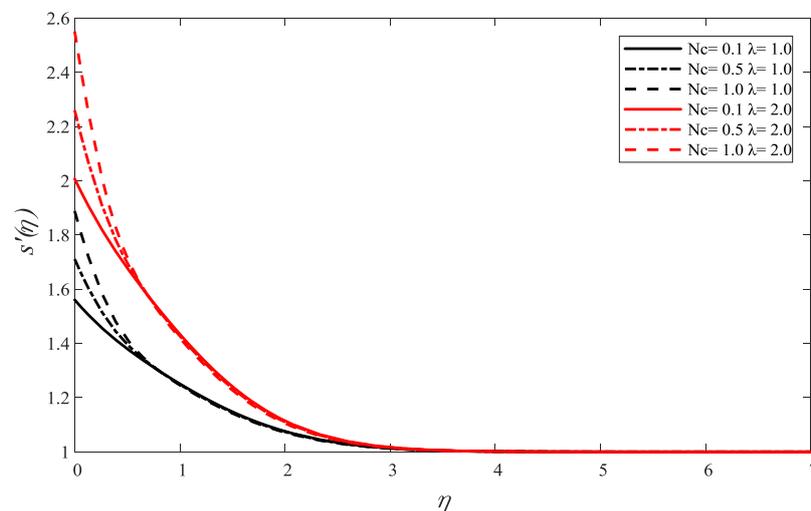


Figure III.3. Variation de profils de vitesse avec η pour Nc et λ
($Fo = Nr = Nt = Nb = Kr = 0.5, Le = Le_p = 10$).

L'effet de paramètre de taux de flottabilité Nc sur la répartition de la vitesse est décrit dans la figure III.3. A partir de cette figure, on constate que l'augmentation de Nc accompagnée d'une augmentation remarquable de la vitesse dans la région près de la surface $\eta < 1.0$ et par

conséquent, une amélioration de l'épaisseur de couche limite mais loin de la surface ($\eta > 1.0$), on observe que le paramètre de flottabilité Nc a aucun effet sur la vitesse. L'augmentation de paramètre convectif est suivi d'une amélioration de la vitesse.

On peut conclure que l'ajout des nanoparticules dans le fluide de base joue un rôle important dans l'amélioration de la vitesse.

III.4.2. Profils de température adimensionnelle

La variation de la distribution de la température suivant la variable de similarité η est représentée graphiquement sur les figures (III.4) à (III.6) pour quelque valeur de Nt , Nr , Nb , λ et Fo .

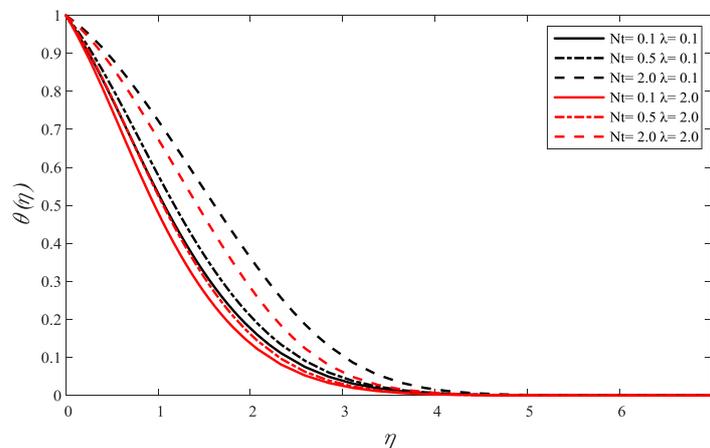


Figure III.4. Effet de Nt et λ sur la température adimensionnelle ($Fo = Nr = Nb = Kr = 0.5$, $Nc = 0.1$, $Le = Le_p = 10$)

La figure (III.4) montre l'influence du paramètre de la thermophorèse sur les comportements de température. On remarque que, la distribution de température amplifiée, et l'épaisseur de la couche limite accroit, en présence de nanoparticule en termes de thermophorèse.

En plus, on constate que, l'augmentation du paramètre convectif λ accompagnées d'une diminution de la distribution de la température dans la couche limite thermique.

Cependant, pour le paramètre de taux de flottabilité de nanoparticules on ne voit qu'aucun effet observé sur la variation de la température dans la zone de couche limite.

On peut dire que, la présence de nanoparticule a un rôle important pour améliorer le transfert thermique.

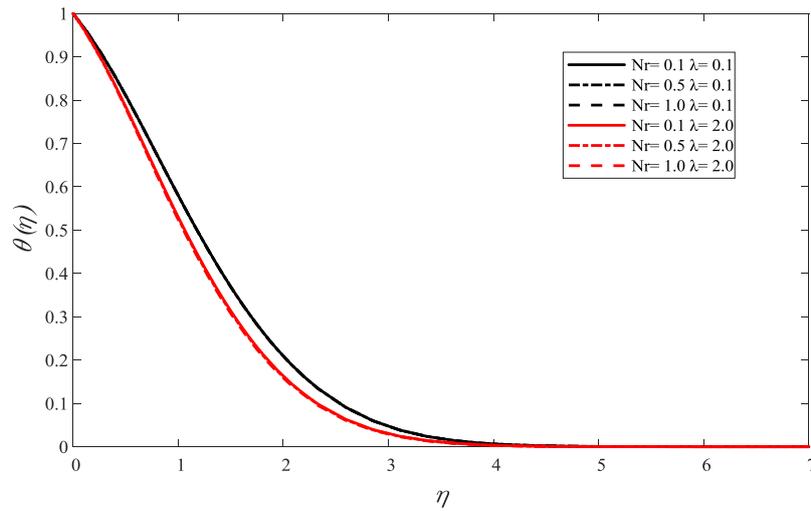


Figure III.5. Effet de Nr et de λ sur les profils de température adimensionnelle
($Fo = Nt = Nb = Kr = 0.5, Nc = 0.1, Le = Le_p = 10$)

La figure(III.5) montre l'effet de paramètre de flottabilité des nanoparticules Nr sur les profils de température . On constate que l'augmentation de Nr n'a aucun effet sur la distribution de la température.

