UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

2016-UYFM-LBMPT-00015

T H ÈS E de DOCTORAT

L'Université Yahia Farès de Médéa
Spécialité : Génie mécanique-énergétique et transferts

Présentée et soutenue publiquement par

Amina Manel BOUAZIZ

Mai 2016

CONTRIBUTION À L'ETUDE DES MILIEUX POREUX SATURES PAR DES NANOFLUIDES. MODELES SIMPLES ET COMPLEXES

Directeur de thèse : **Salah HANINI**

Jury

Dr. Salam ABUDURA	Professeur, Université Médéa	Président
Dr. Abdallah ABDALLAH EL-HADJ	Professeur, Université Médéa	Examinateur
Dr. Miloud TAHAR ABBES	professeur, Université Chlef	Examinateur
Dr. Salah HANINI	Professeur, Université Médéa	Directeur de thèse

Laboratoire de Biomatériaux
et Phénomènes de Transport

THÈSE

REMERCIEMENTS

Louange à ALLAH, Seigneur de l'univers, le tout Puissant, louange abondante, pure et bénie, qui m'a donné la force, le courage, l'endurance et la patience de bien mener ce travail.

C'est avec une certaine émotion et beaucoup de sincérité que je voudrais remercier toutes les personnes ayant soutenu et apprécié mon travail. J'avoue que c'est une tache autant difficile que la réalisation de la thèse aux premiers instants de la recherche.

En premier lieu, je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, **Pr. Salah HANINI** pour son soutien très précieux, pour la confiance et compétence indispensable et sa disponibilité pendant ces années de projet. Comme hommage, je tiens à le féliciter pour m'avoir fait confiance chaque fois que ça se complique et que le bout du tunnel ne soit visible. C'est vrai aussi que c'est un chemin parfois inextricable partagé par tous et toutes les thésard(e)s, mais ses encouragements et son inquiétude permanente ont été pour moi des catalyseurs pour la poursuite du travail.

Je remercie vivement **Pr. S. ABUDURA** pour avoir accepté de présider le jury d'examen de la thèse. Je remercie également les deux examinateurs, **Pr. A. ABDALLAH EL-HADJ** et **Pr. M. TAHAR ABBES** pour avoir bien accepté de participer à mon jury et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail de recherche, malgré leurs multiples occupations.

Je tiens également à remercier mes enseignants de l'université de Médéa pour les longues années, passées à nous dispenser des cours et travaux, allant des connaissances de base et continuant par la maitrise des thèmes qui m'ont servi à les approfondir durant la conception, la recherche et la compréhension des articles ainsi qu'au stade de l'élaboration de la thèse.

Mes plus profonds remerciements vont à mes parents. Tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours soutenu moralement et encouragé. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.
Un grand merci spécialement à mon époux pour sa bonne humeur, pour l'ambiance de travail et détente très sympathique et importante ainsi qu'au sourire de notre petite fille qui m'a été précieux aux instants les plus délicats.

ملخص

مساهمة لدراسة في الأوساط المسامية المشبعة بمائع نانونى. نماذج بسيطة و معقدة.

درسنا التشتت في وسط مسامي من قبل جريان مائع نانوني ,لا- دارسي , بواسطة نمدجة مطابقة للمقاربة بيون جورنو ووفقا لآليات الأساسية للنقل.

استعملت مقاربة اوبربيك - بوسينسك من أجل الانتشار المزدوج , توسيعه دارسي- فورشيهيمر و العلاقة الرابطة بين التشتت و حقل السرعة , ودالك لكتابة المعادلات الحافظة للكتلة , كمية الحركة , الطاقة الحرارية , تركيز الأصناف و النانو-جزئيات تحت حمل طبيعي. تفاعل المائع النانوني مع صفيحة عمودية هي ممثلة بشرطين للحرارة , أيسو-ثرم ثم حاملة , أيسو-صنف عند الجدار.

