

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la recherche scientifique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

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

Présenté par :

DAHMANI Yanis

DALI Adel

Thème

Influence de la variation des propriétés du nanofluide sur l'écoulement thermosolutale en convection naturelle dans un milieu poreux non-Darcéen

Soutenu le 03/10/2021 devant le jury composé de :

Mr. DJERRADA Abderrahmane Président

Mr. SADAOUI Djamel Rapporteur

Mr. BENSLIMANE Abdelhakim Examineur

Mr. AGHBARI Anis Co-rapporteur

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

On tient particulièrement à remercier Mr. Anis AGHEBARI pour nous avoir suivis avec patience et intérêt et pour la confiance qu'il a placé en nous tout au long de ce travail. Ses conseils précieux et ses encouragements été d'une aide très précieuse dans la réalisation de ce projet.

On tient à remercier chaleureusement aussi Mr D. SADAOUI à qui on adresse notre sincère gratitude d'avoir accepté de nous encadrer, pour son suivi et sa disponibilité ainsi que sa confiance qu'il nous a accordé.

Nous tenons à exprimer nos remerciements aux membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail

*On tient remercier toute personnes
qui a contribué de près ou de loin à
l'achèvement de ce travaille nos
enseignants, nos amies, nos collègues.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*À mes très chers parents, pour leurs soutiens durant toute ma vie,
et surtout la vie scolaire et universitaire*

À mon très cher frère pour son aide et sa présence

À ma très chère sœur pour tout ce qu'elle a fait pour moi

*À tous mes amis pour leur soutien moral et leur motivation
surtout Sabrina et Badis*

À tous ceux qui me sont chers ;

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin ;

À la réalisation de ce travail.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment ;

*À mon binôme Adel pour son attachement et surtout pour Sa
Patience*

Yanis

Je dédie ce modeste travail :

*À mes très chers parents, pour leurs soutiens durant toute ma vie,
et surtout la vie scolaire et universitaire*

À mon très cher frère pour son aide et sa présence

À tous mes amis pour leur soutien moral et leur motivation

À tous ceux qui me sont chers ;

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin ;

À la réalisation de ce travail.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment ;

*À mon binôme Yanis pour son attachement et surtout pour Sa
Patience*

Adel

Sommaire

Remerciements	i
Dédicaces.....	iii
Sommaire	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
Nomenclature.....	xi
Introduction générale	1
CHAPITRE I :Généralités et notions de base	4
I.1 Introduction	4
I.2 Transfert de chaleur par convection.....	4
a. Convection Forcée	5
b. Convection Mixte	5
c. Convection Naturelle	5
I.2.2 Couche limite thermique, dynamique et massique	5
a. Couche limite dynamique	5
b. Couche limite thermique.....	6
c. Couche limite massique	6
I.2.3 Convection en milieu poreux.....	6
I.3 Généralités sur les nanofluides	8
I.3.1 Introduction.....	8
I.3.2 Définition des nanofluides.....	9
I.3.3 Propriétés thermo-physiques des nanofluides.....	9
a. Concentration des nanoparticules :	9
b. Conductivité thermique.....	9
i Modèle de Maxwell :	9
ii Modèle de Bruggeman.....	10
iii Modèle de Hamilton & Crosser.....	10

c. Viscosité dynamique des nanofluides	10
i Modèle d'Einstein.....	11
ii Modèle de Brinkman	11
iii Modèle de Graham	12
d. Chaleur spécifique	12
i Modèle du Pak et Cho [8]	12
ii Modèle de Xuan et Roetzel [9].....	13
e. Masse volumique	13
f. Coefficient d'expansion volumique	13
I.4 Milieux poreux.....	14
I.4.1 Introduction.....	14
I.4.2 Définition du milieu poreux.....	14
I.4.3 Classification des milieux poreux	16
a. Milieux poreux consolidés	16
b. Milieux poreux non-consolidés.....	16
I.4.4 Caractéristiques des milieux poreux	17
a. Volume élémentaire représentatif (V.E.R).....	17
b. La porosité.....	19
i La porosité utile	19
ii La porosité résiduelle.....	20
c. La Perméabilité.....	21
d. Densité	21
i Pour un matériau saturé en eau.....	22
ii Pour un matériau sec.....	22
iii Saturation en eau	22
e. Viscosité.....	23
I.4.5 Transfert thermique dans un milieu poreux.....	23
L'équation d'énergie	23
I.5 Conclusion	24
Chapitre II : Problématique et modélisation mathématique	25
II.1 Introduction	25
II.2 Revue Bibliographique	25
II.3 Modèle physique	36

II.4 Hypothèses simplificatrices	37
II.5 Équations mathématiques	37
II.5.1 Équations dimensionnelles	37
a. Équation de continuité	37
b. Équation du mouvement	37
c. Équation d'énergie	37
d. Équation de la fraction volumique	38
II.5.2 Condition aux limites	38
II.5.3 Équations adimensionnelles	39
II.5.4 Conditions aux limites	40
II.5.5 Détermination de nombre de Nusselt et Sharwood	40
II.6 Méthode numérique	41
II.6.1 Validation de programme	41
II.7 Conclusion	42
Chapitre III : Résultats et discussions	44
III.1 Introduction	44
III.2 Variations de profil de vitesse adimensionnelle	Error! Bookmark not defined.
III.3 Variations de profil de température adimensionnelle	Error! Bookmark not defined.
III.4 Variations de profile de la fraction volumique	Error! Bookmark not defined.
III.5 Valeurs de $Nu_x/Ra_x^{1/2}$ et $Sh_x/Ra_x^{1/2}$	Error! Bookmark not defined.
III.6 Conclusion	45
Conclusion générale	67
Références bibliographiques	69
Résumé	72
Abstract	72

Liste des figures

Figure I.1: Principe physique convection	5
Figure I.2: Développement de couches limites dynamique, thermique et massique sur une surface arbitraire	6
Figure I.3: Transfert de chaleur par convection naturelle externe dans un milieu poreux	8
Figure I.4: Nanofluides, vus au microscope électronique	9
Figure I.5: Représentation d'un milieu poreux	15
Figure I.6: Exemples de milieux poreux naturels	16
Figure I.7: Structure consolidée	17
Figure I.8: Structure non consolidée	17
Figure I.9: Représentation schématique du volume élémentaire représentatif	18
Figure I.10: Arrangements réguliers de sphères de même diamètre avec la porosité associées	20
Figure I.11: Les deux types de porosité	20
Figure III.1: Effet de N_c sur le profil de vitesse	Error! Bookmark not defined.
Figure III.2: Effet de N_v sur le profil de vitesse	Error! Bookmark not defined.
Figure III.3: Effet de N_b sur le profil de vitesse	Error! Bookmark not defined.
Figure III.4: Effet de N_r sur le profil de vitesse	Error! Bookmark not defined.
Figure III.5: Effet de H sur le profil de vitesse	Error! Bookmark not defined.
Figure III.6: Effet de F_o sur le profil de vitesse	Error! Bookmark not defined.
Figure III.7: Effet de Le sur le profil de vitesse	Error! Bookmark not defined.
Figure III.8: Effet de Le sur le profil de température	Error! Bookmark not defined.
Figure III.9: Effet de F_o sur le profil de température	Error! Bookmark not defined.
Figure III.10: Effet de N_c sur le profil de température.....	Error! Bookmark not defined.

Figure III.11: Effet de N_v sur le profil de température **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.12: Effet de N_t sur le profil de température **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.13: Effet de H sur le profil de température **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.14: Effet de N_b sur le profil de température **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.15: Effet de N_r sur le profil de température **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.16: Effet de F_o sur le profil de la fraction volumique **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.17: Effet de N_c sur le profil de la fraction volumique **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.18: Effet de H sur le profil de la fraction volumique..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.19: Effet de N_v sur le profil de la fraction volumique..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.20: Effet de Le sur le profil de la fraction volumique **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.21: Effet de N_b sur le profil de la fraction volumique..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.22: Effet de N_t sur le profil de la fraction volumique..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.23: Effet de N_r sur le profil de la fraction volumique **Error! Bookmark not defined.**

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Transfert de chaleur par convection naturelle externe dans un milieu poreux7

Tableau III.1: Nombre de Nusselt et de Sharwood pour diverses valeurs de Fo, N_v et N_c ... Error!
Bookmark not defined.

Tableau III.2: Nombre de Nusselt et de Sharwood pour diverses valeurs de N_v, N_c, N_b, N_t
.....Error! Bookmark not defined.

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
A	Section milieu poreux	m
A_{sf}	La surface spécifique	m ²
Bi_x	Nombre de Biot local	-
C	Concentration massique	kg/m ³
$C_{A,s}$	Concentration de l'espèce chimique surfacique A,	mol/m ³
$C_{A,\infty}$	Concentration de l'espèce chimique surfacique A à l'infini,	mol/m ³
c_f	Constante empirique de Forchheimer	-
c_p	Chaleur spécifique	J/kg. K
d	Diamètre des pores	m
Da	Nombre de Darcy	-
Db	Coefficient de diffusion brownien	m ² /s
d_{nb}	Rayon de la particule	m
D_T	Coefficient de la diffusion thermophorèse	m ² /s
e	Indice de vide	-
f	Fraction volumique adimensionnelle	-
Fo	Paramètre non-Darcy de milieu poreux	-
g	Champ de pesanteur	m/s ²
H	Paramètre convectif adimensionnel	-
h	Coefficient de transfert de chaleur	W/m ² .K
k	Coefficient de la perméabilité	-
k_m	Conductivité moyenne	W/m.K
K	Perméabilité de milieu poreux	m ⁻²
L	Longueur de la paroi	m
Le	Nombre de Lewis régulier	-
m	Masse	kg
M_T	Masse totale du matériau	kg
n	Facteur de forme empirique	-
Nb	Paramètre de mouvement Brownien	-
Nc	Paramètre de la conductivité variable	-
Nr	Paramètre du rapport de flottabilité	-

Nt	Paramètre de thermophorèse	-
Nu	Nombre de Nusselt	-
Nu_x	Nombre de Nusselt local	-
q'_w	Flux thermique surfacique	W/m ²
q''_w	Flux massique surfacique	W/m ²
q'''	Production thermique par unité de volume	W/m ³
r	Distance entre les particules	m
Ra_x	Nombre de Rayleigh local	-
$R\tilde{a}$	Nombre de Rayleigh modifié	-
s	Fonction de vitesse adimensionnelle	-
S	Surface d'échange thermique	m ²
Sh_x	Nombre de Sherwood local	-
S_w	Saturation en eau	-
t	Temps	s
T	Température	K
T_f	Température de fluide chaud	K
T_∞	Température du fluide à l'infini	K
p	Pression	Pa
U	Norme de la vitesse de pore	m/s
U_D	Vitesse Dracéen	m/s
V_c	Volume de l'échantillon	m ³
V	Volume	m ³
u, v	Composante de vitesse dimensionnelle	m/s
x, y	Coordonnées cartésiennes	m
W	Teneur en eau massique	-
Q	Débit volumique du fluide	m ³ /s

Lettres grecques

Définition

Unité

Φ	Flux de chaleur	
ε	Porosité	-
ε_u	Porosité utile	-
ε_r	Porosité résiduelle	-

η	Variable de similarité	-
θ	Température adimensionnelle	
λ	Conductivité thermique	W/m.K
μ	Viscosité dynamique	Kg/s. m
ν	Viscosité cinématique	m ² /s
ρ	Masse volumique	kg/m ³
σ	Densité	
α	Coefficient de dispersion	m ² /s
α_m	Diffusivité thermique de milieu poreux	m ² /s
σ_b	Densité globale	kg/m ³
σ_f	Densité globale du fluide	kg.m ⁻³
$\vec{\nabla}P$	Gradient de pression	
ΔP	Différence de pression	Pa
ΔT	Différence de température	T
Ψ	Fonction de courant sans dimension	-
τ	Rapport de la capacité thermique du nanofluide	-
ϕ	Fraction volumique de nanoparticules	-
ϕ_∞	Fraction volumique ambiante de nanoparticules	
β	Coefficient de dilatabilité	
φ	Fraction Volumique des nanoparticules	-
$\dot{\eta}$	Coefficient d'Einstein	

Indice

w

f

p

np

nf

s

fb

Définition

Près de la paroi

Fluide

Poreux

Nanoparticules

Nanofluide

Solide

Fluide de base

Introduction

générale

Introduction générale

Dans le domaine industriel et technologique, on trouve souvent le phénomène de transfert de chaleur et ses différentes applications dans plusieurs domaines. Sous ses diverses formes rayonnement, conduction et convection, cette dernière est la plus visée dans certains domaines bien spécifiques tels que le refroidissement des processeurs, des composants électroniques, les radiateurs et les échangeurs de chaleurs, etc.

Le transfert thermique est de grande importance, il se trouve un peu partout par exemple dans les chambres chauffées, les halls d'usines, les maisons vertes, les récipients refroidis de stockage de nourriture, et dans les véhicules où la chaleur générée par le moteur d'entraînement. De même, les équipements électroniques dissipent la chaleur, ce qui nécessite un système de refroidissement. Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, ont aussi besoin de différents processus de transfert de chaleur. Le transfert de chaleur est aussi un processus clé dans les centrales thermiques. De même, de nombreux procédés de production comprennent le transfert de chaleur sous des formes diverses. Dans chacune de ces applications, le transfert de chaleur est réalisé par des dispositifs de transfert de chaleur, tel que des échangeurs de chaleur, des évaporateurs, des condenseurs, et des dissipateurs de chaleur.

Un but commun de plusieurs chercheurs, L'intensification de ces échanges et l'amélioration du rendement qui devenues aujourd'hui une problématique majeure dans le monde industriel, des organismes de réglementation mais aussi de la société dans son ensemble, qui prend conscience de l'épuisement progressif des ressources énergétiques et qui se soucie de l'avenir en matière énergétique.

Des recherches et de nombreux essais numériques et expérimentaux mené portant sur la description des phénomènes géométriques gérant la convection, l'effet de la nature des systèmes dans lesquels elle a lieu (géométrie spécialement), et les propriétés des fluides impliqués (propriétés physico-chimiques).

Ce besoin d'améliorer les transferts thermiques des fluides a donné naissance au développement des nanofluides. Ces derniers sont des solutions contenant des nanoparticules en suspension dans un fluide à base classique telle l'eau. Grâce à leurs propriétés améliorées de transfert thermique, les nanofluides peuvent être utilisés dans une multitude d'applications en ingénierie : l'industrie automotrice, le génie biomédical, le refroidissement des éléments

électroniques...etc., et même en milieu poreux rendant la complexité extrême comme deuxième niveau.

Au niveau mondial, la géothermie est de plus en plus exploitée, que ce soit pour la production de chaleur ou d'électricité. En 2018, 284 TWh de chaleur géothermique ont été mis à disposition dans 88 pays selon l'IGA (International Geothermal Association). La Chine et les États-Unis occupent les deux premières places. L'exploitation de l'énergie géothermique nécessite des connaissances interdisciplinaires de spécialiste dans différents domaines tels que des phénomènes physiques thermiques et mécaniques. L'extraction d'énergie géothermique qui fait partie d'un domaine de recherche très vaste, constitué par l'étude des phénomènes de la convection thermosolutale (Couplage thermique – massique) dans les milieux poreux. Nous avons essayé de nous approcher des préoccupations qu'il faut relever dans ce domaine complexe via une classe de modèles mathématiques qui pourraient reproduire (au moins partiellement) l'expérience.