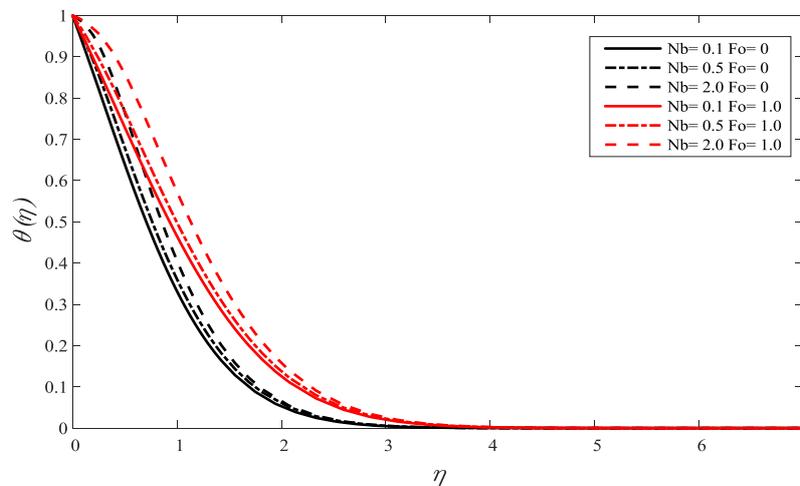


Figure III.6. Effet de paramètre Forchheimer Fo et Nb sur la température
($\lambda = 2.0, Nc = 0.1, Nr = Nt = Kr = 0.5, Le = Le_p = 10$)

La figure (III.6) montre l'effet de Fo et Nb sur les profils de température dans la couche limite. On remarque que, les profils de température augmentent avec l'augmentation de Fo et de Nb loin de la paroi, par conséquent l'épaisseur de la couche limite augment.

III.4.3. Profils de concentration adimensionnelle

Les figures suivantes (III.7), (III.8) et (III.9) montrent les variations de concentration adimensionnelle en fonction de variable de similarité η dans la couche limite pour quelques valeurs combinées du paramètre Lewis Le , Nc , Kr , Fo et λ .

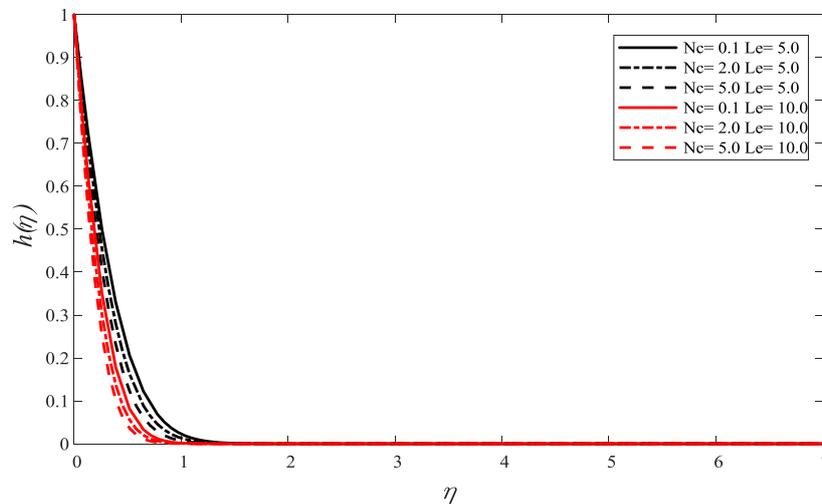


Figure III.7. Effet de Le et Nc sur le profil de concentration adimensionnelle ($Fo = Nr = Nt = Nb = Kr = 0.5, \lambda = 2.0, Le_p = 10$)

La figure (III.7) montre l'effet de nombre de Lewis (Le) et de la flottabilité des molécules de fluide de base (Nc) sur les profils de concentration dans la couche limite. En remarque que l'augmentation des deux paramètres Le et Nc conduit à réduire le profil de concentration, on peut donc dire que, la distribution de concentration est grandement sensible à l'augmentation de nombre de Lewis.

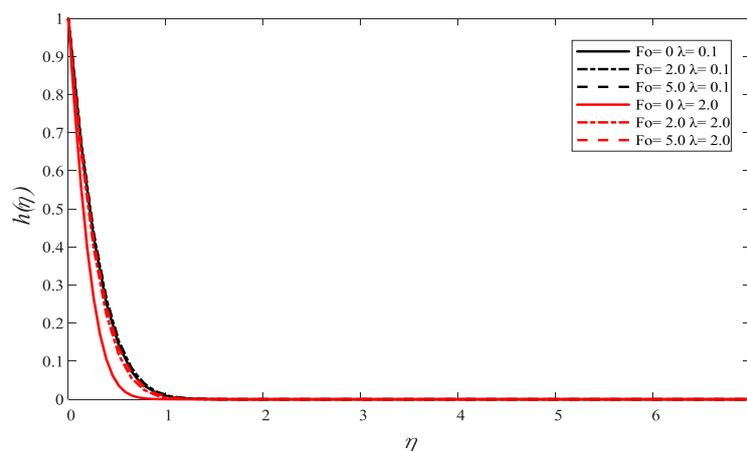


Figure III.8. L'effet de Fo et λ sur les profils de concentration ($Nc = 0.1, Nr = Nt = Nb = Kr = 0.5, Le = Lep = 10$).

La figure (III.8) représente l'influence du paramètre Forchheimer Fo et paramètre convectif λ sur les profils de concentration adimensionnelle dans la couche limite. D'après la figure on constat que la concentration diminue avec l'augmentation du paramètre convectif λ . Tandis que l'augmentation de Fo conduit à l'augmentation de la concentration adimensionnelle dans la couche limite.