منهجيه مبنية على الفرق المنتهية دقيقة و ملائمة أدت إلى حل النظام الرياضي ذا قيم عند النهايات.

التشتت يؤثر تأثير قوي على التحويل الكتلة و بأقل درجة على التحويل الحراري, هدا و التأثير يكون سلبي للتحويل الأول و يخف بالنسبة للوسط مسامي لا- دارسي, مع جدار أكثر حمولة و حمل طبيعي قوي. بينما يكون ايجابي على التحويل الحراري لكن بدرجة صغيرة. مميزات المائع النانونى الأقوى تقدم تحويلات أعلى مقارنة مع مميزات السائل الأصلي.

الكلمات المفتاحية **تشتت , وسط مسامي , لا- دارسي , مائع نانوني , آليات , الانتشار المزدوج , حمل طبيعي, نمدجة.**

Contribution à l'étude des milieux poreux saturés par des nano-fluides.
Modèles simples et complexes.

La dispersion dans les milieux poreux dans lequel un écoulement non-Darcéen d'un nano-fluide a lieu, est étudiée par le biais d'une modélisation adéquate se basant sur l'approche de Buongiorno, en accord aux mécanismes prépondérants de transport.

L'approximation d'Oberbeck Boussinesq pour une double diffusion, l'extension de Darcy-Forchheimer et une relation de dépendance de la dispersion avec le champ des vitesses, ont été adoptés pour l'écriture des équations de conservations de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie, de la concentration des espèces et des nanoparticules pour un régime de convection naturelle. L'interaction du nano-fluide avec une plaque verticale est matérialisée pour deux conditions thermiques, isotherme puis convective, et iso-concentration d'espèces, à la paroi.

Une méthodologie de différences finies précises a été trouvée appropriée pour la résolution du système mathématique à valeurs aux limites adimensionné.

La dispersion affecte fortement le transfert de masse et sensiblement moins le transfert thermique. Cet effet est négatif pour le premier transfert et s'atténue à mesure que le milieu est non-Darcéen, une paroi plus convective et la convection du nano-fluide plus vigoureuse. Il est par contre positif pour le transfert thermique mais dans des proportions moins grandes. Un nano-fluide avec des caractéristiques fortes présente des taux plus élevés par rapport à celui proche du fluide base.

Mots clés: **dispersion, milieu poreux non Darcéen, nano-fluide, mécanismes, double-diffusion, convection, modélisation.**

Contribution to the study of a porous medium saturated by a nanofluid. Simple and complex models.

This study is concerned by the effect of the dispersion of a nanofluid in a non-Darcy flow within a saturated porous medium.

A suitable modeling based on the Buongiorno's approach is developed according to the more representative mechanisms. The phenomenon of double diffusive natural convective problem is treated with the help of the Oberbeck-Boussinesq's approximation, the Darcy-Forchheimer's model and the relationship between the dispersion and the velocity, for writing the conservative equations of masse, momentum, thermal energy, solutal concentration and the nanoparticles volume fraction. Two thermal boundary conditions cases, isothermal then convective, and iso-concentration at the wall of the plate neighboring the nanofluid are specified.

An accurate finite difference method was found appropriate to solve the dimensionless boundary values mathematical system.

Preliminary results show that the mass transfer rate is affected strongly by the dispersion and weakly for the thermal transfer rate. This effect influences negatively the first, but decreases as the porous medium obey of the non-Darcy concept, with more convective plate and with vigorous natural convection of the nanofluid. However, this tendency is inverted for the thermal transfer rate, but with the weak proportions. The dependency of the level of the transfer rates is strong with the characteristics of the nanofluid.