La convection thermosolutale dans les milieux poreux est généralement causée par la présence des gradients de température et de concentration. Ces deux gradients engendrent 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 dissipation visqueuse, la dispersion thermique et massique, l'effet de l'équilibre thermique entre le fluide et le solide, la radiation thermique, la réaction chimique, etc.

D'une façon générale, l'importance de comprendre l'interaction entre le transport thermique et massique et les effets qui en résultent est un facteur incontournable pour gérer l'énergie, optimiser et contrôler les systèmes industriels, concevoir des matériaux nouveaux ... etc.

Le présent document est organisé de la manière suivante :

Notre mémoire est structuré de trois chapitres. On a consacré le premier chapitre pour l'étude théorique, en premier lieu on a commencé par la définition de la convection naturelle, suivi par une description en ce qui concerne la région dite couche limite dynamique, thermique et massique. On explique aussi le transfert de chaleur dans le milieu poreux.

En deuxièmes lieux, l'étude des nanofluides, leurs définitions, leurs propriétés thermo-physiques en précisions.

En troisième lieu, on a présenté une description détaillée des milieux poreux, ses classifications ainsi que ses caractéristiques. Puis on finit par une conclusion.

Le deuxième chapitre, une revue bibliographique a été établie, suivi par l'exposition de problème physique et le modèle mathématique pour étudier l'influence de la variation des propriétés du nanofluide (viscosité variable, conductivité thermique variable) sur l'écoulement thermosolutale en convection naturelle dans un milieu poreux non-Darcy, la résolution des équations va se faire pas les méthodes numériques en utilisant un programme Matlab, ce dernier est validé par rapport à des articles déjà publié.

On finit par le troisième chapitre, qui contient les résultats obtenus lors de l'étude et l'interprétation de ces derniers, et on a abouti à une conclusion et une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités et notions de base

I. Convection Naturelle, Nanofluides, Milieu poreux

I.1 Introduction

Le processus de transfert de chaleur dans les fluides a été exploité dans de nombreuses applications pratiques et industrielles telles que le transport, les alimentations énergétiques, la climatisation et le refroidissement électronique.

La convection est un mode de transfert de chaleur où celle-ci est advectée (transportée, conduite) par au moins un fluide. Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue : la convection libre ou naturelle, la convection forcée.

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

I.2 Transfert de chaleur par convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui engendre un déplacement de matière. La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le mouvement macroscopique de la matière dû à une différence de température, dans un milieu fluide (liquide ou gaz) ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement.

Ce mode d'échange de chaleur demeure le plus important dans le transfert d'énergie qui existe au sein des milieux fluides ou lorsqu'un fluide circule autour d'un solide, il se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement en présence d'un gradient de température.

. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux particules fluides adjacentes, l'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces particules. Ensuite ces dernières vont se mélanger avec d'autres particules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie, celle-ci est à présent emmagasinée dans les particules fluides et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

La loi qui gouverne un transfert thermique par convection est :

$$\Phi_{cv} = h_{cv} \cdot S \cdot \Delta T \quad (I.1)$$

h : le coefficient du transfert de chaleur par convection [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] ou [$\text{kcal}/\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}$]

a. Convection forcée

Le phénomène de convection forcée apparaît quand le mouvement du fluide est imposé par une cause mécanique extérieure (pompe, ventilateur, ...)

b. Convection mixte

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

c. Convection naturelle

Le mouvement du fluide est dû au phénomène de transmission de chaleur lui-même. Les gradients de température créent des gradients de masses volumiques et par conséquent un mouvement du fluide.

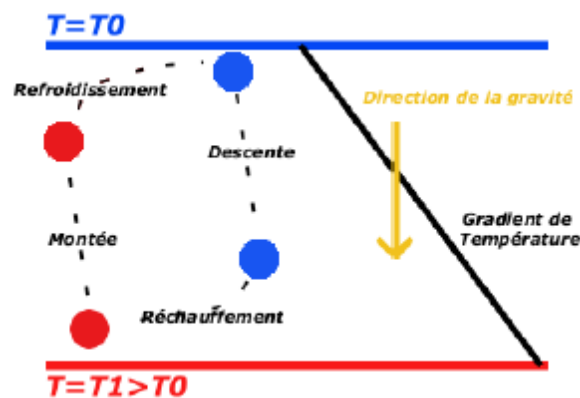


Figure I.1: Principe physique convection

I.2.2 Couche limite thermique, dynamique et massique

Le concept de la couche limite joue un rôle important pour la compréhension de la convection thermique et massique entre une surface et un fluide qui circule devant elle. Dans ce qui suit, la couche limite dynamique, thermique, et massique sont décrits.

a. Couche limite dynamique

Une des principales caractéristiques des fluides c'est la viscosité, sa valeur est toujours supérieure à zéro, À la paroi, la vitesse du fluide est nulle et on observe des forces de frottement qui freinent l'écoulement au voisinage de celle-ci.[1]

En conséquence, l'écoulement du fluide est caractérisé par deux zones distinctes, une couche mince de fluide (la couche limite) dans laquelle les gradients de vitesses et les contraintes de cisaillement sont grandes et une région en dehors de la couche limite dans laquelle les gradients de vitesses et les contraintes de cisaillement sont négligeables.

b. Couche limite thermique

Lorsqu'un fluide, de température T_∞ , s'écoule sur une paroi à température T_p , une couche limite thermique se forme s'il existe une différence de températures entre le fluide et la surface. 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 leurs voisines. [1]

c. Couche limite massique

La couche limite massique est la zone du fluide dans laquelle le gradient de concentration existe, l'épaisseur est typiquement définie comme la valeur de y pour que $[(C_{A,s} - C_A)/(C_{A,s} - C_{A,\infty})] = 0.99$ avec l'augmentation de la distance du bord d'attaque, les effets de transfert massique pénètrent plus loin dans le courant libre et la couche limite massique évolue. [1]

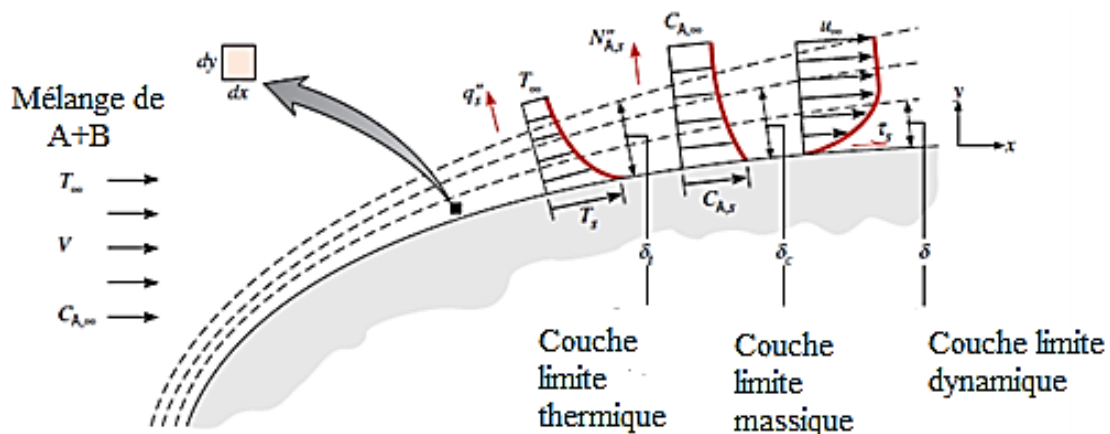


Figure I.2: Développement de couches limites dynamique, thermique et massique sur une surface arbitraire [2]

I.2.3 Convection en milieu poreux

On s'intéresse dans cette partie à la convection naturelle autour d'un objet (plaque, cylindre ou sphère) immergé dans un milieu poreux. De même qu'en milieu libre, il existe pour les milieux poreux des corrélations permettant de prédire les transferts thermiques (caractérisés par un nombre

de Nusselt) en fonction des écarts de température (caractérisés par un nombre de Rayleigh) et de la géométrie. On utilise dans ce cas une diffusivité thermique moyenne α_m et un nombre de Rayleigh modifié (basé sur la longueur caractéristique L et la perméabilité K du milieu poreux) définis comme suit, tableau (I.1) et figure I.9, [2] :

$$\alpha_m = \frac{k_m}{(1-\varepsilon)(\rho C_p)_s + \varepsilon(\rho C_p)_f} \quad (I.2)$$

$$R\tilde{a} = Ra \times Da = \frac{\rho g \beta \Delta T L^3}{\mu \alpha_m} \times \frac{K}{L^2} = \frac{\rho g \beta \Delta T K L}{\mu \alpha_m}$$

(I.3)

k_m : est la conductivité moyenne, [W m⁻¹ K⁻¹]

K : est la perméabilité du milieu poreux, [m⁻²]

Da : est le nombre de Darcy, Da =K/L²

Configuration	Corrélation	Validation expérimentale	Références
Plaque verticale isotherme (Fig. I.3-a)	$Nu = 0.89R\tilde{a}^{1/2}$	1<Ra<10 ² Polyuréthane de 0.98 de diamètre et de 0.4 à 4 pores par millimètre	Cheng et Minkowycz (1977)
Plaque horizontale isotherme chauffée sur la face supérieure (Fig. I.3-b)	$Nu = 1.26R\tilde{a}^{1/2}$	Pas de validation expérimentale	Cheng et Chang (1976)
Cylindre horizontal Isotherme(Fig. I.3-c)	$Nu = 0.565R\tilde{a}^{1/2}$	5<Ra<10 ²	F and et al. (1986)
Sphère isotherme (Fig. I.3-c)	$Nu = 0.362R\tilde{a}^{1/2}$	Pas de validation expérimentale	Cheng (1985)
Cylindre vertical avec des extrémités Adiabatiques (Fig. I.3d)	$\frac{q_c}{q_p} = 1 + 0.26\zeta_L^{\otimes}$ $\zeta_L = \frac{2L}{r_0 R\tilde{a}^{1/2}}$	Pas de validation expérimentale	Minkowycz et Cheng (1976)

Tableau I.1 : Transfert de chaleur par convection naturelle externe dans un milieu poreux [2].

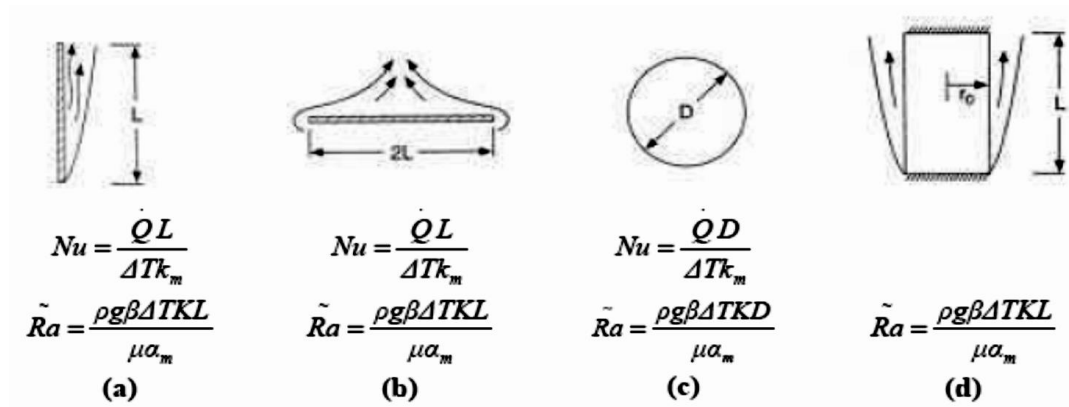


Figure I.3: Transfert de chaleur par convection naturelle externe dans un milieu poreux
 (a) Plaque verticale isotherme ; (b) Plaque horizontale isotherme chauffée sur la face supérieure ;
 (c) Cylindre horizontal isotherme ; (d) Cylindre vertical avec des extrémités adiabatiques [2]

I.3 Généralités sur les nanofluides

I.3.1 Introduction

Les études dans le domaine des écoulements des fluides et le transfert de chaleur ont été toujours un sujet très abordé, dans le secteur industriel et technologique, plusieurs recherches porter pour l'amélioration du transfert thermique par les écoulements des fluides vu l'importance de ce phénomène en énergétique.

Le problème de l'efficacité et le rendement ont suscité le monde a cherché des moyens pour leur amélioration et la diminution des pertes. Ce qui a mené à faire plusieurs travaux soit théorique ou expérimentale, l'une des premières manipulations c'est de changer les géométries des échangeurs thermiques, ce qui n'était pas suffisant. Le développement des nanosciences et les nanotechnologies ont mené à la fabrication des nanoparticules avec une forte conductivité thermique, l'idée étais de mélanger ces nanoparticules avec un fluide caloporteur, le mélange fut alors nommé nanofluide, ce terme utiliser pour la première fois par CHOI en 1995 dans le laboratoire national d'Argonne. [3]

Les nanofluides trouvent leurs larges applications dans domaines tels que les applications électroniques, le transport industrielles, le chauffage des bâtiments et la réduction de la pollution, le refroidissement des systèmes nucléaires, l'espace et la défense stockage de l'énergie, l'absorption solaire, la réduction de la friction, le scellement magnétique, l'activité antibactérienne, l'administration de nano médicaments, les fluides de freinage des véhicules, fluides de freinage, les nanofluides à base microbienne, les piles à combustible, les filtres et capteurs optiques à base de nanofluides[4]

I.3.2 Définition des Nanofluides

Un nanofluide est une composition d'un fluide caloporteur mélangé avec des particules de taille nanométrique appelé nanoparticules, afin d'augmenter la conductivité thermique et le transfert de chaleur.

Le choix des liquides de bases est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégation, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule. On représente dans la figure I.1 une vue microscopique de quelques modèles de nanofluides.