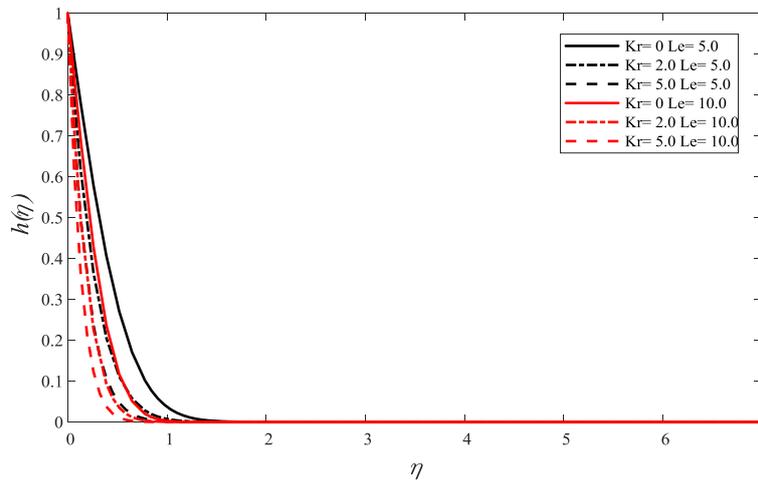


Figure III.9. Effet de Kr et Le sur les profils de concentration ($Fo=Nr = Nt = Nb = 0.5, \lambda = 2.0, Nc = 0.1, Le_p = 10$).

La figure (III.9) représente le profil de concentration pour quelques valeurs du paramètre de la réaction chimique Kr et le nombre de Lewis Le . On constat que l'augmentation de paramètre de la réaction chimique conduit à la diminution de la distribution de la concentration et l'augmentation de l'épaisseur de la couche limite lion de la paroi, en même temps l'augmentation de nombre de Lewis accompagnés d'une diminution de la distribution de la concentration dans la couche limite.

III.4.4. Profils de fraction volumique adimensionnelle

Dans les figures (III.10) (III.11) (III.12), on présente les profils de fraction volumique adimensionnelle des nanoparticules, pour différentes valeurs combinés du paramètre convectif λ de nombre de Lewis Le de nombre de Lewis de nanoparticules Le_p , de paramètre Forchheimer Fo et aussi Nt, Nb, Nr .

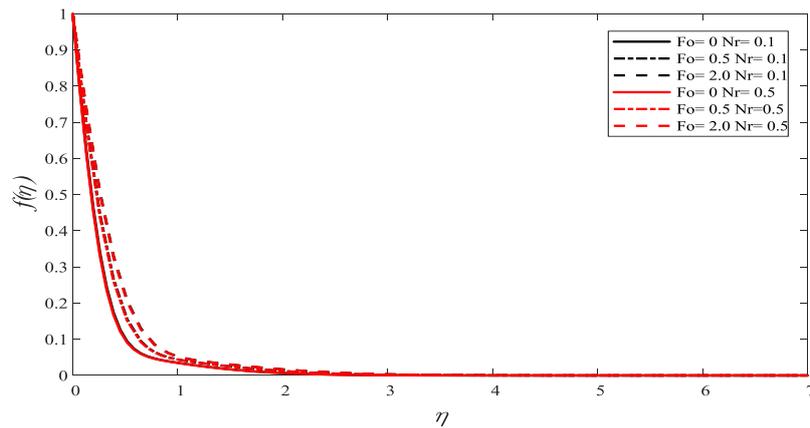


Figure III.10. Profils de fraction volumique pour Fo et Nr
 ($\lambda=2.0, Nc=0.1, Nt=Nb=Kr=0.5, Le=Le_p=10$)

La figure (III.10) représente la fraction volumique pour différentes valeurs de paramètre Forchheimer Fo et différentes valeurs de la flottabilité de nanoparticule Nr , on constate qu'il y a une tendance à augmenter considérablement la fraction volumique si le paramètre Forchheimer augmente. La couche limite devient plus grande.

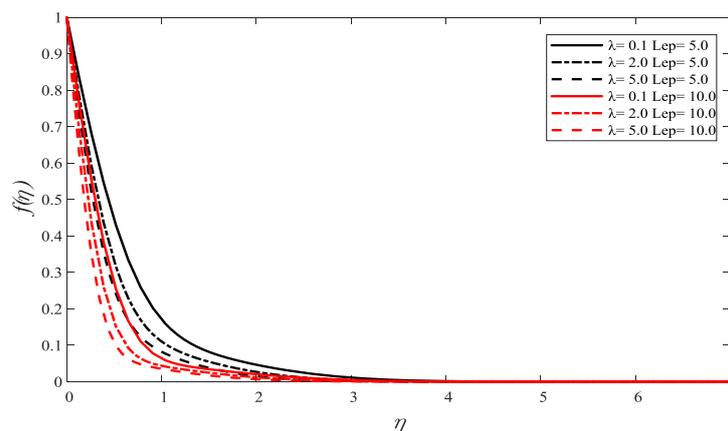


Figure III.11. Profils de fraction volumique avec η pour Le_p et λ
 ($Fo=Nt=Nb=Nr=Kr=0.5, Nc=0.1, Le=10$)

La figure (III.11) illustre le profil de la fraction volumique des nanoparticules pour diverses valeurs de nombre de Lewis de nanoparticule Le_p et pour diverses valeurs de paramètre convectif λ . D'après la figure on constate que, l'augmentation de Le_p et λ accompagnés par une diminution de la fraction volumique des nanoparticules.

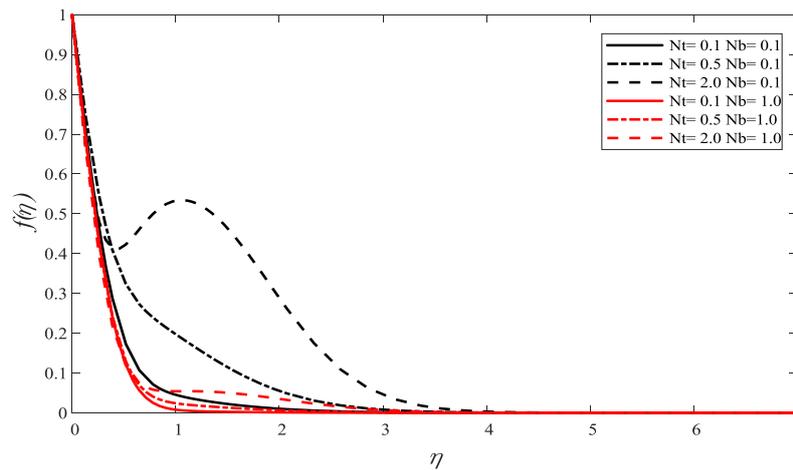


Figure III.12. Effet de Nt et Nb sur le profil de fraction volumique adimensionnelle ($Fo = Nr = Kr = 0.5, \lambda = 2.0, Nc = 0.1, Nr = 0.5, Le = Le_p = 10$)

La figure (III.12) montre l'effet de la thermophorèse Nt et le paramètre du mouvement brownien Nb sur la fraction volumique des nanoparticules. On constate que, l'augmentation de Nt et suivi d'une augmentation de la fraction volumique, à l'inverse de Nb sont augmentation provoque une diminution de la fraction volumique.