Keywords: **Dispersion, porous medium, non-Darcy, nanofluid, mechanisms, double-diffusion, convection, modeling.**

TABLE DES MATIERES

Remerciements……2
Résumés……3
Table des matières……6
Table des figures……10
Liste des tableaux……13
Symboles……14

Introduction générale **16**

1. Contexte de l'étude……. 17
2. Objectifs de la thèse et organisation du manuscrit…….. 18

Partie I Etat de l'art **20**

I Nano-fluides: synthèse bibliographique **22**

I.1 Introduction ……..... 23

1.1 Caractéristiques des nano-fluides……... 23

1.2 Echelle des nano-fluides…… 24

I.2 Préparation des nano-fluides……..... 25

2.1 En une étape…… …… 25

2.2 En deux étapes…… 26

I.3 Stabilité des nano-fluides…….. 27

I.4 Expressions théoriques de la conductivité thermique des nano-fluides……. 30

4.1 Premiers modèles de la conductivité thermique des nano-fluides……..... 30

4.2 Modifications des modèles de la conductivité thermique des nano-fluides…… 31

I.5 Effets des grandeurs significatives sur la conductivité thermique suivant les études expérimentales……. 32

5.1 Effet de la concentration……. 33

5.2 Effet de la taille et morphologie de la particule…….. 33

5.3 Effet de l'agglomération des particules……. 34

5.4 Effet du type de la particule…… 35

5.5 Effet des additifs et du fluide de base……..... 35

I.6 Viscosité des nano-fluides…… 36

I.7 Densité et chaleur spécifique des nano-fluides……. 36

I.8 Applications réelles et potentielles des nano-fluides…….. 37
8.1 Introduction……..... 37
8.2 Nano-fluides et échangeurs à plaques…… 38
8.3 Nano-fluides à base de carbone…….. 38
8.4 Refroidissement des moteurs…….. 38
8.5 Domaine de l'énergie solaire……. 39
8.6 Défis d'applications…… 39
8.7 Applications spécifiques……. 41

II Nano-fluides & mécanismes **43**

II.1 Introduction ……..... 44

II.2 Problématique du comportement des nano-fluides…… 44
2.1 Phénomènes physiques…….. 44
2.2 Données expérimentales et propositions de mécanismes…… 45

II.3 Propositions de mécanismes……. 49
3.1 Mouvement Brownien des nanoparticules…….. 49
3.2 Nano-couche moléculaire du liquide à l'interface liquide/particule…… 49
3.3 Transport de la chaleur par les nanoparticules…… 50
3.4 Agglomération des nanoparticules…… 51
3.5 Autres mécanismes…… 52

II.4 Travaux à partir des mécanismes……..... 53
4.1 Mécanismes statiques MS……. 53
4.2 Mécanismes dynamiques MD……..... 55
4.3 Combinaison des modèles statique et dynamique……... 56