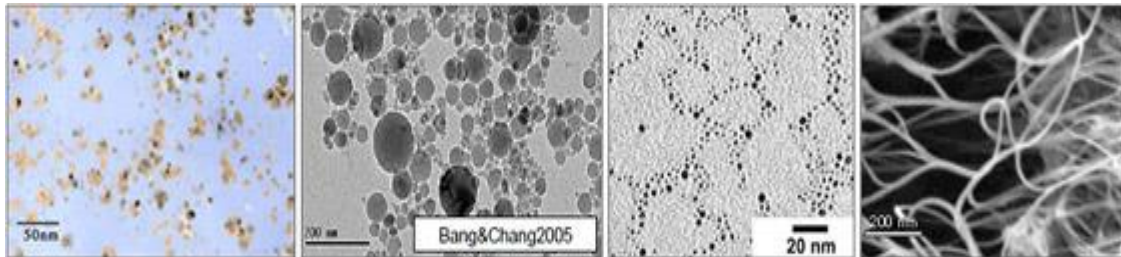


Figure I.4: Nanofluides, vus au microscope électronique (de gauche à droite) : éthylène glycol+cuivre à 0,5 % ; eau +alumine ; eau +or ; eau +nanotubes de carbone

I.3.3 Propriétés thermo-physiques des nanofluides

a. Concentration des nanoparticules :

Un des paramètres clé d'un nanofluide est sa concentration en nanoparticules. Cette concentration est généralement donnée sous forme de fraction volumique de nanoparticules, qui est définie par le rapport [5]

$$\phi = (\text{Volume de nanoparticules}) / (\text{Volume de la suspension}).$$

b. Conductivité thermique

La conductivité thermique, notée λ (W/m.K), est la capacité d'un matériau de conduire ou de transmettre de la chaleur. C'est une propriété très importante pour l'amélioration des performances thermiques d'un fluide caloporteur. La synthèse des nanofluides répond au besoin d'améliorer et d'amplifier la conductivité thermique des liquides. Aussi, de nombreux travaux ont été menés pour mesurer mais aussi prédire et expliquer cette amélioration.

i. Modèle de Maxwell :

Maxwell fut le premier à dériver un modèle pour estimer la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = \frac{\lambda_{np} + 2\lambda_{fb} - 2\varphi(\lambda_{fb} - \lambda_{np})}{\lambda_{np} + 2\lambda_{fb} + 2\varphi(\lambda_{fb} - \lambda_{np})} \quad (I.4)$$

Où λ_{nf} , λ_{fb} et λ_{np} représentent respectivement la conductivité thermique (W/m.K) du

nanofluide, du fluide de base et des nanoparticules. Φ représente la fraction volumique des nanoparticules. Le modèle de Maxwell est satisfaisant pour les suspensions contenant des particules sphériques de concentrations volumiques relativement faibles mais ne tient pas compte de l'effet de la taille ni de la forme des particules. Il est à noter aussi que l'effet des interactions inter-particules est négligé dans ce modèle. [6]

ii. Modèle de Bruggeman

Le modèle de Bruggeman complète celui de Maxwell pour des concentrations volumiques relativement élevées.

$$\Phi \left(\frac{\lambda_{np} - \lambda_{nf}}{\lambda_{np} + 2\lambda_{nf}} \right) + (1 - \Phi) \left(\frac{\lambda_{fb} - \lambda_{nf}}{\lambda_{fb} + 2\lambda_{nf}} \right) = 0 \quad (I.5)$$

iii. Modèle de Hamilton & Crosser

Le modèle de Hamilton-Crosser est une extension du modèle de Maxwell, qui tient compte de la forme des particules. En effet, pour prendre en compte la non-sphéricité des particules, ce modèle intègre un facteur géométrique appelé sphéricité, et noté Ψ , faisant référence à la géométrie sphérique. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de l'aire d'une sphère de même volume que la particule sur l'aire de cette même particule

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = \frac{\lambda_{np} + (n-1)\lambda_{fb} - \varphi(\lambda_{fb} - \lambda_{np})(n-1)}{\lambda_{np} + (n-1)\lambda_{fb} + \varphi(\lambda_{fb} - \lambda_{np})(n-1)} \quad (I.6)$$

n : est un facteur de forme empirique donné par $n = \frac{3}{\Psi}$

Ce modèle peut être utilisé lorsque la conductivité thermique des particules est au moins 100 fois plus élevée que celle du fluide de base [6]

c. Viscosité dynamique des nanofluides

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

Sa connaissance est fondamentale pour toutes les applications impliquant le transport de fluides. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nanofluide mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. Ainsi, ces deux propriétés sont étroitement corrélées, et doivent être maîtrisées en vue d'une exploitation de ce type de fluides dans des échangeurs.

Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions.

. Cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité du fluide de base et la fraction volumique du nanofluide. Pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes.[7]

i. Modèle d'Einstein

D'une manière générale, les formules existantes dérivent du travail fondamental d'Einstein (1906). Basé sur l'hypothèse que l'énergie a une dépendance linéaire avec la viscosité, Einstein a déterminé l'énergie dissipée autour d'une seule particule dans un fluide en associant son énergie au travail réalisé pour la faire avancer relativement au fluide. A partir de ce résultat, il a déterminé l'expression décrivant une dépendance linéaire de la viscosité des suspensions dans un fluide avec la concentration

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\varphi) \quad (I.7)$$

ii. Modèle de Brinkman

La formule de Brinkman [BRI/1952] complète le modèle d'Einstein jusqu'à une concentration volumique inférieure à 4%

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \frac{1}{(1-\varphi)^{2,5}} (I.8)$$

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

iii. Modèle de Graham

Graham (1981) a proposé une formule généralisée qui tend vers le modèle d'Einstein pour des concentrations volumiques très faibles :

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} (1 + 2,5\varphi + 4,5\varphi^2) \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{d_{nb}}\right) \left(2 + \frac{r}{d_{nb}}\right) \left(1 + \frac{r}{d_{nb}}\right)} \right] \quad (I.9)$$

Où d_{nb} et r sont respectivement le rayon de la particule (m) et la distance entre les particules (m).

Pour des fractions volumiques plus élevées, Krieger et Dougherty [KRI/1956] ont développé un modèle basé sur le taux maximal de compactage (ou la concentration maximale de particules dans une suspension) qui consiste à calculer la viscosité dynamique d'une suspension en supposant qu'on ajoute successivement les particules dans un fluide de base considéré homogène. Chaque particule voit autour d'elle un fluide homogène dont la viscosité ne dépend que de la concentration volumique des particules et de la viscosité du fluide interstitiel. Ce modèle est efficace pour estimer la viscosité dynamique des nanofluides sans présence des agglomérats [HAL/2013]. Au premier et second ordre, il correspond respectivement aux modèles d'Einstein et de Batchelor.

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \left(1 - \frac{\varphi_V}{\varphi_M}\right)^{-\eta} \quad (I.10)$$

η Est le coefficient d'Einstein, i.e. $\eta=2.5$ et $\varphi_M \approx 0.64$ dans le cas de particules sphériques

d. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique ou la capacité thermique massique, notée C_p (J/kg.K), est définie par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré Kelvin la température de l'unité de masse d'une substance.

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

i. Modèle du Pak et Cho [8]

Le modèle du Pak et Cho basé sur la loi de mélange d'une suspension homogène qui est définie par la formule suivante :

$$c_{p,nf} = \varphi (c_p)_{np} + (1 - \varphi) (c_p)_{fb} \quad (I.11)$$

ii. Modèle de Xuan et Roetzel [9]

Ils ont travaillé avec la formule ci-dessous :

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_{fb} + \varphi(\rho c_p)_{np} \quad (I.12)$$

$(c_p)_{nf}$, $(\rho c_p)_{fb}$ et $(c_p)_{np}$ désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nanofluide, du fluide de base et des nanoparticules.

e. Masse volumique

La masse volumique des nanofluides est proportionnelle à la fraction volumique en particules et augmente avec l'ajout des nanoparticules.

Pour calculer la masse volumique d'un nanofluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique φ à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange [4].

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_{fb} + m_{np}}{V_{fb} + V_{np}} = \frac{\rho_{fb}V_{fb} + \rho_{np}V_{np}}{V_{fb} + V_{np}} \quad (I.13)$$

La fraction volumique des nanoparticules, notée φ désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + solide).

$$\varphi = \frac{\text{Volume Solide}}{\text{Volume totale du nanofluide}} = \frac{V_{np}}{V_{np} + V_{fb}} \quad (I.14)$$

On en déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_{np} + (1 - \varphi) \rho_{fb} \quad (I.15)$$

ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide,

ρ_{np} : La masse volumique des nanoparticules solides

ρ_{fb} : La masse volumique du fluide de base

f. Coefficient d'expansion volumique

Pour calcul la valeur de ce coefficient pour les nanofluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides et par analogie avec la relation (II.12), on déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad (I.16)$$

Où

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

β_f : Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

β_s : Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules

I.4 Milieux poreux

I.4.1 Introduction

Les milieux poreux autant que des milieux existant dans la vraie vie et dans la nature, ainsi que dans les multiples domaines industriels tel que : la géologie (exploitation pétrolière, structure des sols), la mécanique et la biomécanique (structures alvéolaires), la chimie (catalyse, séparation, milieux désordonnés), l'anatomie (structure osseuse), l'agro-alimentaire (pâtes, pain), la médecine, etc. Il était la destination des chercheurs pour effectuer des études sur les écoulements dans ses milieux et essayé d'arriver à un résultat satisfaisant concernant le transfert thermique dans ses structures.

On trouve de nombreux exemples de milieux poreux dans la vie courante : Textiles, cuirs, papiers, tissus, matériaux de construction, isolants, sols, filtres, etc., en constituant autant d'illustrations (figure III.2).

I.4.2 Définition du milieu poreux

On désigne un milieu poreux les corps solides qui contiennent des « pores », Intuitivement, les « pores » sont des espaces vides qui doivent être répartis plus ou moins fréquemment dans le matériau pour que celui-ci soit qualifié de « poreux », Les « pores » sont des espaces vides de taille intermédiaire entre les cavernes et les interstices moléculaires, ils peuvent communiquer entre eux et contenir une ou plusieurs phases fluides pouvant s'écouler et, éventuellement, échanger entre elles et/ou avec le solide de la matière et/ou de l'énergie.[10]

Les pores reliés entre eux, permettent l'écoulement d'une ou plusieurs fluides, on peut alors classer les problèmes rencontrés, suivant les phases en présence à l'intérieur des pores :

- Le milieu est saturé d'un seul fluide ou encore un ensemble de fluides miscibles (par exemple un sol imbibé d'eau).
- Le milieu est composé de plusieurs fluides non miscibles, un ensemble de ménisques sépare alors les différentes phases (par exemple un mélange eau- huile- gaz dans les roches pétroliers, ou un sol partiellement saturé d'eau, la deuxième phase étant l'air)

- Le milieu est le siège d'un transport de fluide et de particules solides. Il agit en général comme un filtre, mais ses propriétés hydrodynamiques se modifient au cours du temps.
[11]

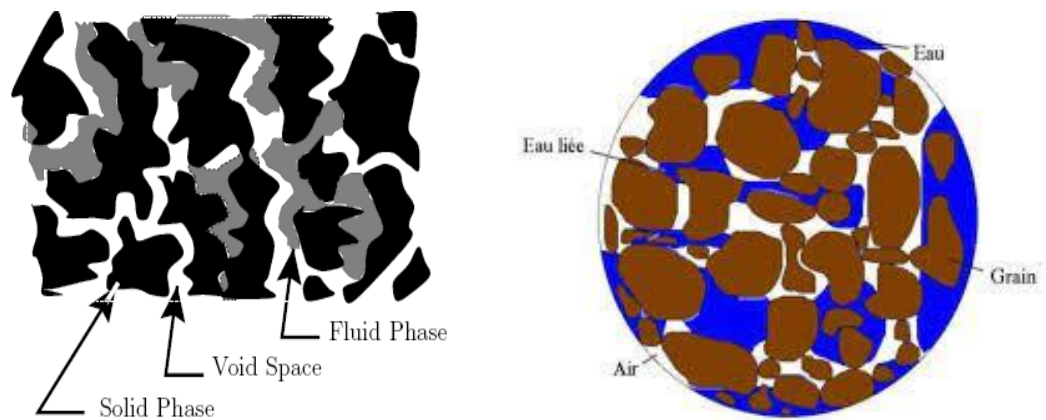


Figure I.5: Représentation d'un milieu poreux

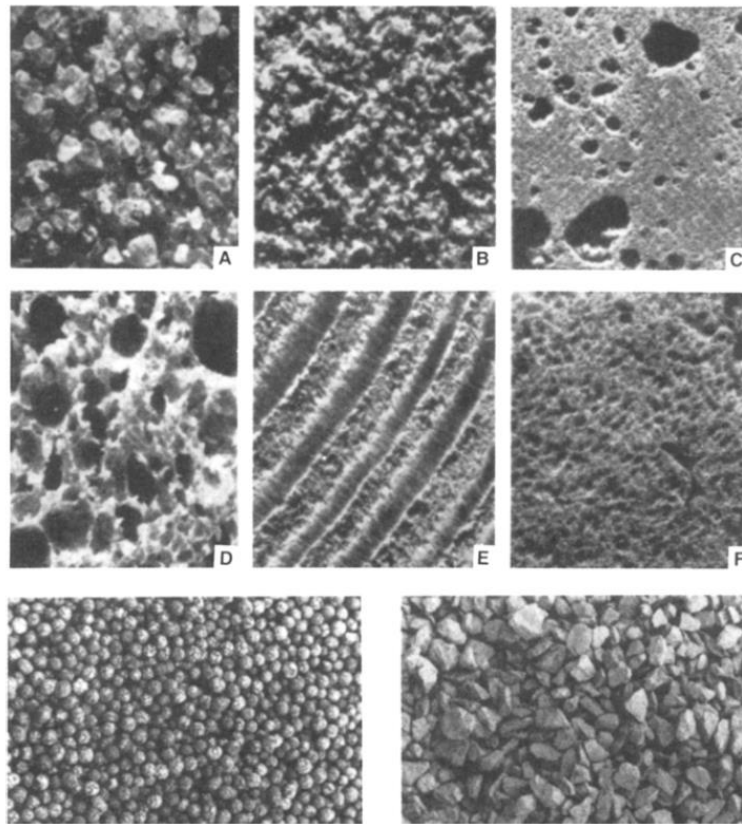


Figure I.6: Exemples de milieux poreux naturels : A) sable de plage, B) grès, C) calcaire, D) pain de seigle, E) bois, F) poumon humain, En bas : Les matériels poreux granuleux sont utilisés dans la construction et en industrie, 0.5 centimètre diamètre Liapor, sphère (à gauche) ; et le calcaire écrasé de taille 1 centimètre (à droite),[12]

I.4.3 Classification des milieux Poreux

Les milieux poreux connus par leur diversité, en particulier du point de vue de la structure géométrique qui les définit. Dans ce paragraphe, quelques concepts de base liés aux caractéristiques structurelles des milieux poreux sont introduits. La matrice solide du milieu poreux peut être :

a. Milieux poreux consolidés

Dans ce cas, la matrice solide dense ne peut pas être divisée en particules ou fibres (calcaire, grès, argile, bois, céramique, poudre frittée, tissus végétaux et animaux, etc.)

b. Milieux poreux non-consolidés

La phase solide est formée de particules ou fibres non fondues (gravier, sable, limon, billes de verre et d'acier, matériaux divers, etc.) ; les billes de verre sont particulièrement utilisées en laboratoire pour étudier le phénomène de transfert poreux dans le milieu. [13]



Figure I.7: Structure consolidée



Figure I.8: Structure non consolidée

I.4.4 Caractéristiques des milieux poreux

Les propriétés du milieu poreux dépendent de l'échelle de description considérée. Elles ont un sens physique à une échelle macroscopique et leurs valeurs varient avec le volume de mesure qui peut être, par exemple, de la taille d'une hétérogénéité locale, d'une strate ou d'un aquifère. Que ce soit dans le cadre de la modélisation numérique ou celui de la mesure des paramètres, il est nécessaire de pouvoir changer d'échelle et déduire la valeur des paramètres d'une échelle à l'autre. C'est dans ce but que le calcul de paramètres équivalents a fait l'objet de plusieurs études théoriques [14]. Les phénomènes qui se produisent dans les milieux poreux dépendent de la géométrie de la matrice, celle-ci est donc caractérisée par un certain nombre de grandeurs moyennes, géométriques ou statistiques[15].

Pour caractériser un milieu poreux, on doit tout d'abord définir un Volume Élémentaire Représentatif (VER) [16].

a. Volume élémentaire représentatif (V.E.R)

Il existe une différence entre les équations qui gouvernent l'évolution des grandeurs macroscopiques et celles s'appliquant au niveau microscopique. Afin de pouvoir établir de telles équations, nous introduisons la notion du volume élémentaire représentatif (VER) à partir duquel le

milieu poreux peut être considéré comme un milieu continu (Bear, 1979). Dans cette théorie, le système physique réel discret est remplacé par un système continu dans lequel les propriétés physiques le décrivant varient continûment dans l'espace

L'intérêt est donc de pouvoir formuler les changements dans le système en termes d'équations différentielles décrivant les processus qui ont lieu.

Les dimensions du VER sont généralement suffisamment grandes par rapport à la taille du grain, pour contenir un grand nombre de pores et pouvoir ainsi définir une propriété moyenne globale avec l'assurance d'une fluctuation négligeable d'un pore à l'autre, mais suffisamment petites pour que les variations du paramètre d'un domaine au domaine voisin puissent être approchées par des fonctions continues (Marsily, 1981)[17].