III.5. Variation du taux de transfert de chaleur local Nu_x

On s'intéresse, à la variation du nombre de Nusselt local pour différentes valeurs de paramètre Forchheimer Fo , du paramètre de mouvement brownien Nb , thermophorèse Nt , flottabilité Nr , et paramètre convectif λ , les résultats sont illustrés dans les figures (III.13) (III.14) (III.15).

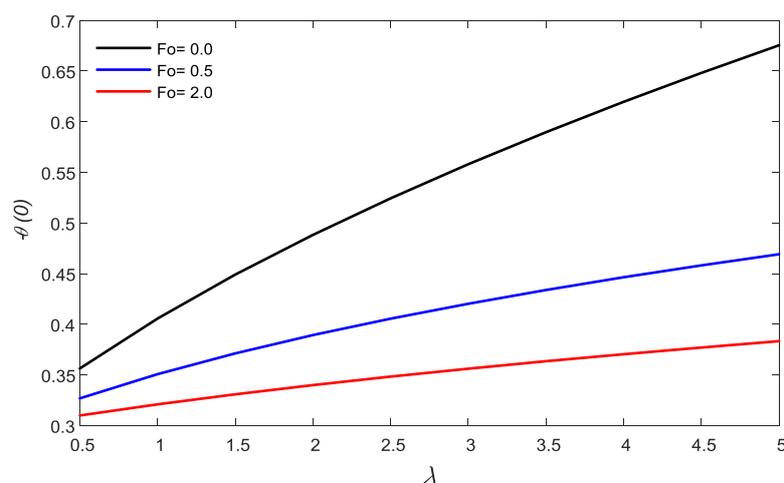


Figure III.13. Variation de nombre de $(Nu_x / Pe^{0.5})$ avec Fo et λ .

La figure (III.13) montre l'effet de paramètre Forchheimer et du paramètre convectif λ sur le nombre de Nusselt local. On remarque que l'augmentation du paramètre Forchheimer Fo réduit le taux de transfert de chaleur en termes de nombre de Nusselt Nu_x a cote de la plaque. A l'inverse du paramètre convectif λ , sont augmentation conduit à l'amélioration de taux de transfert Nusselt local.

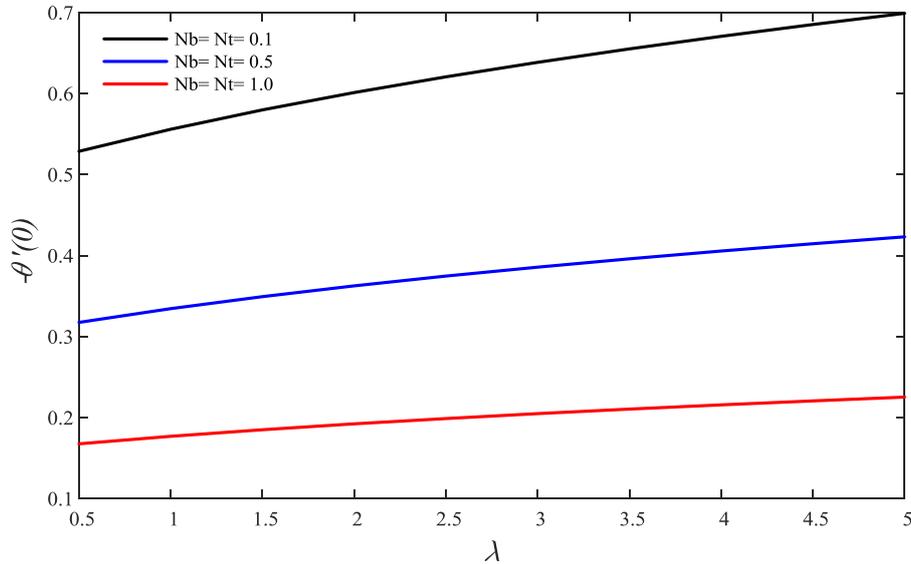


Figure III.14. Variation de $(Nu_x/Pe^{0.5})$ avec Nt , Nb et λ .

La figure (III.14) montre l'effet de la thermophorèse Nt et du mouvement Brownien Nb pour différente valeurs combinés sur le taux de transfert de chaleurs en termes de Nusselt local. D'après la figure on constate que l'augmentation de Nt et Nb contribue à l'amélioration de taux de transfert de chaleur Nusselt local.

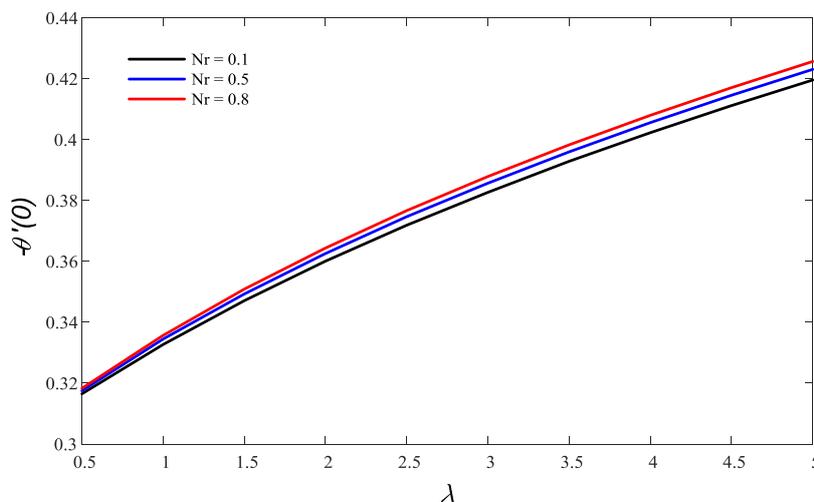


Figure III.15. Variation de $(Nu_x/Pe^{0.5})$ avec Nr et λ .