II.5 Revue sur les mécanismes et propriétés des nano-fluides……... 58

Bibliographie de la partie I **61**

69

Partie II Dispersion-modélisation & résultats

III Nano-fluides & modèles **71**

III.1 Introduction ……..... 72

1.1 Modélisation à une phase…….... 72

1.2 Modélisation à deux phases……... 72

III.2 Travaux sur les transferts convectifs…… 73

2.1 Travaux expérimentaux…… 73

2.2 Travaux avec les modèles à une et deux phases……... 73

III.3 Présentation du modèle de Buongiorno……... 74

3.1 Hypothèses…….. 75

3.2 Equations de conservations……..... 76

3.3 Adaptation pour la convection forcée et mixte…… 78

3.4 Adaptation pour un milieu poreux…….. 78

III.4 Travaux spécifiques avec le modèle de Buongiorno……... 82

4.1 Travaux pour convection naturelle externe, milieu non poreux…….. 82

4.2 Travaux pour convection naturelle et mixte, milieu poreux…… 82

IV Dispersion-revue critique **85**

IV.1 Introduction ……..... 86

IV.2 Phénoménologie de la dispersion…… 86

2.1 Loi de Darcy et Darcy- Forchheimer en milieu poreux et dispersion…….. 86

2.2 Dispersion thermique et hydrodynamique en milieu poreux……. 88

2.3 Applications…… 89

IV.3 Identification de la dispersion…… 90

IV.4 Modèles de dispersion……. 91

4.1 Modèle de Pedras et De Lemos……... 91

4.2 Modèle de Yang et Nakayama…….…... 94

V Problématique et modélisation **96**

V.1 Problématique…….. 97

V.2 Formulation mathématique……. 100

2.1 Représentation physique et hypothèses……. 100

2.2 Cas de condition convective et nanoparticules actives à la paroi…… 102

2.3 Développement du modèle……. 103

2.4 Modèle mathématique adimensionné…….. 106

V.3 Quantités d'intérêt…… 108

VI Résultats & discussion 109

VI.1 Validation du code de calcul…… 111

VI.2 Cas 1: plaque isotherme..... 112

VI.3 Cas 2: plaque non-isotherme……. 117

VI.4 Variations des nombres locaux de Nusselt et de Sherwood…….. 120

VI.5 Effet de la condition passive……. 121

VI.6 Effet des nombres de Lewis…….. 124

VI.7 Conclusion …… 126

Références de la partie II **128**

Conclusion générale **135**

1. Conclusions de la thèse…….. 136
2. Perspectives ……..... 138

I.1. Taille des nanoparticules des nano-fluides ……25

I.2. a) technique d'évaporation directe. b) système de synthèse des nanoparticules par arc submergé. c) ablation par laser. d) méthode de transfert de phase Pour deux étapes : e) 1ère étape. f) 2ème étape…….....27

I.3. Comparaison de la conductivité thermique des matériaux…….30

I.4 Représentation des applications spécifiques des nano-fluides : (a) transfert thermique, (b) capteurs de defaults, (c) thérapies anti-infection, (d) système de récupération d'énergie, (e) thérapie hyperthermique magnétique et (f) cosmétiques……..41

II.1 Conductivité thermique relative/ βϕ des nano-fluides pour les oxydes métalliques (Al_2O_3+eau ; Al_2O_3+EG ; Al_2O_3+huile ; ZnO+eau ; ZnO+EG ; TiO_2+eau ; TiO_2+EG ; CuO+eau ; CuO+EG)……..45

II.2 Conductivité thermique relative/βϕ des nano-fluides pour les métaux (Au + eau ; Ag+EG ; Cu+huile ; Cu+eau ; Cu+EG)…….....45

II.3 Conductivité thermique relative/température (°C) du nano-fluide Al_2O_3 +eau ; ϕ=1%, Taille des particules de 11-150nm……..46

II.4 Conductivité thermique relative/température (°C) du nano-fluide Al_2O_3 +eau ; ϕ=1%, Taille des particules de 12-38.4 nm……46

II.5 Conductivité thermique relative/taille de particule (nm)……46

II.6 Conductivité thermique relative/taille de particule (nm)……47

II.7 Augmentation de la conductivité thermique effective selon la taille de la nanoparticule d due à la nano-couche liquide et à l'interface nanoparticule/ fluide de base……50

II.8 Schémas de transport par particule (a) diffusive et (b) balistique ….par phonons ……..50

II.9 Rapport des conductivités thermiques k_{nf}/ k_f en fonction de la concentration des nanoparticules. Schémas d'agglomération (de droite à gauche) (i) forte concentration des particules (ii) cubique simple (iii) structure irrégulière avec perte de concentration mais avec contact (iv) groupes séparés par les nano-couches liquides minces pour un transfert rapide……51

II.10 Représentation de l'EMT…….53

IV.1 Effet des vitesses sur la dispersion thermique // et ⊥ selon Re et selon Pe……87

IV.2 Cellule unitaire de calcul ; différents conditions aux limites : a)-e)……92

IV.3 Dispersion thermique longitudinale pour k_s/k_f=2 et k_s/k_f=10; G : cond. Newmann ; D : cond. Temp……92

IV.4 Dispersion thermique transversale pour k_s/k_f=2 et k_s/k_f=10; G : cond. Newmann ;