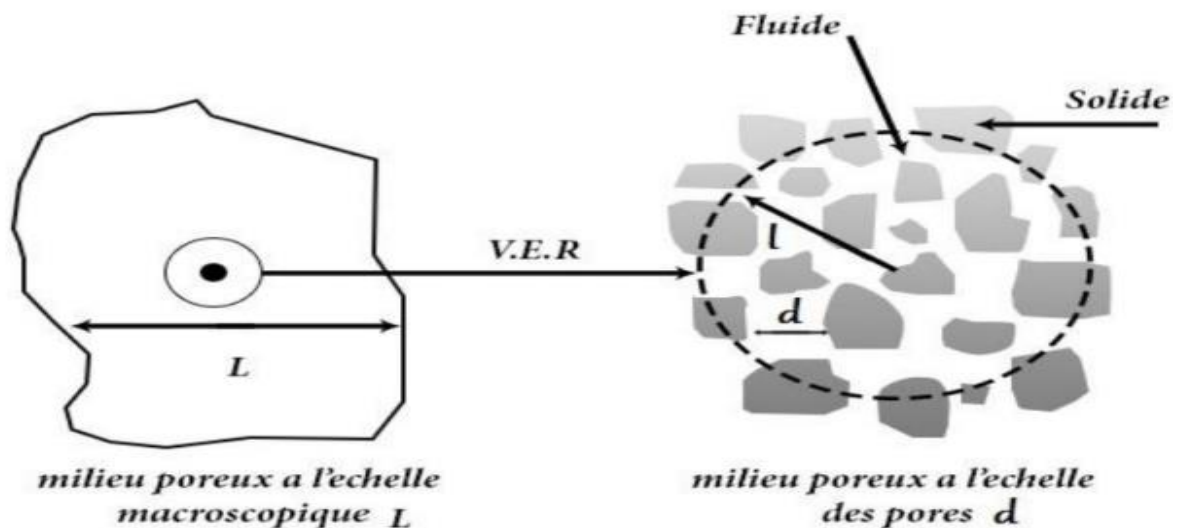


Figure I.9: Représentation schématique du volume élémentaire représentatif [18].

La taille du V.E.R est donc choisie de manière théorique, en fonction de la division du milieu, de telle sorte que :

- Le V.E.R soit suffisamment grand pour contenir un grand nombre de pores, de manière à pouvoir y définir une propriété moyenne homogène telle que l'effet de fluctuation d'un interstice à un autre soit négligeable.
- Le V.E.R soit suffisamment petit pour que les variations des propriétés d'un domaine au domaine voisin puissent être approchées par des fonctions continues sans introduire d'erreur décelable par les instruments de mesure à l'échelle macroscopique

b. La porosité

La porosité notée « ε » est le principal paramètre définissant un milieu poreux, elle est définie comme le rapport du volume vide occupé par les pores sur le volume total du milieu poreux soit :

$$\varepsilon = \frac{V_{pores}}{V_{total}} \quad (I.17)$$

Cette équation qui varie entre 0 (solide plein) et 1 (volume complètement vide). Puisqu'il s'agit d'un rapport de mêmes propriétés, la porosité n'a pas d'unité et elle est souvent exprimée en pourcentage.

Il y'a d'autres paramètres caractérisant la proportion de pore dans un matériau c'est l'indice du vide qui est défini comme le rapport du volume du vide V_v et le volume du solide V_s

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (I.18)$$

Le lien entre la porosité et l'indice du vide est exprimé par [2]

$$\varepsilon = \frac{e}{e+1} \quad (I.19)$$

i. La porosité utile

La porosité qui intéresse le spécialiste des gisements est celle qui permet la circulation des fluides à travers les pores. Elle est définie par :

$$\varepsilon_u = \frac{V_{Pores\ accessible}}{V_t} \quad (I.20)$$

La porosité utile varie entre 0 et 1, plus que le volume des pores accessible est grand plus la circulation de fluide est grande, et plus que le volume des pores accessible diminue la circulation de fluide diminue. La figure I.10 montre l'Arrangements réguliers de sphères de même diamètre avec la porosité associée.

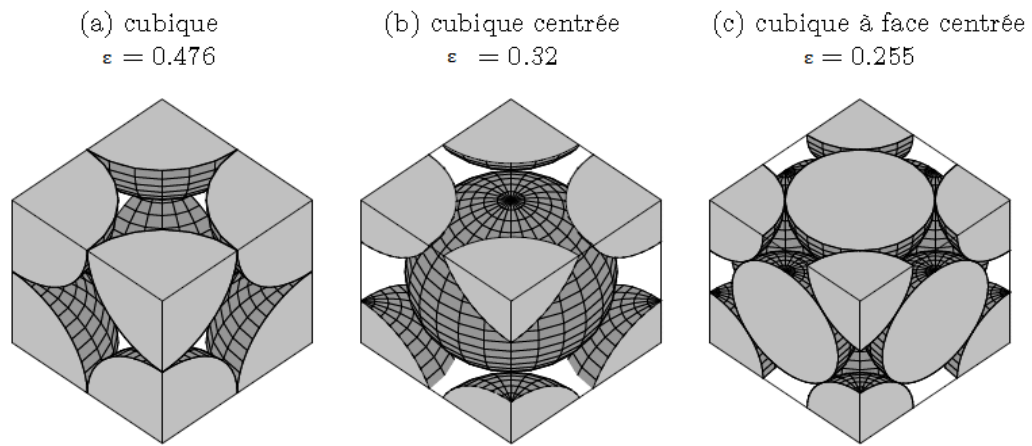


Figure I.10: Arrangements réguliers de sphères de même diamètre avec la porosité associées [19]

ii. La porosité résiduelle

C'est la porosité qui ne compte que des pores isolés, elle est définie par :

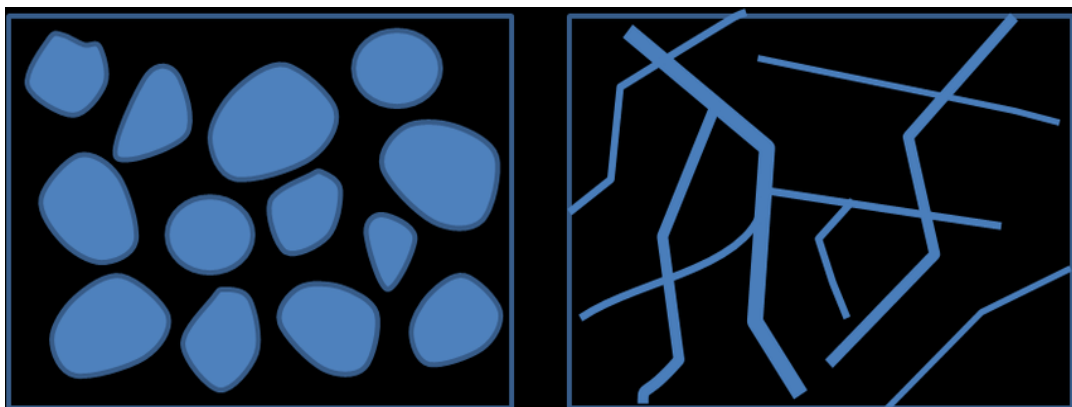
$$\varepsilon_r = \frac{V_{pores\ inaccessibles}}{V_t} \text{ (I.21)}$$

On aura :

$$\varepsilon = \varepsilon_u + \varepsilon_r \text{ (I.22)}$$

La porosité peut être de deux formes : La porosité d'interstice dans les pores des roches sableuses (figure I.11a).

La porosité de fissure dans les fissures et fractures des roches compactes sans pores interconnectés (granites, calcaires...) (figure I.11b).



(a)

(b)

Figure I.11: Les deux types de porosité [10]

c. La perméabilité

La perméabilité d'un milieu poreux correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide lors de son écoulement à travers les pores de ce milieu sous l'effet d'un gradient de pression. Les hydrogéologues et les pétroliers mesurent la perméabilité en darcys (d'après Henri Darcy, 1856).

La perméabilité K d'un milieu poreux dépend de la porosité de la géométrie de la matrice solide. L'unité de la perméabilité K est le DARCY (1 DARCY = perméabilité d'un milieu poreux de 1 cm^2 de section, 1 cm de longueur, soumis à une différence de pression de 1 bar traversé par un fluide dont la vitesse de filtration est 1 cm/s) $1 \text{ Darcy} = 9.87 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$. La perméabilité est déterminée par la mesure expérimentale.

Plusieurs évaluations de K ont été proposées :

Par exemple dans le modèle de darcy la perméabilité est donnée :

$$K = -\frac{\mu_f U_D}{\frac{dP}{dx}} \quad (\text{I.23})$$

μ_f : viscosité dynamique du fluide

U_D : vitesse Darcienne.

$\frac{dP}{dx}$: Gradient de pression

On peut définir celle-ci grâce à la loi de Darcy, (Darcy 1856)

$$Q = kA \frac{\Delta P}{\rho_f g L} = KA \frac{\Delta P}{\mu_f L} \quad (\text{I.24})$$

Avec A section du milieu poreux, $\frac{\Delta P}{L}$ la perte de charge linéique le long du milieu poreux, Q le débit volumique du fluide circulant, K la perméabilité intrinsèque du milieu et k le coefficient de perméabilité (ou conductivité hydraulique) définit comme suite :

$$k = \frac{K \rho_f g}{\mu_f} \quad (\text{I.25})$$

d. Densité

Pour quantifier la masse de fluide transférée lors de l'écoulement, on doit connaître la quantité de masse contenue dans un volume unitaire de fluide, c'est-à-dire la densité.

La densité σ_b d'un matériel représente la quantité de masse M_T que ce matériel contient par unité de volume V_T .

$$\sigma_b = \frac{M_T}{V_T} \quad (\text{I.26})$$

i. Pour un matériau saturé en eau

(Les pores sont occupés par le fluide). Cette relation s'exprime par

$$\varepsilon = \frac{\sigma_s - \sigma_b}{\sigma_s - \sigma_f} \quad (\text{I.27})$$

- σ_s : Densité du solide
- σ_b : Densité globale
- σ_f : Densité globale du fluide

Cette expression permet de déterminer la porosité à partir d'une mesure de la densité globale pour un matériau saturé en eau. [11]

ii. Pour un matériau sec

Dans ce cas les pores sont occupés par de l'air dont la masse est négligeable, alors la densité globale du matériau σ_{sbsec} , et la relation entre la porosité et la densité globale seront :

$$\sigma_{sbsec} = (1 - \varepsilon)\sigma_s \quad (\text{I.28})$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sigma_{sbsec}}{\sigma_s} \quad (\text{I.29})$$

iii. Saturation en eau

Est une propriété décrivant la proportion d'eau dans les pores. Pour un matériel partiellement saturé, on définit la saturation comme le rapport entre le volume d'eau V_w et le volume des pores (vide) V_v [11]

$$S_w = \frac{V_w}{V_v} \quad (\text{I.30})$$

Le volume total des pores est égal à la somme du volume d'eau et du volume d'air contenu dans les pores. Pour caractériser la quantité d'eau contenue dans un matériau poreux, il existe d'autres paramètres que la saturation en eau S_w , si la teneur en eau massique W , définie comme la masse d'eau sur la masse du solide : [11]

$$W = M_w/M_s \quad (\text{I.31})$$

e. Viscosité

La résistance au mouvement d'un fluide sous contrainte de cisaillement exercé par son écoulement décrit une propriété qui est la viscosité.

Dans la pratique tous les fluides sont visqueux, ça veut dire que le mouvement d'une couche fluide par rapport à une autre est toujours ralenti par le frottement.

I.4.5 Transfert thermique dans un milieu poreux

L'équation d'énergie

L'équation de l'énergie (ou les équations de l'énergie selon le concept adopté) traduisant le transfert de chaleur dans le milieu poreux fait appel au concept de milieu continu fictif, équivalent au milieu poreux réel. Afin d'obtenir une description macroscopique des phénomènes de transfert dans un volume élémentaire représentatif de milieu poreux, il faudrait établir l'équation (ou les équations) de transfert de chaleur. Pour cela, on procède à la notion d'équilibre locale. Cette dernière est largement utilisée [20].

$$(\rho_f c)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_f \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} T = \lambda_{\text{eff}} \vec{\nabla}^2 T + q_m''' \quad (\text{I.32})$$

Où

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} = (1 - \varepsilon)(\rho c_p)_s + \varepsilon(\rho c_p)_f \quad (\text{I.33})$$

c_p : Chaleur massique à pression constante

λ_{eff} : Conductivité thermique du milieu poreux.

ρ : Masse volumique du fluide considéré.

ε : Porosité du milieu poreux

$(\rho c_p)_{\text{eff}}$: Capacité calorifique effective.

$(\rho c_p)_s$: Capacité calorifique du solide

$(\rho c_p)_f$: Capacité calorifique du fluide

I.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, le transfert de chaleur par convection, on a défini les différents types de convection (forcée, mixte et naturelle), puis on a expliqué le phénomène de la convection naturelle en milieu poreux, on a pu constater que le transfert de chaleur par convection dépend de la géométrie ainsi que des écarts de température.

Après, on est allé définir les nanofluides, leurs propriétés thermo-physiques (concentration des nanoparticules, conductivité thermique, la viscosité dynamique, la chaleur spécifique et le coefficient d'expansion thermique).

On a conclu que le nanofluide est un fluide caloporteur qui augmente le taux d'échange thermique d'une dizaine de pourcentage comparés à la norme des autres fluides traditionnels. Mais le bilan énergétique reste encore mitigé car ce fluide innovant est une nouvelle technologie dans le domaine de transfert thermique qui est en phase de recherche de ce fait ses paramètres sont encore mal caractérisés.

Les grandes disparités sur l'explication des phénomènes derrière l'amélioration des propriétés thermiques des nanofluides prouvent bien que cette technologie n'est pas encore mature. On s'attend à ce que la recherche dans ce domaine s'intensifie.

Les études effectuées sur les milieux poreux nous ont permis de présenter dans ce chapitre la définition des milieux poreux, ainsi les différentes caractéristiques, et les lois qui gouvernent sur ces milieux.

On a commencé à rappeler les notions fondamentales portant sur les milieux poreux et leurs grandeurs physiques caractéristiques, suivi par les mécanismes de transfert de chaleur et de masse par convection au sein de ce milieu poreux.

Les recherches approfondies sur la convection à double diffusion ont révélé l'une des techniques prometteuses pour améliorer le transfert de chaleur, qui consiste à introduire des particules solides ultrafines dans le fluide caloporteur. Cependant, un vif intérêt est porté pour la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur et de masse de ce fluide innovant, appelé communément nanofluide. Par conséquent dans notre travail nous considérerons l'écoulement de ce fluide innovant (les nanofluides) en convection à double diffusion dans le milieu poreux.

Chapitre II

Problématique et modélisation mathématique

II. Problématique et Modélisation mathématique

II.1 Introduction

Ces dernières années, de nombreux chercheurs et développeurs se sont concentrés sur le refroidissement innovant et l'amélioration du transfert de chaleur dans les processus industriels. L'une des techniques prometteuses pour améliorer le transfert de chaleur dans les systèmes thermiques consiste à introduire de nouveaux constituants dans le fluide pour améliorer la capacité de transfert de chaleur du fluide lui-même. Ce fait a attiré de nombreuses recherches pour étudier les caractéristiques de transfert de chaleur dans ces mélanges colloïdaux obtenus en dispersant des particules de taille nanométrique dans un fluide de base tel que l'eau, l'éthylène ou le propylène glycol. Le terme « nanofluide » a été inventé pour la première fois par Choi [6] pour désigner une nouvelle classe de fluides caloporteurs basés sur la nanotechnologie. Ces mélanges de fluides ont fait l'objet d'une attention considérable en raison de leurs excellentes performances thermiques et de leurs nombreux avantages dans plusieurs applications d'ingénierie Ahmadreza[21], tout en réduisant les problèmes d'érosion, de sédimentation et d'encrassement qui désavantagent les mélanges solide-liquide avec des particules plus grosses Das et al. [22].