La figure (III.15) représente la variation de nombre de Nusselt pour différentes valeurs de la flottabilité des nanoparticules Nr et du paramètre convectif λ , on remarque que le taux de transfert de chaleur augmente loin de la plaque en augmentant la flottabilité des nanoparticules Nr .

III.6. Variation du taux de transfert de masse local Sh_x et Sh'_x

Les figures (III.16) (III.17) (III.18) représente la variation de nombre Sherwood local et de nombre de Sherwood local pour les nanoparticules pour différentes valeurs de flottabilité des molécules de fluide de base Nc , nombre de Lewis Le , la réaction chimique Kr , avec le paramètre convectif λ .

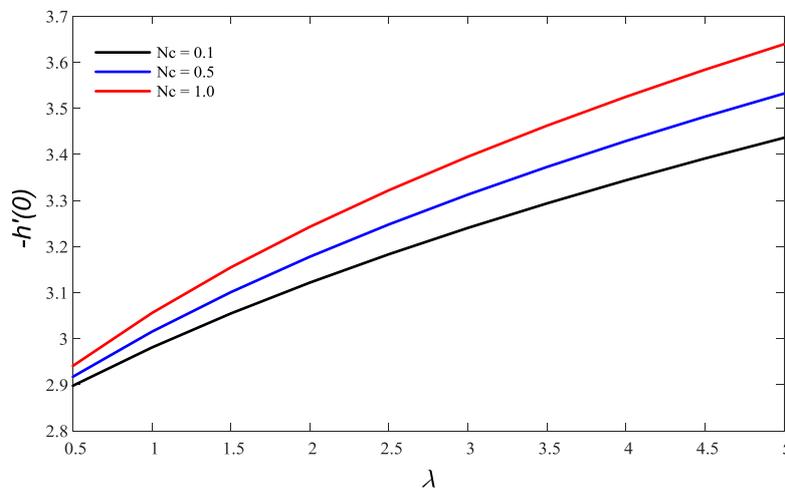


Figure III.16. Variation de $(Sh_x / Pe^{0.5})$ avec Nc et λ .

La figure (III.16) montre l'effet de flottabilité de molécule de fluide de base Nc et du paramètre convectif λ sur la variation du nombre de Sherwood local Sh_x , d'après la figure le taux de transfert augmente (nombre de Sherwood local) considérablement avec l'augmentation de Nc . D'autre part l'augmentation du paramètre convectif λ améliore le nombre de Sherwood local.

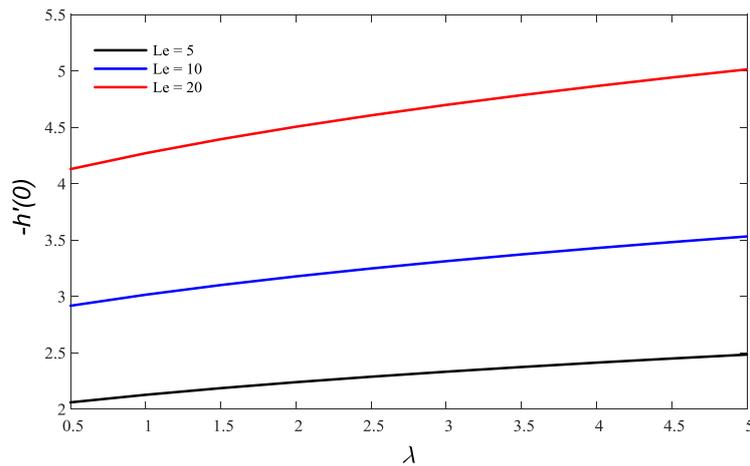


Figure III.17. Variation de $(Sh_x/Pe^{0.5})$ avec Le et λ .

La figure (III.17) représente l'effet de variation de nombre de Lewis Le et du paramètre convectif λ sur le nombre de Sherwood local. On remarque que l'augmentation de Le conduit à une augmentation considérable de nombre de Sherwood local Sh_x .

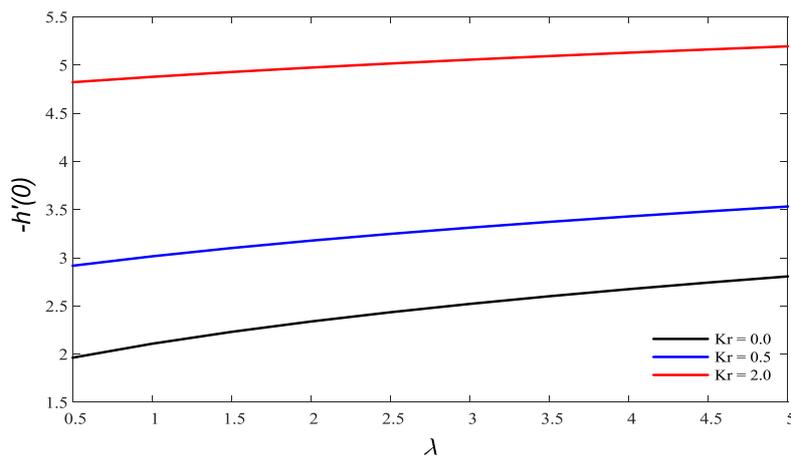


Figure III.18. Variation de $(Sh_x/Pe^{0.5})$ avec Kr et λ .

La figure (III.18) montre l'effet de la réaction chimique Kr et du paramètre convectif λ sur le taux de transfert de masse. On remarque que la présence de la réaction chimique provoque une augmentation considérable de nombre de Sherwood local Sh_x .