Nous présentons dans ce chapitre, le modèle physique et mathématique de problème étudié dans ce mémoire et les équations modélisant le problème (**figure II.1**). Nous établissons les équations gouvernantes de couches limites hydrodynamique, thermique et massique.

Nous exprimons les équations de conservation et les conditions aux limites sous forme adimensionnelle et nous introduisons les principales grandeurs dynamiques et thermiques.

On va étudier l'influence de la variation des propriétés du nanofluide sur l'écoulement thermosolutale en convection naturelle dans un milieu poreux non-Darcy avec l'extension de Forchheimer saturée de nanofluide, par l'exécution d'un programme « Matlab » qui va exécuter ces équations numériques gouvernantes sur ce phénomène amenant à la résolution de notre problématique.

II.2 Revue Bibliographique

Les travaux portant sur l'étude des nanofluide et du transfert de chaleur en convection naturelle dans les nanofluides dans les milieux poreux, sont peu nombreux on peut citer :

DongshengWen, YulongDing [23] Ont traité la formulation de nanofluides à base aqueuse et leur application dans des conditions de transfert de chaleur par convection naturelle. Ils montrent que des nanofluides très stables à base de dioxyde de titane et d'eau ont pu être formulés grâce au mélange par cisaillement mécanique et à la stabilisation électrostatique par le mélange mécanique par cisaillement et la stabilisation électrostatique. Des coefficients de transfert de chaleur transitoires et stables ont été obtenus pour différentes concentrations de nanofluides dans des conditions de convection naturelle. Ils constatent que les nanofluides diminuent le coefficient de transfert thermique par convection naturelle, cette détérioration augmente avec les concentrations de nanoparticules.

S.Chakraborty, P.K.Panigrahi [24] Ont étudié les différents aspects de la stabilité des nanofluides, de leur préparation à leur mise en œuvre dans des applications pratiques. Ils ont accordé une attention à la stabilité des nanofluides en fonction des conditions de fonctionnement (température élevée, pression, confinement, composition, salinité, champ magnétique externe et taux de cisaillement, etc.) dans plusieurs applications (transfert de chaleur, micro fluidique, lubrification, récupération améliorée du pétrole, réduction de la traînée, etc. Ils sont arrivés à donner une revue générale sur les aspects liés à la stabilité des nanofluides, à savoir la classification des nanofluides, les méthodes de synthèse visant à améliorer la stabilité, le mécanisme responsable de la stabilité des nanofluides, les différentes techniques de stabilisation des nanofluides et les méthodes d'évaluation de la stabilité.

G. BACHIR, R. SAWLI, Ch.FAKIH et A.MOJTABI[25] Ont étudié l'intérêt de disperser des nanoparticules dans un fluide pour augmenter le transfert de chaleur en convection naturelle dans la configuration de Rayleigh-Bénard. Il ressort de l'expérimentation numérique que le flux convectif laminaire évacué par un nanofluide dans la configuration de Rayleigh-Bénard augmente avec la concentration volumique en nanoparticules.

D.A. Nield, A.V. Kuznetsov [26] Ils ont étudié analytiquement le début de la convection dans une couche horizontale d'un milieu poreux saturé par un nanofluide. Le modèle utilisé pour le nanofluide incorpore les effets du mouvement brownien et de la thermophorèse. Leur analyse révèle que pour un nanofluide typique (avec un grand nombre de Lewis), l'effet principal des nanofluides est via un effet de flottabilité couplé à la conservation des nanoparticules, la contribution des nanoparticules à l'équation de l'énergie thermique étant un effet de second ordre. Ils ont constaté que le nombre de Rayleigh thermique critique peut être réduit ou augmenté de manière substantielle par la présence des nanoparticules, selon que la distribution de base des nanoparticules est de type

top-heavy ou bottom-heavy. L'instabilité oscillatoire est possible dans le cas d'une distribution de nanoparticules lourde au fond.

Saeid [27] a étudié l'écoulement en convection mixte, laminaire le long d'une plaque verticale à une température en régime d'oscillation périodique. Le fluide est newtonien et incompressible avec des propriétés constantes sauf dans le terme de gravité où il adopte l'hypothèse de Boussinesq et néglige la dissipation visqueuse. L'écoulement est laminaire et en régime transitoire. Les équations du bilan dynamique et thermique sont approchées par des couches limites bidimensionnelles. Les équations sont discrétisées et résolues à l'aide de la méthode numérique aux différences finies. Le calcul est effectué pour l'air ($Pr=0.72$) et l'eau ($Pr=7.0$). La comparaison du nombre de Nusselt et le coefficient de frottement avec des résultats antérieurs sont satisfaisants. Les variations périodiques du nombre de Nusselt et du coefficient de frottement sont effectuées pour différentes amplitudes et fréquences de la température de plaque.

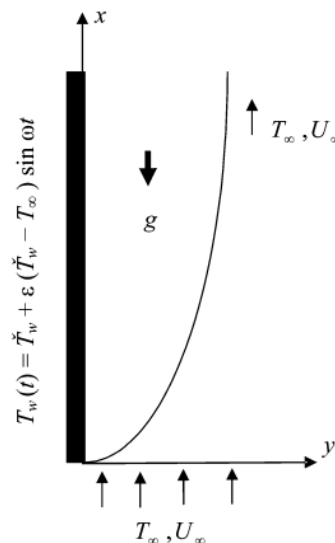


Figure II.1: Modèle étudié par Saeid [27]

H.Ali Pakravan, M.Yaghoubi [28] ont étudié les effets du mouvement brownien, de la thermophorèse et de Dufour pour le transfert de chaleur par convection naturelle théoriquement en les comparant à diverses études expérimentales et théoriques. Leur article n'étudie que les phénomènes diffusifs et leur influence sur le comportement du taux de transfert de chaleur des nanofluides. Par la comparaison entre les données expérimentales et les valeurs estimées du nombre de Nusselt ils sont arrivés à montrer l'importance de la thermophorèse et des effets Dufour dans la convection naturelle des nanofluides. Ainsi que, Le nombre de Nusselt de Dufour est indépendant de la géométrie et dépend du type de nanofluides et des propriétés thermo physiques du

fluide de base et des nanoparticules, de la fraction volumique, de la température et du diamètre des nanoparticules. Ils ont déduit que le nombre de Nusselt de la convection naturelle des nanofluides diminue linéairement avec le diamètre des particules, Et diminue avec la fraction volumique des nanoparticules pour une fraction volumique commune dans les nanofluides (jusqu'à 50%). Il est également montré que les effets de Dufour diminuent fortement avec la température. Par conséquent, le nombre de Nusselt de la convection naturelle des nanofluides augmente avec la température moyenne du mélange.

D.Srinivasa et G.Swamy [29] 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.

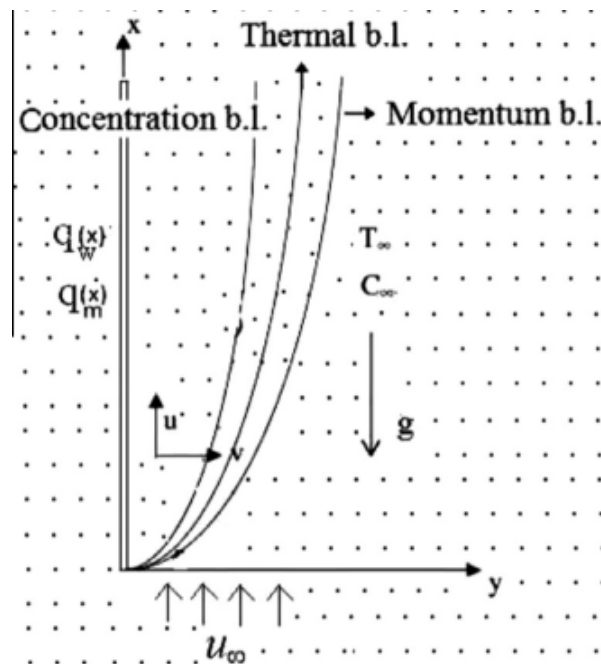


Figure II.2: Modèle étudié par D.Srinivasa et G.Swamy [29]

Amahmid et al[30] On étudie analytiquement et numériquement la convection naturelle thermosolutale dans une couche poreuse verticale soumise à des flux de chaleur et de masse uniformes. Et pour cela ils ont utilisé le modèle de Brinkman et ont considéré la situation particulière où les forces de volume thermiques et solutales sont opposées et de même intensité. Une solution analytique basée sur l'hypothèse d'un écoulement parallèle, est développée pour des rapports de forme A de la matrice poreuse suffisamment élevés. Les nombres de Rayleigh critiques au de la desquels les mouvements convectifs sont possibles sont déterminés analytiquement en

fonction des nombres de Lewis Leet de Darcy Da . Les résultats présentés couvrent les gammes suivantes : $0 < RT < 103$, $0 < Le < 103$ et $0 < Da < 10$. Les résultats du modèle de Darcy et ceux du milieu fluide ($Pr \geq 0.5$) sont correctement prédits par le modèle de Brinkman respectivement pour les faibles et grands nombres de Darcy Da . L'étude numérique n'a permis d'obtenir que les solutions monocellulaires malgré la multiplicité des solutions démontrée analytiquement.

Khair et Bejan[31] ont considéré le phénomène de la convection thermosolutale qui survient au voisinage d'une plaque verticale plongée dans un milieu poreux saturé par un fluide. Une analyse d'échelle a permis d'identifier quatre régimes possibles de convection selon les valeurs des forces de volume N et le nombre de Lewis Le .

A.M. Rashad, et al.[32]: Une analyse a été réalisée pour étudier l'effet de la vitesse de filtration uniforme sur la convection libre dans la couche limite d'un fluide non-newtonien sur un cône vertical perméable immergé dans un milieu poreux saturé d'un nanofluide. Le modèle utilisé pour la nanofluide comporte les effets du mouvement Brownien et thermophorèse. Les équations aux dérivées partielles régissant sont transformées en un ensemble d'équations non similaires et résolues numériquement par une méthode itérative, méthode des différences finies implicite. Une étude paramétrique des paramètres physiques est effectuée et un ensemble représentatif des résultats numériques pour la vitesse, la température et les profils de fraction de volume, ainsi que les numéros de Nusselt et de Sherwood locales est illustrée graphiquement pour montrer des caractéristiques intéressantes des solutions.

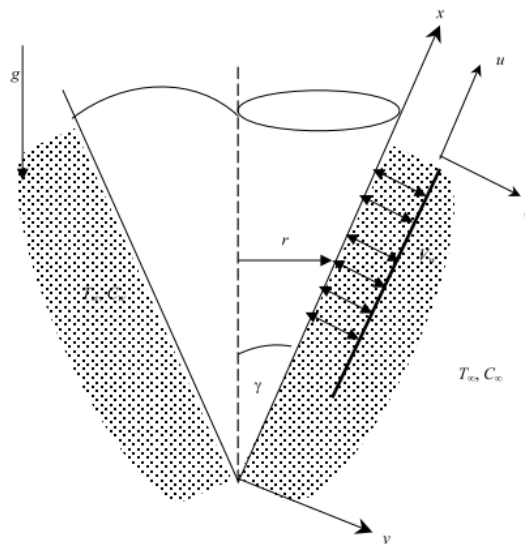


Figure II.3: Modèle étudié par A.M. Rashad, et al. [32]

Khan et Aziz [33] ont étudié numériquement la convection double-diffusive libre d'une plaque verticale à un milieu poreux saturé avec un fluide de base binaire contenant des nanoparticules. Ce travail a étendu le travail de Nield et Kuznetsov où les flux de nanoparticules spécifiés et la surface verticale ont un soluté thermique comme fonction de loi de puissance de la distance le long de la surface. Les résultats ont montré que le nombre réduit de nanoparticules de Sherwood était significativement plus élevé pour la double diffusion dans les nanofluides réguliers que dans la forme-diffusion dans les nanofluides réguliers ; Et dans les deux cas, il augmente à mesure que la concentration de soluté sans dimension exponentielle augmente, Et le nombre réduit de nanoparticules de Sherwood dépendait en grande partie du processus de diffusion (mono ou double) et peu affecté par le fluide (régulier ou nano).

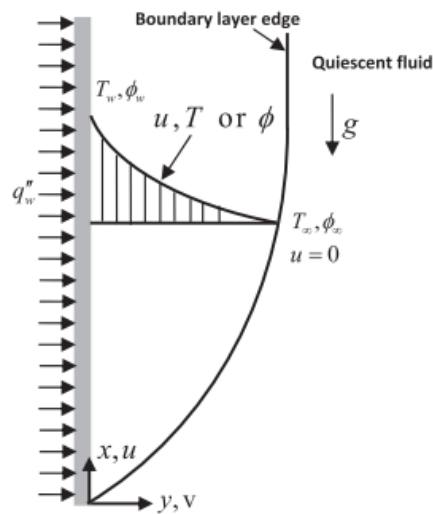


Figure II.4: Modél étudié par Khan et Aziz [33]

W. J. MINKOWYCZ [34] :Une analyse est faite pour la convection libre régulière autour d'une plaque plate verticale noyée dans un milieu poreux saturé à des nombres de Rayleigh élevés. Dans le cadre des approximations de la couche limite, des solutions de similitude sont obtenues pour une classe de problèmes où la température de la paroi varie comme x^{-n} , c'est-à-dire une fonction de puissance de la distance de l'origine où la température de la paroi commence à s'écarter de celle des fluides environnants. Des expressions analytiques sont obtenues pour l'épaisseur de la couche limite, le flux thermique de surface local et global, et les coefficients de transfert thermique local et moyen. L'application au transfert de chaleur par convection autour d'une digue isotherme intrudée dans un aquifère est discutée.

A.Mahdy, Sameh,E.Ahmed [35] Ont étudié Le problème de la convection naturelle d'un nanofluide le long d'un milieu poreux saturé à surface ondulée verticale. Le modèle utilisé pour le nanofluide incorpore les effets du mouvement brownien et de la thermophorèse. Les équations gouvernantes ont été obtenues et transformées en une forme non-similaire. Les équations non similaires ont été résolues numériquement par une méthode Runge-Kutta du quatrième ordre avec technique de tir. Ils sont arrivés à déduireque Lorsque le rapport amplitude-longueur d'onde augmente l'amplitude du nombre de Nusselt local et du nombre de Sherwood local, Les taux de transfert de chaleur et de masse diminuent en augmentant soit le nombre de rapport de flottabilité, soit le paramètre de thermophorèse. Ainsi que L'augmentation des valeurs du paramètre du mouvement brownien conduit à l'augmentation du Nusselt local alors que le nombre de Sherwood local prend le comportement opposé. Et Lorsque le nombre de Lewis augmente, l'épaisseur de la couche limite de concentration diminue, alors que le nombre de Sherwood local augmente.

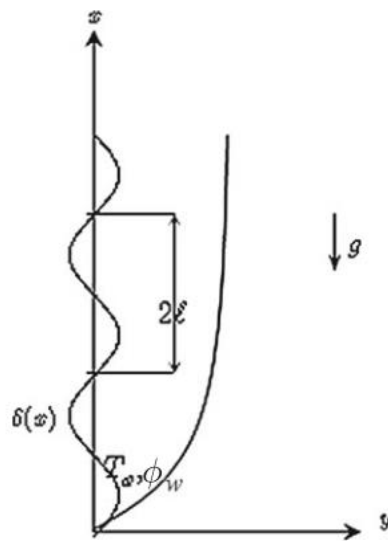


Figure II.5: Modèle étudié par A. Mahdy, Sameh, E. Ahmed [35]

W. A KHAN et A. AZIZ [36] ont étudié numériquement l'écoulement par convection naturelle d'un nanofluide sur une plaque verticale avec un flux thermique de surface constant, en suivant une analyse de similarité des équations de transport. Le modèle de transport utilisé inclut l'effet du mouvement brownien et de la thermophorèse. L'analyse montre que les profils de vitesse, de température et de concentration dans les couches limites respectives dépendent, en plus des nombres de Prandtl et de Lewis, de trois paramètres supplémentaires sans dimension, à savoir un paramètre de mouvement brownien N_b , un paramètre de thermophorèse N_t , un paramètre de rapport de flottabilité N_r . En plus de l'étude de ces paramètres sur les caractéristiques d'écoulement de la couche limite (vitesse, température, concentration de nanoparticules, frottement de peau et transfert

de chaleur), des corrélations pour les nombres de Nusselt et de Sherwood ont été développées sur la base d'une analyse de régression des données.

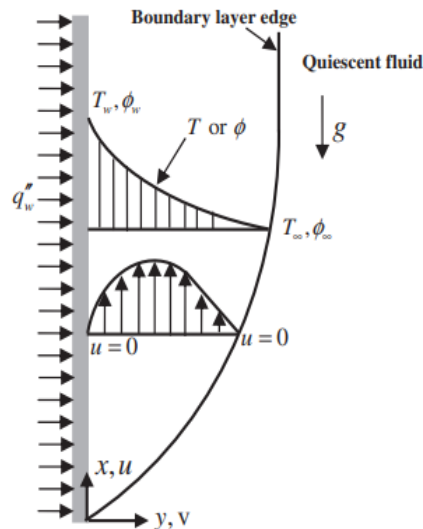


Figure II.6: Modèle étudié par W. A KHAN et A. AZIZ [36]

D.A Nield, A.V Kuznetsov [37] Ils ont examiné l'influence des nanoparticules sur l'écoulement de la couche limite en convection naturelle le long d'une plaque verticale, en utilisant un modèle dans lequel le mouvement brownien et la thermophorèse sont pris en compte. Ils ont supposé les conditions aux limites les plus simples possibles, à savoir celles dans lesquelles la température et la fraction de nanoparticules sont constantes le long de la paroi. Cela permet une solution de similarité simple qui dépend de neuf paramètres sans dimension, à savoir un nombre de Prandtl Pr , un nombre de Lewis régulier Le , un nombre de Lewis de nanofluide Ln , un nombre de Lewis de Dufour-solutal Ld , un paramètre de rapport de flottabilité de nanofluide Nr , un paramètre de mouvement brownien Nb , un paramètre de thermophorèse Nt , un paramètre de flottabilité régulière à double diffusion Nc , et un paramètre de Dufour modifié Nd . Ils ont exploré la manière dont le flux thermique de la paroi, représenté par un nombre de Nusselt Nu et ensuite mis à l'échelle en termes de $Rax^{1/4}$ pour produire un nombre de Nusselt réduit, dépend de ces neuf paramètres. Leur principal résultat est que le nombre de Nusselt réduit est une fonction décroissante de chacun des nombres de nanofluides Nr , Nb et Nt et du paramètre Dufour modifié Nd . La variation du rapport de flottabilité régulière Nc peut produire un changement de Nur dans les deux sens. Dans chaque cas, la quantité de changement dépend des valeurs de Pr , Le , Ln et Ld .

NOGHREHABADI, A. BEHSERESHT, M. GHALAMBAZ [38] Ont analysé le transfert de chaleur et de masse en convection naturelle de nanofluides sur une plaque verticale noyée dans un

milieu poreux saturé de Darcy soumis à des flux de chaleur de surface et de nanoparticules. Pour réaliser la solution numérique, ils ont effectué deux étapes. Les équations différentielles partielles sont d'abord simplifiées en un ensemble d'équations différentielles ordinaires non linéaires fortement couplées par des variables de similitude appropriées, puis résolues numériquement par la méthode des différences finies. La solution de similitude obtenue dépend de quatre paramètres non dimensionnels, à savoir le paramètre de mouvement brownien (N_b), le rapport de flottabilité (N_r), le paramètre de thermophorèse (N_t) et le nombre de Lewis (Le). Les résultats de la simulation montrent que l'augmentation de N_b , N_t ou N_r diminue le nombre de Nusselt réduit. Une augmentation du nombre de Lewis augmente à la fois le nombre de Nusselt réduit et le nombre de Sherwood. Les résultats révèlent également que l'épaisseur de la couche limite de concentration des nanoparticules est beaucoup plus fine que celle des couches limites thermique et hydrodynamique.

R.Subba, R. Gorla et A. Chamkha [39] ils ont présenté une analyse de la couche limite pour la convection naturelle le long d'une plaque verticale non isotherme dans un milieu poreux saturé avec un nanofluide. Les résultats indiquent que lorsque N_r et N_t augmentent, le facteur de friction augmente, tandis que le taux de transfert de chaleur (nombre de Nusselt) et le taux de transfert de masse (nombre de Sherwood) diminuent. Lorsque N_b augmente, le facteur de friction et les taux de transfert de masse en surface augmentent, tandis que le taux de transfert de chaleur en surface diminue. Plus Le augmente, plus les taux de transfert de chaleur et de masse augmentent. Lorsque l'exposant de la loi de puissance λ augmente, les taux de transfert de chaleur et de masse augmentent.

M.Ghalambaz, A.Noghrehabadi et A. Ghanbarzadeh [40] : Dans cet article, l'écoulement par convection naturelle de nanofluides sur une plaque verticale chauffée par convection dans un milieu poreux saturé de Darcy est étudié numériquement. Les équations gouvernantes sont transformées en un ensemble d'équations différentielles ordinaires en utilisant des variables de similarité appropriées, et elles sont résolues numériquement en utilisant la méthode Runge-Kutta du quatrième ordre associée à la méthode Gauss-Newton. Les résultats montrent que l'épaisseur des profils de concentration est beaucoup plus faible que celle des profils de température et de vitesse. Pour de faibles valeurs du paramètre de chauffage convectif N_c , lorsque le paramètre de mouvement brownien augmente, la température non dimensionnelle de la paroi augmente. Cependant, pour des valeurs élevées de N_c , l'effet du paramètre de mouvement brownien sur la température non dimensionnelle de la paroi n'est pas significatif. Lorsque le paramètre de mouvement brownien augmente, le nombre de Sherwood réduit augmente et le nombre de Nusselt réduit diminue.

D. Srinivasacharya, O.Surender[41] ont étudié les effets de stratification thermique et de la masse sur la couche limite en convection naturelle devant une plaque verticale immergée dans un milieu poreux saturé d'un nanofluide. La température, la concentration et la fraction volumique de nanoparticule à la plaque sont maintenues uniformes et constantes. Le modèle utilisé pour nanofluides comporte les effets du mouvement Brownien et la thermophorèse. Le système d'équations différentielles partielles non linéaires est résolu à l'aide de la méthode de Killer-box. Ils ont démontré l'influence de paramètres de contrôles sur l'écoulement, le transfert thermique et massique

Noghrehabadi, M.Ghalambaz A. Ghanbarzadeh [42] : Une approche combinée de similarité et numérique est adoptée pour étudier théoriquement l'effet de paramètres variables de viscosité et de conductivité thermique sur le transfert de chaleur par convection naturelle d'une plaque verticale noyée dans un milieu poreux saturé d'un nanofluide. Dans la modélisation du nanofluide, les effets dynamiques des nanoparticules, la thermophorèse et le mouvement brownien, ont été pris en compte. Les effets des paramètres variables de viscosité et de conductivité thermique sur les profils de vitesse, de température et de concentration, ainsi que sur les nombres réduits de Nusselt et de Sherwood, sont analysés. Les résultats montrent que la plage du nombre de Lewis ainsi que les paramètres du mouvement brownien et de la thermophorèse qui ont été utilisés dans les études précédentes doivent être reconsidérés. L'effet des paramètres non dimensionnels sur la couche limite est examiné. Les résultats montrent que le nombre de Nusselt réduit augmente avec l'augmentation du paramètre de viscosité et diminue avec l'augmentation du paramètre de conductivité thermique. Ils ont conclu que le gradient de concentration des nanoparticules (en raison des forces de thermophorèse et de mouvement brownien) affecte la viscosité locale et la conductivité thermique des nanofluides et par conséquent le transfert de chaleur des nanofluides.

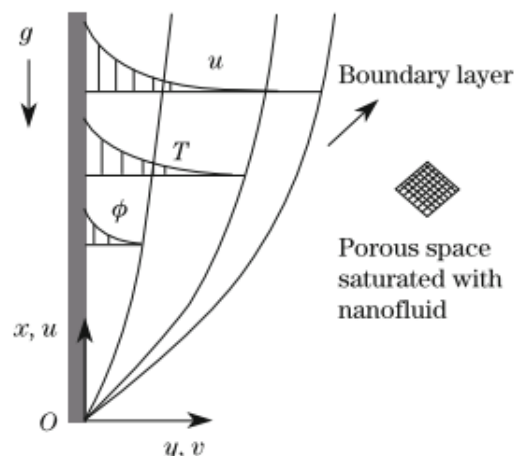


Figure II.7: Modèle étudié par Noghrehabadi, M. Ghalambaz A. Ghanbarzadeh [42]

H.ALI AGHA, M.N. BOUAZIZ [43] ont examiné les effets de la double diffusion et la condition à la limite convective sur la convection naturelle dans un milieu poreux saturé par un nanofluide adjacent à une plaque semi infinie verticale. Ils ont pris en compte Les effets d'inertie et le modèle de Buongiorno a été utilisé. Ils Ont constaté que le mouvement Brownien et la thermophorèse sont des paramètres clés pour étudier l'effet des nanoparticules sur les champs d'écoulement, la température et la distribution de masse. Il est intéressant de noter que l'impact de la condition à la limite convective en présence de diffusion doublé a un effet variable sur les profils d'écoulement, de température et de masse ainsi que de l'épaisseur de la couche limite dynamique, thermique et massique.

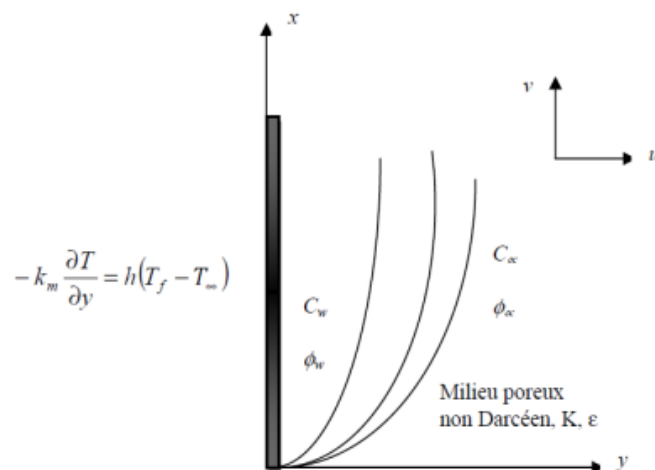


Figure II.8: Modèle étudié par H.ALI AGHA, M.N. BOUAZIZ [43]

Il est bien connu que les caractéristiques du fluide peuvent varier avec la température. Il est donc nécessaire de prendre en compte la viscosité et la conductivité thermique du fluide pour pouvoir prédire avec exactitude les caractéristiques d'écoulement, le transfert de chaleur et de masse du fluide [44, 45]. L'étude de la littérature existante sur les nanofluides révèle que la viscosité ainsi que la conductivité thermique du nanofluide sont considérées comme des propriétés variables et varient fortement avec la fraction volumique des nanoparticules plutôt que la température [46, 47].

Toutefois, à la connaissance des auteurs, aucun travail n'a été consacré aux effets combinés de la viscosité et de la conductivité variables sous des conditions de paroi non uniformes. Ainsi, l'amélioration de la fluidité et du transfert de chaleur nécessite une meilleure compréhension de la zone de la couche limite le long d'une plaque verticale semi-infinie incrustée dans un milieu poreux non-Darcy avec l'extension de Forchheimer saturée de nanofluide. Cela a motivé le travail en cour à

étudier les effets des mécanismes du mouvement brownien et de la thermophorèse, selon les mécanismes dominants de Buongiorno [48] sur la structure de l'écoulement et les caractéristiques de transfert de chaleur et de masse. Des analyses de l'évolution des différents profils ont permis de montrer l'influence de l'effet de différents paramètres de contrôle et une étude du taux de transfert de chaleur et de masse en termes de nombre de Nusselt et de Sherwood est réalisée.

II.3 Modèle physique

En considère un problème à deux dimensions, d'un écoulement thermosolutal en convection naturelle le long d'une plaque verticale semi-infinie immergée dans un milieu poreux non Darcéen saturé d'un nanofluide, l'écoulement est supposé dans la direction x, et l'axe y coïncide avec la normale à la plaque, le modèle physique et le système de coordonnées sont représentés sur la figure (1). La surface de la plaque (y=0) est en contact avec un fluide chaud caractérisé par une température T_f qui fournit un coefficient de transfert de chaleur h , la fraction volumique des nanoparticules ϕ est ϕ_w . Les valeurs ambiantes (y tend vers l'infini), pour la température T et la fraction volumique ϕ sont désignées par T_∞ et ϕ_∞ respectivement. En outre, la variation de la viscosité et la conductivité, le mouvement Brownien et la thermophorèse sont incorporés. Le modèle de Darcy-Forchheimer est supposé validé. L'équilibre thermique local dans le milieu poreux homogène est également supposé.

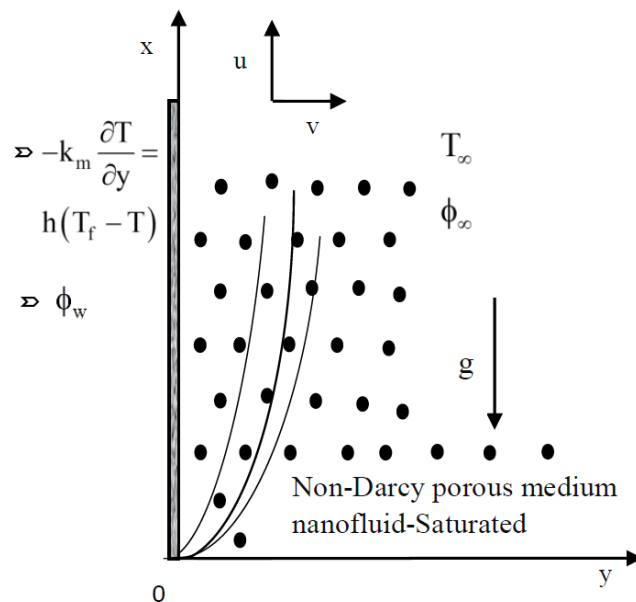


Figure II.9: Géométrie du problème

II.4 Hypothèses simplificatrices

- L'écoulement est laminaire, permanent, bidimensionnel (x, y) et axisymétrique
- Le fluide étudié est un fluide newtonien et incompressible.
- Les transferts par rayonnement sont négligeables.
- Le milieuporeux est isotrope et homogène.
- La dissipation visqueuse est négligée dans l'équation de l'énergie.
- Les propriétés thermo physique du fluide ($\mu, \beta_T, \lambda, C_p$) sont supposé constantes.
- L'approximation d'Oberbeck-Boussinesq et la couche limite pour le nanofluide sont supposées validées. L'équilibre thermique local dans le milieu poreux homogène est également supposé. Il y'a uniquement l'effet du mouvement Brownien et la thermophorèse qui interviennent dans cette configuration.