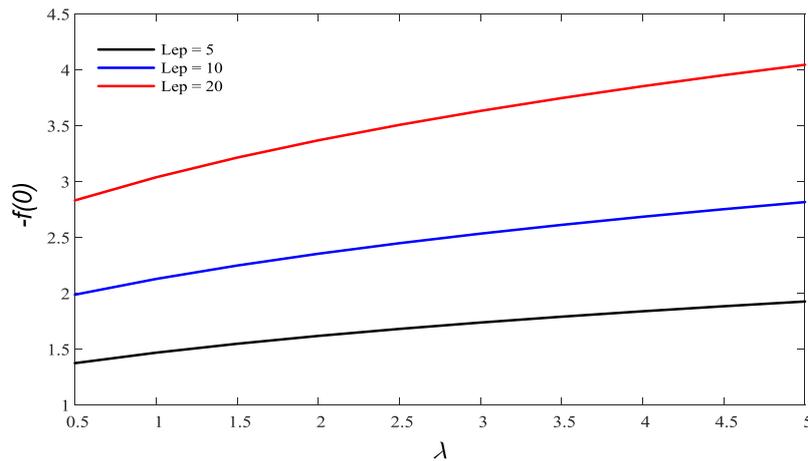


Figure III.19. Variation de $(Sh'_x/Pe^{0.5})$ avec Lep et λ .

L'effet de nombre de Lewis pour les nanoparticules et du paramètre convectif λ , sur le taux transfert de masse Sh'_x est montré dans la figure (III.19). On constate une augmentation de nombre de Sherwood local pour les nanoparticules, quand le nombre de Lewis de nanoparticule augmente. Même chose pour le paramètre convectif ou sont augmentation provoque une augmentation de nombre de Sherwood local.

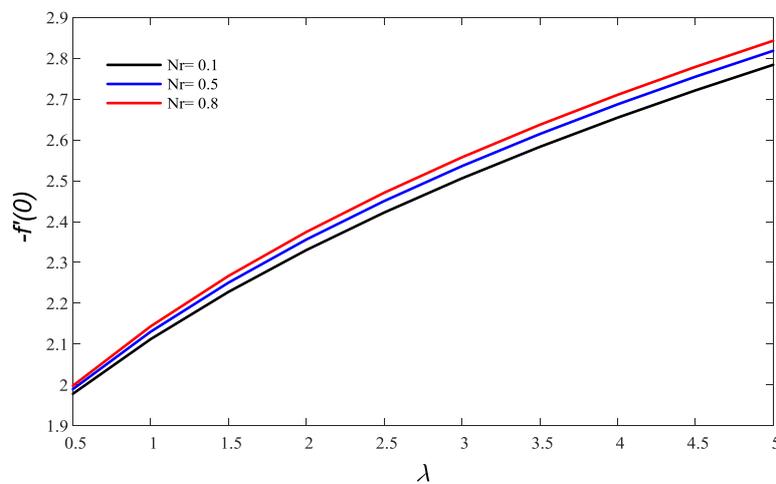


Figure III.20. Variation de $(Sh'_x/Pe^{0.5})$ avec Nr et λ .

La figure (III.20) montre l'effet de la flottabilité des molécules de fluide de base sur la variation de nombre de Sherwood local de nanoparticule. On remarque que le nombre de Sherwood local augmente, lorsque le paramètre Nr augmente.

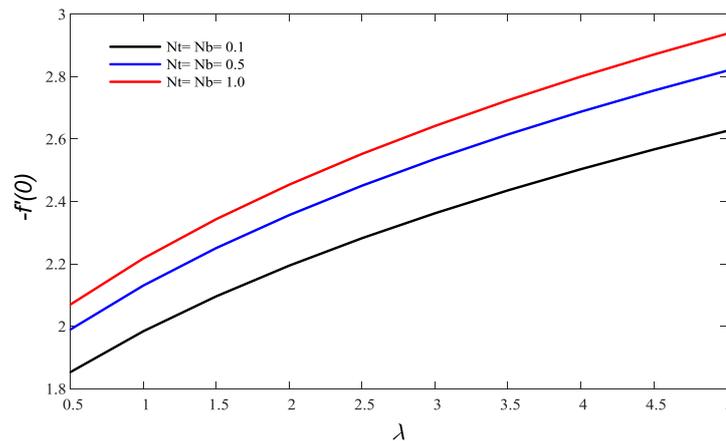


Figure III.21. Variation de $(Sh'_x/Pe^{0.5})$ avec Nt et Nb ainsi que λ .

La variation de nombre de Sherwood local pour nanofluide avec différentes valeurs combinés de thermophorèse Nt , du mouvement Brownien Nb et de paramètre convectif λ est illustrée sur la figure (III.21). On remarque une augmentation de nombre de Sherwood de nanoparticule avec l'augmentation des deux paramètres Nt et Nb .

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence des nanoparticules pour le nanofluide et l'effet d'inertie pour le milieu poreux, sur l'écoulement de la couche limite en convection mixte dans un milieu poreux remplie de nanofluide en présence d'une réaction chimique, dans lequel le mouvement Brownien et thermophorèse sont pris en compte.

Dans cette étude, nous avons transformée les données en termes d'équation différentielle ordinaires en étude numérique en utilisant une méthode adéquate, les résultats numériques sont affiche en illustration graphique.

La solution de similarité dépend de neuf paramètres adimensionnelles, à savoir, paramètre Forchheimer Fo , paramètre convectif λ , flottabilité de molécule de fluide de base Nc et celui de nanoparticules Nr , mouvement Brownien Nb , thermophorèse Nt , nombre de Lewis Le et celui de nanoparticules Le_p , Kr la réaction chimique. Et leur effet sur les profils de la vitesse adimensionnelle, la température adimensionnelle, la concentration adimensionnelle et la fraction volumique adimensionnelle.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire, nous a mené une étude théorique et numérique en vue de quantifier l'importance du transfert de chaleur et massique, en convection mixte sur une plaque plane verticale immergée dans un milieu poreux non Darcéen (avec l'extension de Forchheimer) rempli d'un nanofluide (modèle monophasé) en présence d'une réaction chimique sous des conditions thermique et massique classique.