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

II.5 Équations mathématiques

Les équations gouvernantes pour la couche limite, s'écrivent comme suit :

II.5.1 Équations dimensionnelles

a. Équation de continuité

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

b. Équation du mouvement

Selon x :

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

Selon y :

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

c. Équation d'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{(\rho c_p)_{nf}} \frac{\partial}{\partial y} \left(k_m(\phi) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \tau \left[D_B \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \left(\frac{D_T}{T_\infty} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (\text{II.4})$$

d. Équation de la fraction volumique

$$\frac{1}{\varphi} \left(u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = D_B \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \left(\frac{D_T}{T_\infty} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (\text{II.5})$$

Ici, p est la pression, u et v , les composantes de vitesse de Darcy, T la température et ϕ la fraction volumique de nanoparticules. Les paramètres physiques sont notés K la perméabilité de milieu poreux avec la porosité φ , ρ_f la masse volumique, β_T le coefficient d'expansion thermique de fluide de base, 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. $\tau = \varphi(\rho c)_p / (\rho c)_f$ Est le rapport de la capacité thermique du nanofluide. Le coefficient de diffusion Brownienne est noté par D_B , le coefficient de diffusion thermo-phorétique D_T .

II.5.2 Condition aux limites

Les conditions aux limites pour les équations ci-dessus sont :

$$y = 0: \quad v = 0, \quad -k_m \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_f - T), \quad \phi = \phi_w \quad (\text{II.6})$$

$$y \rightarrow \infty: \quad v = u = 0, \quad T \rightarrow T_\infty, \quad \phi \rightarrow \phi_\infty \quad (\text{II.7})$$

Dans la présente étude, la conductivité thermique et la viscosité du nanofluide sont considérées en fonction de la fraction volumique locale des nanoparticules. Pour atteindre cet objectif, la viscosité du nanofluide et la conductivité thermique sont supposées être une fonction réciproque et linéaire de la fraction volumique locale des nanoparticules [42]. Par conséquent, la viscosité peut être écrite comme

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_\infty} (1 + \gamma(\phi - \phi_\infty)) \quad (\text{II.8})$$

L'équation (8) peut être encore simplifiée comme

$$\frac{1}{\mu} = m_\mu (\phi - \phi_r) \quad (\text{II.9})$$

Où m_μ et ϕ_r donnés par

$$m_\mu = \frac{\gamma}{\mu_\infty}, \quad \phi_r = \phi_\infty - \frac{1}{\gamma} \quad (\text{II.10})$$

Dans les équations. (II.9) et (II.10) $\gamma, \mu_\infty, m_\mu,$ et ϕ_r sont des constants.

De plus, la conductivité thermique dépendante de la fraction volumique des nanoparticules est introduite

$$k_m(\phi) = k_{m,\infty} (1 + m_k (\phi - \phi_\infty)) \quad (\text{II.11})$$

Où $m_k = \frac{Nc}{(\phi_w - \phi_\infty)}$ et Nc est le paramètre de conductivité thermique variable, $k_{m,\infty}$ est la conductivité thermique effective.

II.5.3 Équations adimensionnelles

On peut introduire une fonction de flux défini par ψ :

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (\text{II.12})$$

En utilisant les transformations adimensionnelles suivantes :

$$s(\eta) = \frac{\psi(\eta)}{\alpha_m Ra_x^{1/2}}, \quad \theta(\eta) = \frac{T - T_\infty}{T_f - T_\infty}, \quad f(\eta) = \frac{\phi - \phi_\infty}{\phi_w - \phi_\infty} \quad (\text{II.13})$$

Où Ra_x le nombre de Rayleigh local définit par :

$$Ra_x = \frac{(1 - \phi_\infty) \rho_{f_\infty} K g \beta_T (T_f - T_\infty) x}{\alpha_m \mu} \quad (\text{II.14})$$

Et η la variable de similitude :

$$\eta = \frac{y}{x} Ra_x^{1/2} \quad (\text{II.15})$$

Les équations (II.1-II.5) avec les variables de similarité ci-dessus, nous obtenons le système d'équations différentielles ordinaires suivant :

$$Nv(Nv - f) \cdot s'' + Nv \cdot s' f' + (Nv - f)^2 2.Fo \cdot s' s'' - (Nv - f)^2 [\theta' - Nr \cdot f'] = 0 \quad (\text{II.16})$$

$$(1 + Nc \cdot f) \theta'' + \frac{1}{2} \cdot s \theta' + Nc \cdot \theta' f' + Nb \cdot f' \theta' + Nt \cdot (\theta')^2 = 0 \quad (\text{II.17})$$

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

Nr : est le taux de flottabilité $Nr = (\rho_p - \rho_{f\infty})(\phi_w - \phi_\infty)/(1 - \phi_\infty)\rho_{f\infty}\beta_T(T_f - T_\infty)$.

Nb :est le paramètre de mouvement Brownien $Nb = \tau D_B(\phi_w - \phi_\infty)/\alpha_m$.

Nt :est le paramètre de thermophorèse $Nt = \tau D_T(T_f - T_\infty)/\alpha_m T_\infty$.

Le : est le nombre de Lewis pour les nanoparticules $Le = \alpha_m/\varphi D_B$.

Fo : représente le paramètre de Non-Darcéen $FO = c_f \sqrt{K} \alpha_m Ra_x / \nu x$.

Nv :paramètre de la variable de la viscosité $Nv = \phi_r - \phi_\infty / \phi_w - \phi_\infty$

Nc : paramètre de la variable de la conductivité.

II.5.4 Conditions aux limites

Les équations (II.16) à (II.18) sont résolues sous réserve des conditions aux limites suivantes :

Pour: $\eta = 0 : s(0) = 0, \theta'(0) = -H(1 - \theta(0)), f(0) = 1$ (II.19)

$$\eta \rightarrow \infty : s'(\infty) = \theta(\infty) = f(\infty) = 0 \quad (\text{II.20})$$

II.5.5 Détermination de nombre de Nusselt et Sherwood

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

$$Nu_x = \frac{xq_w}{k_m(T_f - T_\infty)} \quad (\text{II.21})$$

Ou q_w est le flux de chaleur de la paroi et k_m est la conductivité thermique du milieu poreux.

On a:
$$q_w = -k_m \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=0} \quad (\text{II.22})$$

Et pour le nombre de Sherwood est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser le transfert de masse définis par :

$$Sh_x = \frac{xq'_w}{D_B(\phi_w - \phi_\infty)} \quad (\text{II.23})$$

q'_w : est le flux massique à la surfacique.

En utilisant les variables adimensionnelles, on obtient :

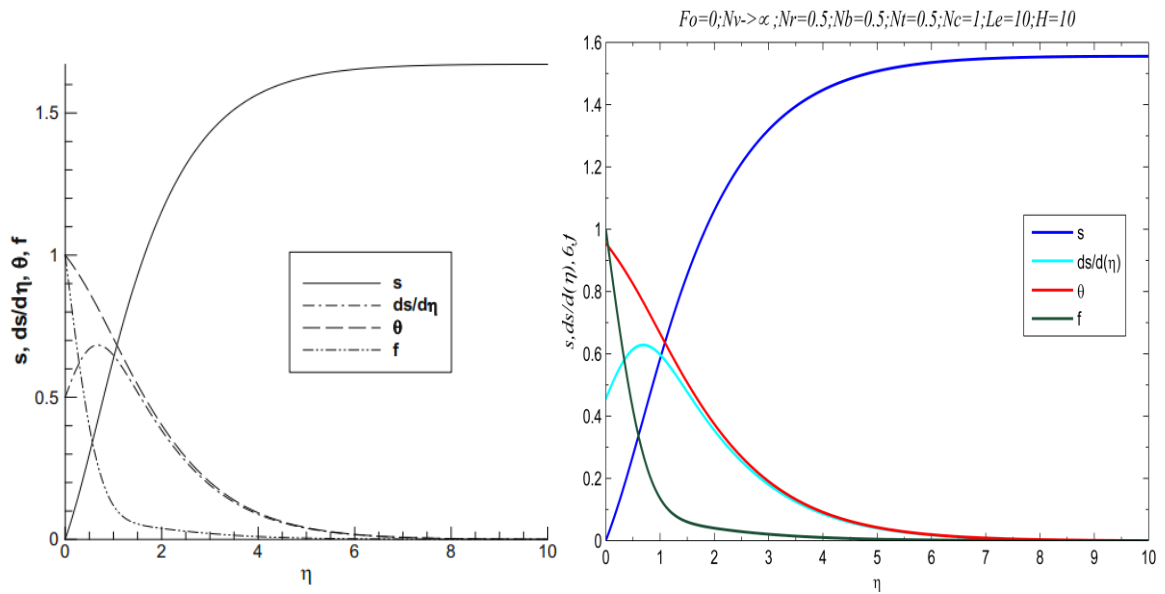
$$\frac{Nu_x}{Ra_x^{1/2}} = -\theta'(0), \quad \frac{Sh_x}{Ra_x^{1/2}} = -f'(0) \quad (\text{II.24})$$

II.6 Méthode numérique

L'ensemble d'équations différentielles ordinaires couplées (II.16) - (II.18) sont fortement non linéaires et ne peut être résolu analytiquement, avec les conditions aux limites (II.19-II.20), ils forment un problème aux limites à deux points qui peut être résolu pour certaines valeurs des paramètres qui le régissant. La méthode des différences finies qui implémente la formule de Lobatto à trois étapes de collocation (III.A) et le polynôme de collocation fournit une solution continue qui est du quatrième ordre en précision, de manière uniforme dans l'intervalle d'intégration. La sélection du maillage et l'erreur de contrôle sont basés sur le résidu de la solution en continu. La technique de collocation utilise un maillage de points pour diviser l'intervalle en sous-intervalles d'intégration. Le solveur bvp4c détermine une solution numérique en résolvant un système d'équations algébriques résultant avec les conditions aux limites, et les conditions de collocation imposées sur tous les sous-intervalles. Le solveur estime alors l'erreur de la solution numérique sur chaque sous-intervalle. Si la solution ne satisfait pas aux critères de tolérance, le solveur adapte le maillage et répète le processus. L'utilisateur doit fournir les points du maillage initial ainsi qu'une approximation initiale de la solution aux points de maillage.

II.6.1 Validation de programme

La validation de la méthode utilisée est vérifiée, par la comparaison des résultats numériques correspondants avec ceux obtenus par Noghrehabadi et al [42] via le nombre de Nusselt (tableau 1). Ainsi qu'une comparaison de profils de vitesse, température et fraction volumique des nanoparticules avec les résultats obtenus par Nield et Kuznetsov[49]. Il ressort de ce tableau et la figure que les résultats actuels sont en bon accord avec ceux rapportés par les travaux cités.



Nield et Kuznetsov[49]

Présent travail

Figure II.2 : Comparaison de profils de vitesse, température et fraction volumique des nanoparticules avec les résultats obtenus par Nield et Kuznetsov [49].

Nt	Nb	Nr	Nc	Fo	H	Nv	Noghrehabadi et al [17]		Présent travail	
							Le=1000	Le=2000	Le=1000	Le=2000
10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	→∞	0	→∞	0	0.4438	0.4438	0.4439	0.4439
						0.25	0.3569	0.3564	0.3569	0.3564
						0.5	0.2986	0.2978	0.2986	0.2978
						1	0.2253	0.2243	0.2253	0.2243
Nc	Nb	Nr	Nv	Fo	H	Nt	Noghrehabadi et al [17]		Présent travail	
							Le=1000	Le=2000	Le=1000	Le=2000
0	10 ⁻⁴	10 ⁻²	→∞	0	→∞	10 ⁻⁹	0.4437	0.4438	0.4438	0.4438
						10 ⁻⁸	0.4437	0.4438	0.4438	0.4438
						10 ⁻⁷	0.4437	0.4438	0.4438	0.4438
						10 ⁻⁶	0.4437	0.4438	0.4438	0.4438
						10 ⁻⁵	0.4437	0.4438	0.4438	0.4438

Tableau II.1 : Comparaison entre les résultats obtenus par Noghrehabadi et al[42], et le présent travail.

II.7 Conclusion

Chapitre II **Problématique et modélisation mathématique**

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différentes équations de conservation régissant sur le transfert en convection naturelle d'un nanofluide dans un milieu poreux, avec la description du problème physique.

Une fois les équations régissant le problème posées, avec les conditions aux limites associées, et mises sous leurs formes adimensionnelles à l'aide de la méthode de similarité, nous avons donc opté pour une résolution numérique, en utilisant Matlab, la méthode utilisée est la méthode de D.F avec lobatto et bvp4c emballer dans le Matlab.

Chapitre III

Résultats et discussions

III. Résultats et discussions

III.1 Introduction

L'étude effectuée dans le but de résoudre les équations décrite précédemment, ont mené à un ensemble de résultats, basé sur la méthode de résolution explicite auparavant, avec l'utilisation de Matlab et la méthode des différences finies.

Des graphes et des tableaux représentent l'influence de paramètre de Forchheimer Fo , de mouvement Brownien Nb , de la thermophorèse Nt , de Lewis Le , de paramètre convectif H , de taux de flottabilité Nr , de la variable conductivité Nc et de la variable de viscosité Nv , sur les profils de température, de vitesse, et de fraction volumique, ainsi que sur le taux de transfert de chaleur et de masse.

Les valeurs prises pour les paramètres fixes sont basées sur les valeurs décrites par Buongiorno [48], pour les nanofluides à base de l'eau et à température ambiante, avec des nanoparticules de 1-100 nm de diamètre.

III.2 Conclusion

Dans le présent chapitre, on a étudié l'influence des différents paramètres du nanofluide sur le transfert de chaleur et de masse d'un écoulement adjacent d'une paroi plane verticale, en convection naturelle, immergée dans un milieu poreux non Darcéen. Les effets d'inertie sont pris en compte et le modèle de Buongiorno a été utilisé.

Les résultats obtenus par cette étude sont présentés sous forme de graphes et des tableaux, Les conclusions suivantes sont tirées :

- ✓ Le paramètre de Forchheimer joue un rôle important dans la diminution de la vitesse près de la plaque, le taux de transfert de chaleur et le taux de transfert de masse, par contre il fait accroître la température ainsi que la fraction volumique
- ✓ L'augmentation de la variable de la conductivité N_c provoque l'augmentation de la vitesse, la température et le nombre de Sherwood réduit, et elle fait décroître la fraction volumique, ainsi que le nombre de Nusselt réduit. (N_c) augmente l'épaisseur de la couche limite thermique. Cependant, l'épaisseur de la couche limite solutale se détériore avec l'augmentation des valeurs de (N_c) .
- ✓ L'augmentation de paramètre de la variable viscosité N_v et le paramètre de mouvement Brownien, font améliorer la vitesse, le taux de transfert de chaleur, le taux de transfert de masse, et réduisent la température et la fraction volumique.
- ✓ L'augmentation du paramètre N_r , décélère le profil de vitesse, et augmente la température et la fraction volumique.
- ✓ L'augmentation de H , augmente la vitesse, la température et diminue la fraction volumique.
- ✓ Le nombre de Lewis Le , son augmentation implique une augmentation de la vitesse et une décroissance de la température et de la fraction volumique.
- ✓ Le paramètre de la thermophorèse avec son amélioration, améliore la température et la fraction, par contre il diminue les nombres de Nusselt et Sherwood réduits.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Le processus de transfert de chaleur dans les fluides a été exploité dans de nombreuses applications pratiques et industrielles telles que le transport, les alimentations énergétiques, la climatisation et le refroidissement électronique. L'ajout des particules nanométriques dans un fluide (appelé alors nanofluide) tels que des particules d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), l'oxyde de cuivre (CuO), le cuivre (Cu) ou les nanotubes de carbone dans l'eau modifient rapidement la conductivité thermique du liquide porteur, générant de la chaleur par rapport à l'état pur du corps (eau), en modifiant de manière significative la conductivité thermique du fluide porteur.

La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le mouvement macroscopique de la matière dû à une différence de température, dans un milieu fluide (liquide ou gaz) ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement.

L'invention des nanofluides a mené vers leurs utilisations dans plusieurs domaines tel que la géothermie, ce qui incité plusieurs recherches sur l'effet de ces nanofluides sur le transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux, et essayer de trouver des solutions pour améliorer ses transferts.

Après avoir cité quelques généralités sur le transfert de chaleur par convection, les nanofluides, et les milieux poreux, on a fait une recherche bibliographique ou on a cité les différents travaux et recherche effectués dans ce domaine.

Les équations de conservation de la quantité de mouvement, de conservation de masse, et conservation de l'énergie ont été posées, et mises sous leurs formes adimensionnelles avec les conditions aux limites associées. Le modèle physique de notre étude qui est basé sur l'étude numérique de l'influence des paramètres du nanofluide sur le transfert de chaleur et masse lors d'un écoulement en convection thermosolutale, au voisinage d'une plaque verticale semi-infinie avec un flux de chaleur variable a été présenté dans le chapitre II, on a continué par l'élaboration d'un programme Matlab basé sur la méthode de Bvp4c, qui permet de résoudre les équations obtenues avec l'utilisation de la formule de similarité. Le programme est validé par comparaison avec deux autres travaux effectués de Nield et Kuznetsov, et ce celui de Noghrehabadi et al.

Les résultats obtenus nous ont permis d'étudier l'effet de chaque paramètre qui sont, le paramètre de mouvement Brownien, le taux de flottabilité N_r , le paramètre de la thermophorèse N_t ,

le paramètre de la conductivité variable N_c , la viscosité variable N_v , le paramètre convectif H , le nombre de Lewis Le et le nombre de Forchheimer Fo , sur le transfert de chaleur et de masse qui sont représentés par le nombre réduit de Nusselt Nu_x et de Sherwood Sh_x , ainsi que leurs effets sur les profils de température, de vitesse et la fraction volumique. Ces résultats qui sont exposés dans des graphes et des tableaux, nous ont mené à conclure ce qui suit :

- ✓ Pour améliorer le transfert de chaleur, on peut procéder à l'augmentation de N_v , et réduction de Fo , N_t , N_c et varier le mouvement Brownien avec des petites valeurs comprises entre 0.1 et 0.5.
- ✓ L'amélioration de transfert de masse, basé sur l'augmentation de N_v , N_c , et N_b , ainsi que la diminution de Fo et N_t .
- ✓ Le profil de température peut être amélioré avec l'augmentation de Fo , N_c , N_r , H , N_t et la diminution de N_b , N_v et Le .
- ✓ L'amélioration de N_c , N_b , N_v , H et Le fait accroître le profil de vitesse, par contre l'augmentation de Fo et N_r le font décroître.
- ✓ La fraction volumique s'améliore avec l'amélioration de Fo , N_r , N_t et se détériore avec l'augmentation de N_c , N_v , N_b , H et Le .
- ✓ Les caractéristiques de flux de transfert de chaleur et de masse peuvent être contrôlées avec l'utilisation des nanoparticules.

On peut déduire que l'impact de la viscosité et la conductivité thermique variables en présence du mouvement Brownien et de thermophorèse ont des effets importants sur les profils de la vitesse, la température et la fraction volumique des nanoparticules. Les caractéristiques de flux de transfert de chaleur et de masse peuvent être contrôlées en utilisant des nanoparticules.

Références Bibliographiques

- [1] T.L. Bergman, F.P. Incropera, P.D. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 7th edition, John Wiley & Sons (2011)
- [2] Padet, J., "Fluides en écoulement : "Méthodes et Modèles", 1st Edition Masson (1991).
- [3] Ben Amara, S "Ecoulements et transferts thermiques en convection naturelle dans les milieux macro-poreux alimentaires", thèse de doctorat, Institut National Agronomique, Paris-Grignon, (2005).
- [4] S. US. CHOI, et EASTMAN, Jeffrey A: "Enhancing thermal conductivity of fluids with Nanoparticles". Argonne National Lab, IL (United States), 1995.
- [5] S. Fohanno, C.T Nguyen, G.Polidori. Newtonian Nanofluids in Convection. Handbook of nanophysics. Nanoparticles and Quantum Dots. Edited by Klaus D. Sattler. CRC Press. Taylor and Francis Group
- [6] B. Gladeset Benhadid, "Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard", thèse université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2010.
- [7] S. Halelfadl. "Caractérisation des propriétés thermo-physiques et d'échanges de chaleur des nanofluides à base de nanotubes de carbone". Thèse INSA Rennes, Laboratoire génie civil et génie mécanique LGCGM . ECOLE DOCTORALE : SDLM, (2014)
- [8] G. Salazar "Modélisation du séchage d'un milieu poreux saturé déformable": prise en compte de la pression du liquide", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure D'arts et Métiers (2006)
- [9] B. C. Pak and Y. I. Cho. "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles". *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151–170, 1998
- [10] Y. Xuan, W. Roetzel. "Conception for heat transfer correlation of nanofluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), 3701–3707, 2000.
- [11] S. Nadjette, "Modélisation du transfert de chaleur lors de l'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'une paroi poreuse", Université 20 Août 55, Skikda Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénierat Département des Sciences Fondamentales, 2008.
- [12] R. Bazizi .S. Hamimi "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", 2016, Bejaia.
- [13] S. BORIES, A. MOJTABI, M. QUINTARD, "transferts de chaleur dans les milieux poreux - conduction, convection, rayonnement, *Techniques de l'ingénieur*, 2008.
- [14] C. Danquigny : "étude expérimentale du transfert de masse en milieu poreux hétérogène" Strasbourg, 2003.
- [15] R. E. Collins, "Flow of Fluids through Porous Materials," Reinhold, New York, 1961
- [16] F. Mejni : "structure synchronisées dans les écoulements inhomogènes de convection mixte en milieu poreux" Lille, 2008.
- [17] S. Bories, M. Prat: Transferts de chaleur dans les milieux poreux, *Techniques de l'ingénieur*, Traité Génie Energétique, B8 250, pp.1-32, 2005.

- [18] N. Maxime: "Ecoulements dans les milieux poreux", Cours Ecole Doctorale Mécanique, Physique et Modélisation, Université de Provence Marseille, France, (2003)
- [19] C.Y. Cheng, "Soret and Dufour effects on heat and mass transfer by natural convection from a vertical truncated cone in a fluid-saturated porous medium with variable wall temperature and concentration". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 1031–1035.2010
- [20] M. Djilali, H. Sabrina : "contribution à l'étude de la convection naturelle conjuguée en milieu poreux, Mémoire de Master, Université KasdiMerbah-ouargla, 2015.
- [21] A.B Ahmadreza, "Application of nanofluid for heat transfer enhancement", 2013.
- [22] S. Das, S. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, Nanofluids: 'Science and Technology', 1st Edition, J. Wiley, 2008.
- [23]D. Wen, Y. Ding:'Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications',*Int.J. Heat and Fluid Flow*,26, 855–864.2005
- [24] S. Chakraborty, P.KPanigrahi, 'Stability of nanofluid: A review',*Applied Thermal Engineering*,Volume 174.2020
- [25]B. Glades, R. SAWLI, C. FAKIH et A.MOJTABI. "Etude du transfert de chaleur en convection naturelle dans les nanofluides." *Congés de la Société Française de Thermique* 1-6.2008
- [26]D.A NIELDet KUZNETSOV : "The onset of convection in a horizontal nanofluid layer of finitedepth". *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, vol. 29, No. 3, p. 217-223.2010
- [27] H. NAWAF. SAEID, "Mixed convection flow along a vertical plate subjected to time periodic surface temperature oscillations"*Int. J. Thermal Sciences* 44, 531-539.2005
- [28] H.A Pakravan, M.Yaghoubi:'Combined thermophoresis, Brownian motion and Dufour effects on natural convection of nanofluids',*International Journal of Thermal Sciences*, V50 P 394–402, 2011
- [29] D.S. Charya, G.S. 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 Egyptianmathematical society* 24, 108–115, 2016
- [30] A. Amahmid, M, Hasnaoui, P. Vasseur, "Etude analytique et numérique de la convection naturelle dans une couche poreuse deBrinkman doublement diffusive". *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42 2991-3005,1999
- [31]K. RKhairand A. Bejan'Mass Transfer to Natural Convection Boundary Layer Flow Driven by Heat Transfer'.*J. Heat Transfer*, 107, 979-981.1985
- [32]RASHAD, A. Mohammed, M.A EL-HAKIEMet M.M.M ABDOU'Natural convection boundary layer of a non-Newtonian fluid about a permeable vertical cone embedded in a porous medium saturated with a nanofluid'.*Computers & Mathematics with Applications*, vol.62, no8, p. 3140-3151.2011.
- [33]W. Khan, A. Aziz. 'Double-diffusive natural convective boundary layer flow in a porous medium saturated with a nanofluid over a vertical plate: prescribed surface heat, solute and nanoparticle fluxes'.*Int J ThermSci*;50:2154—60, 2011

- [34] P. CHENG, W. J. MINKOWYCZ: 'Free Convection About a Vertical Flat Plate Embedded in a Porous Medium with Application to Heat Transfer from a Dike', *Journal of Geophysical Research*, VOL. 82, NO. 14, 1977.
- [35] A. Mahdy, Sameh E. Ahmed 'Laminar Free Convection Over a Vertical Wavy Surface Embedded in a Porous Medium Saturated with a Nanofluid, *Transp Porous Med*' 91:423—435, 2012.
- [36] W.A. Khan, A. Aziz, 'Natural convection flow of a nanofluid over a vertical plate with uniform surface heat flux', *International Journal of Thermal Sciences*, V-50, Issue 7, 2011.
- [37] A.V. Kuznetsov a, D.A. Neild: 'Double-diffusive natural convective boundary-layer flow of a nanofluid past a vertical plate', *International Journal of Thermal Sciences*, V-50, Issue 5, 2011
- [38] A. NOGHREHABADI, A. BEHSERESHT, M. GHALAMBAZ "Natural convection of nanofluid over vertical plate embedded in porous medium: prescribed surface heat flux, Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, 2013
- [39] R. Subba, R. Gorla & A. Chamkha "Natural Convective Boundary Layer Flow Over a Nonisothermal Vertical Plate Embedded in a Porous Medium Saturated With a Nanofluid", *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 15:2, 81–94, 2011.
- [40] M. Ghalambaz, A. Noghrehabadi and A. Ghanbarzadeh "Natural Convection of Nanofluids Over a Convectively Heated Vertical Plate Embedded in a Porous Medium", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 31, No. 02, pp. 413–427, April–June 2014
- [41] D. SRINIVASACHARYA et O. SURENDER, "Effect of double stratification on mixed convection boundary layer flow of a nanofluid past a vertical plate in a porous medium". *Applied Nanoscience*, vol. 5, no1, pp. 29—38, 2015.
- [42] A. Noghrehabadi, M. Ghalambaz, A. Ghanbarzadeh "Effects Of Variable Viscosity And Thermal Conductivity On Natural-Convection Of Nanofluids Past A Vertical Plate In Porous Media", *Journal of Mechanics*, Vol. 30, No. 3, June 2014
- [43] H. ALI AGHA, M.N BOUAZIZ "Étude d'un écoulement thermosolutal en convection naturelle dans un milieu poreux rempli d'un nanofluide", 2015
- [44] T.C. Chaim "Heat transfer with variable thermal conductivity in a stagnation point flow towards a stretching sheet". *Int Commun Heat Mass Transfer* 23, 239–248, 1996
- [45] H.F. Oztop, E. Abu-Nada, "Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids". *Int J Heat Mass Transfer*, 29, 1326–1336, 2008.
- [46] S.K. Das, S.U.S. Choi, W. Yu, T. Pradeep, "Nanofluids—science and technology". Hoboken: John Wiley & Sons Publishers 2007.
- [47] M Chandrasekar, S. Suresh, "A review on the mechanisms of heat transport in nanofluids". *Heat Transfer Eng.* 30, 1136–1150, 2009
- [48] J. Buongiorno, and W. Hu, "Nanofluid coolants for advanced nuclear power plants", in: Proceedings of ICAPP '05, Seoul, May, 15–19, Paper No. 5705, 2005
- [49] D.A. Neild, and A.V. Kuznetsov, "The Cheng Minkowycz problem for the double-diffusive natural convective boundary layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 374–378, 2011.

Résumé

Une analyse numérique a été réalisée pour étudier les effets de la viscosité et la conductivité thermique variables sous des conditions aux limites non uniformes, sur une plaque verticale immergée dans un milieu poreux non-Darcy. Le transfert couplé de chaleur et de masses dans la couche limite de convection naturelle avec un nanofluide visqueux sont pris en compte. De plus, la viscosité et la conductivité thermique sont supposées être en fonction de la fraction volumique de nanoparticules, tandis que le modèle de Darcy-Forchheimer est utilisé pour le milieu poreux. Les équations aux dérivées partielles sont transformées en équations différentielles ordinaires en utilisant des transformations de similarité appropriées et le système d'équations résultant est résolu numériquement par la méthode des différences finies via le solveur bvp4c. De nombreux résultats numériques sont affichés sous forme graphique pour illustrer l'influence des divers paramètres d'intérêt sur différents profils. L'étude numérique montre que les formes du champ d'écoulement, de la température et de la fraction volumique des nanoparticules sont influencées de manière significative par les paramètres de la viscosité, de la conductivité, de non Darcy, de la réaction et le coefficient de transfert de chaleur par convection. De plus, la dépendance des nombres de Nusselt et Sherwood sur ces paramètres est étudiée

Mots clefs : *Nanofluid; Milieu poreux ; Convection naturelle ; viscosité variable ; Variable conductivité thermique*

Abstract

A numerical analysis was performed to study the effects of variables viscosity and thermal conductivity under non-uniform wall boundary conditions over a vertical plate embedded in a non-Darcy porous medium. Coupled heat and mass transfer of the natural convective boundary layer with viscous nanofluid are considered. Further, the viscosity and thermal conductivity are assumed as the function of the nanoparticle volume fraction, while the Darcy-Forchheimer model is used for the porous medium. The governing partial differential equations are transformed into the ordinary differential equations using an appropriate similarity transformation and the resulting system of equations is then solved numerically by the finitedifference method via bvp4c solver. Many numerical results are displayed graphically to illustrate the influence of the various parameters of interest on different profiles. Numerical investigation show that the flow field, temperature and nanoparticle volume fraction shapes are significantly influenced by variable viscosity parameters, non-Darcy parameters, reaction rate parameter and convective heat transfer coefficient. Furthermore, the dependency of the Nusselt and Sherwood numbers on these parameters is investigated.

Key word: *Nanofluid; porous Media; Natural convection; Variable viscosity; Variable thermal conductivity*