En premier lieu, les notions essentielles de base sur la convection mixte, sur les nanofluides ainsi que sur les particularités de modélisation des milieux poreux ont été rapportées de manière très succincte.

En second lieu et en se basant sur le modèle non Darcéen avec l'extension de Forchheimer pour décrire le comportement structurel du milieu poreux et les approximations de Boussinesq pour le nanofluide, il a été pris en considération le modèle qui comporte le mouvement Brownien et la thermophorèse pour le nanofluide en présence une réaction chimique d'ordre 1.

Nous avons développé un modèle mathématique appropriés décrivant le phénomène de la convection mixte sous l'effet d'une part de forces d'inertie microscopique et d'autre part l'effet de réaction chimique.

Afin de résoudre numériquement les équations régissant le mouvement on a choisi une méthode basée sur la technique des différences finies pour la solution du système BVP (Boundary value problem) déduit. Cette approche nous a permis de cerner les effets de différents paramètres de contrôles sur la structure des couches limites et de les distinguer en rapport aux effets combinés sollicités.

Les transferts thermique et massique sont exprimés en termes des paramètres de contrôle du problème. Ces paramètres sont : paramètre de Forchheimer Fo , le nombre Lewis Le , paramètre de flottabilité de fluide de base Nc , nombre de flottabilité des nanoparticules Nr , paramètre du mouvement Brownien Nb , et paramètre de thermophorèse Nt , paramètre de la réaction chimique Kr , paramètre de convection mixte λ , nombre de Lewis pour les nanoparticules Le_p .

A la lumière de cette étude, on peut expliciter les conclusions suivantes :

Conclusion générale et perspective

Pour les profils de vitesse :

- L'augmentation du paramètre Forchheimer, conduit à la diminution de la vitesse à côté de la plaque ; en raison de l'effet d'inertie qui implique a la réduction de l'épaisseur de la couche limite hydrodynamique.
- L'augmentation de l'un de ses paramètres : paramètre de thermophorèse, paramètre de mouvement Brownien ou paramètre de flottabilité de fluide de base ; est accompagnée d'une augmentation de la vitesse.

Pour les profils de température adimensionnelle

- L'augmentation de l'un de ces paramètres : paramètre Forchheimer, paramètre thermophorèse ou paramètre de mouvement Brownien influence linéairement sur les profils de température et la couche limite.
- L'augmentation du paramètre convectif a pour effet de diminuer la distribution de température.
- Le paramètre de flottabilité des nanoparticules n'a aucun effet sur la distribution de température.

Pour les profils de concentration adimensionnelle

- L'augmentation de l'un de ses paramètres : paramètre convectif ; paramètre de flottabilité de fluide de base ; paramètre de la réaction chimique ou le nombre de Lewis ; influence inversement sur les profils de concentration.
- L'augmentation du paramètre Forchheimer suivi par une augmentation des profils de concentration.

Pour les profils de fraction volumique

- L'augmentation de paramètre Forchheimer et paramètre thermophorèse ; influence linéairement sur la fraction volumique et la couche limite.
- L'augmentation de l'un de ses paramètres : paramètre mouvement Brownien ; paramètre convectif ou le nombre de Lewis des nanoparticules engendre une diminution de profils de la fraction volumique, la couche limite est réduite.
- Le paramètre de flottabilité des nanoparticules n'a aucun effet sur la fraction volumique.

Conclusion générale et perspective

Pour les profils de transfert de chaleur local Nu_x , transfert de masse Sherwood Sh_x et transfert de masse des nanoparticules Sh'_x

- L'augmentation de flottabilité de nanoparticules conduit à une augmentation de nombre Nusselt et nombre de Sherwood local des nanoparticules.
- L'augmentation du paramètre thermophorèse et nombre Brownien influence linéairement sur le nombre Sherwood des nanoparticules et inversement sur le nombre de Nusselt.
- L'augmentation de nombre Lewis des nanoparticules provoque une augmentation de nombre de Sherwood des nanoparticules
- L'augmentation de paramètre Forchheimer accompagnée d'une augmentation du nombre Nusselt.
- L'augmentation de l'un de ses paramètres : nombre de Lewis, paramètre convectif, paramètre de flottabilité de fluide de base et de paramètre de réaction chimique provoque un accroissement de paramètre Sherwood.

On peut conclure enfin, que les paramètres de contrôle du problème, et les propriétés thermo-physiques du fluide ont une influence considérable sur le transfert de chaleur et de masse. La présence des nanoparticules dans le fluide de base joue un rôle important sur l'évolution de transfert thermique.

Il serait également intéressant d'étudier les autres effets qui sont rencontrés dans les milieux poreux lors de l'écoulement de fluide en présence de la convection thermique et massique comme, l'effet de dissipation visqueuse, l'effet de Soret...etc., avec plusieurs configurations géométriques, notamment en dimension radiale.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[1] : K.Bencheikh, A.Azzi. « Etude du transfert de chaleur dans une conduite courbée annulaire partiellement poreuse ». Mémoire de Magister, USTHB-FMGP, 2006.

[2] : Kh.Khechiba. « Convection de lapwood dans une cavité poreuse horizontale saturée par un fluide rhéofluidifiant. » Mémoire de Magister, option systèmes énergétiques avancés, université M'Hamed BOUGARA, Boumerdes, 2011.

[3] : N. Sassane. « Modélisation du transfert de chaleur lors de l'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'une paroi poreuse ». Mémoire de Magister, option énergétique, université 20 Aout 55, Skikda, 2008.

[4] : Ribiero Joao-Paulo. Dossier technique de l'ingénieur, nm (5115), Nanofluides pour les applications thermiques, 2009.

[5] : Glades Bachir et Benhadid. « Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Binard ». Université de Toulouse III. Paul.Sabatier, 2010.

[6] : J.Ribeiro, J.Gruss. « Nanofluides pour les applications thermiques ». Techniques de l'ingénieur, 2009.

[7] : Fohanno Stéphane t al. « Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle ». thèse université de Reins Champagne-Ardenne, France, 2012.

[8] : S.El Habib. « Application des nanofluides pour le refroidissement:étude d'un cas d'une géométrie simple ». Mémoire Master Académique Université KASDI Merbah d'Ouargla, 2013.

[9] : R.Leleu. « Transfert de chaleur ». Techniques de l'ingénieur, J 1080, 1992.

[10] : A.Giovannani et B.Bedat. « Transfert de chaleur ». Livre, cepadués-édition.

[11] :P.H.Marty. «Transfers thermiques convectifs». ILP Genie, 2001.

[12]: F.Incopera, D.Dewith, T.Bergman, A.Lavine. « Fundamentals of heat and mass transfer». New York: Wiley, 6 edition, 2007.

- [13]: D.SrinivasaCharya, G.Swamy Reddy. « Chemical reaction and radiation effects on mixed convection heat and masse transfer over a vertical plate in power-law fluid saturated porous medium». Journal of the Egyptian mathematical society 24, 108-115, 2016.
- [14]: J.V.RamanaReddy, Usugunamma, N.Sandeep, C.Sulochana. « Influence of chemical reaction, radiation and rotation on MHD nanofluid flow past a permeable flat plate in porous medium». Journal of Nigerian Mathematical Society 35, 48-65,2016.
- [15] :Dulal Pal, BabulalJalukdar. « Combined effects of joule heating and chemical reaction on unsteady magnetohydrodynamic mixed convection of a viscous dissipating fluid over a vertical plate in porous media with thermal radiation». Mathematical and Computer Modeling 54, 3016-3036, 2011.
- [16]: D.R.V.S.R.K Sastry, A.S.N. Murti, P.K.Kameswaran and T.P.Kantha. « Mixed convection effects and heat mass transfer in a non Newtonian fluid with chemical reaction over vertical plate». Theoretical and Applied Mechanics letters 1, 042007, 2011.
- [17]: Khalil Ur Rehman, AneeqaAchfeq Malik, M.Y.Malik, N.Sandeep, Noor Ui Saba. « Numerical study of double stratification in casson fluid flow in the presence of mixed convection and chemical reaction». Results in Physics 7, 2997-3006, 2017.
- [18]: M.R.KrishnaMurty, B.C.Prasanna Kumara, B.J.Gireesha, Rama Subba Reddy Gorla. « Effect of chemical reaction on MHD boundary layer and melting heat transfer of Williamson nanofluid in porous medium». Engineering Science and Tchnology, an international journal 19, 53-61, 2016.
- [19]: S.R.Mishra, S.Baag, D.K.Mohapatra. « Chemical reaction and sores effects on hydromagneticmicropolar fluid along a stretching sheet. Engineering Science and Technology», an international Journal 19, 1919-1928, 2016.
- [20]: Abk Kumar Pondey, Manaj Kumar. « Chemical reaction and thermal radiation effects on boundary layer flow of nanofluid over a wedge with viscous and ohmic dissipation». St.PetersburgPolytechnical University Journal Physics and Mathematics, 2017.
- [21] :M.Benzema, Y.K.Benkahla, A.Boudiaf, S.Duyahia. « Etude numérique de la convection mixte lors de l'écoulement d'un nanofluid hybride (Ag-Mgo / Eau) dans une cavité trapézoïdale ventilée soumise à l'action d'un champ magnétique». Congrès Français de Mécanique, Lille, 2017.

[22]: P.V.S.N.Murthy. «Effect of double dispersion on mixed convection heat and mass transfer in Non-Darcy porous medium». Department of Mathematics, I.I.T-Madras, Madras 600 036, India.

Résumé

Dans ce présent travail, on a étudié un écoulement en convection mixte, le long d'une plaque verticale semi-finie immergée dans un milieu poreux Non Darcy avec l'extension de Forchheimer, rempli d'un nanofluide incompressible qui comporte les effets de mouvement Brownien et la thermophorèse (modèle à une seule phase) en présence d'une réaction chimique d'ordre 1. Le phénomène de la convection thermo-solutale est régi par les équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et de la concentration d'espèces et des nanoparticules. L'écoulement convectif est régi par différents paramètres de contrôle. À savoir le nombre de Lewis Le , le taux de flottabilité Nc , le paramètre de Forchheimer Fo , le paramètre de la réaction chimique Kr , le paramètre de mouvement Brownien Nb , le paramètre de la thermophorèse Nt et le taux de flottabilité de nano-particules Nr . Le problème envisagé est résolu par voie numérique, à l'aide d'une méthode de différence finie, en utilisant le code Matlab. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'influence de l'effet de différents paramètres de contrôle sur l'écoulement convectif notamment sur les profils de vitesse, la distribution de température et de la concentration. Et également, l'influence sur les taux de transferts thermique et massique en termes de nombre du Nusselt local et nombre du Sherwood local. En plus, la présence de nanoparticules et la réaction chimique jouent un rôle important dans la modification du flux de transfert de chaleur et de masse.

Mots clés: Convection mixte, Milieu poreux, Nanofluide, couche limite, réaction chimique.

Abstract

In this work, we study a mixed convection boundary layer flow over a semi-infinite plate immersed in Darcy- Forchheimer porous medium filled with nanofluid which incorporate the effect of Brownian motion and thermophoresis, in the presence of chemical reaction. The phenomenon is governed by equations of conservation of mass, momentum, energy and both concentration of species and nanoparticles. The convective flow is governed by different control parameters. namely the Lewis number Le , the density ratio Nc , the parameter Forchheimer Fo , the setting of the chemical reaction Kr , the Brownian motion parameter Nb , the parameter of the thermophoresis Nt and the buoyancy ratio of the nanofluid Nr . The proposed problem is solved numerically, using a finite difference method under the Matlab code. The results obtained allowed to demonstrate the influence of the various effects of different control parameters on the convective flow, temperature and concentration profiles, and also on heat and mass ratio with Nusselt and Sherwood numbers. Moreover, the presence of nanoparticles and chemical reaction play an important role in the modification the flow and heat and mass transfer.

Key words: Mixed convection, Porous medium, Nanofluid, boundary layer, chemical reaction.