D : cond. Temp……92

IV.5 Unité cellulaire de calcul, expressions en laminaire et turbulent pour les conductivités de dispersion, validation pour les conductivités moléculaires pour les lits et mousses poreuses, validation pour les conductivités longitudinale et transversale pour les lits……..94

V.1 Représentation de la physique du problème et des conditions aux limites……101

VI.1 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de vitesses. Bi = 1000 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide……..113

VI.2 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de vitesses. Bi = 1000 et fortes valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide……113

VI.3 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de températures. Bi = 1000 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide……114

VI.4 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de températures. Bi = 1000 et fortes valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide……114

VI.5 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de concentration des espèces. Bi = 1000 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide……..115

VI.6 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de concentration des espèces. Bi = 1000 et fortes valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.....116

VI.7 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de la fraction des nanoparticules. Bi = 1000 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide…..116

VI.8 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de la fraction des nanoparticules. Bi = 1000 et fortes valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide……117

VI.9 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de vitesses. Bi = 0.5 ; 10 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide……..118

VI.10 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils des températures. Bi = 0.5 ; 10 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide……118

VI.11 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de concentration des espèces. Bi = 0.5 ; 10 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide…..119

VI.12 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de la fraction des nanoparticules. Bi = 0.5 ; 10 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide..119

VI.13 Effet de la condition passive/active sur les profils de vitesse……122

VI.14 Effet de la condition passive/active sur les profils de température……122

VI.15 Effet de la condition passive/active sur les profils de concentration des espèces……..123

VI.16 Effet de la condition passive/active sur les profils de la fraction volumique des nanoparticules……..123

VI.17 Effet des nombres de Lewis sur les profils de vitesse……124
VI.18 Effet des nombres de Lewis sur les profils des températures……124
VI.19 Effet des nombres de Lewis sur les profils de concentration des espèces……..125
VI.20 Effet des nombres de Lewis sur les profils de la fraction volumique des nanoparticules125

I.1 Modèles théoriques de la conductivité thermique des nano-fluides…….32
I.2 Effet de la concentration des nanoparticules sur k_{nf}……..33
I.3 Effet de la taille des nanoparticules sur k_{nf}……....34
I.4 Effet de la morphologie des nanoparticules sur k_{nf}……...34
I.5 Effet du type de nanoparticule sur k_{nf}……..35
I.6 Effet de l'ajout des additifs sur k_{nf}……36
I.7 Viscosité des nano-fluides…….37

II.1 Développements de modèles à partir de l'EMT…….54
II.2 Développements de modèles à partir de l'INC……..54
II.3 Développements de modèles à partir des MD……56
II.4 Développements de modèles à partir INC+MB-NC……..57
II.5 Développements de modèles à partir des AG+MB-NC…….57

III.1 Transfert de chaleur par convection naturelle externe dans un milieu poreux……..74

VI.1. Comparaison des valeurs de $-\theta'(0)$ pour un fluide mono-diffusif régulier et pour le cas du nano-fluide. L_e=10.0, L_n=10.0……112
VI.2 Valeurs de $Nu_xRa_x^{-1/2}$ et $Sh_xRa_x^{-1/2}$ pour les valeurs sélectionnées de Bi, Ra_d and Fo avec (N_b=0.2, N_t =0.1, N_c=0.2, N_r=0.2, L_e=10.0, L_n=10.0)…….121
VI.3 Valeurs de $Nu_xRa_x^{-1/2}$ et $Sh_xRa_x^{-1/2}$ pour les valeurs sélectionnées de Bi, Ra_d and Fo avec (N_b=1.0, N_t =0.2, N_c=1.0, N_r=1.0, L_e=10.0, L_n=10.0)…….121

B_i	Nombre de Biot	(1)
Bi_x	Nombre de Biot local	(1)
c_f	Constante empirique d'inertie	(1)
C	Concentration espèces	(Kg/m^3)
C_w	concentration des espèces à la paroi	(Kg/m^3)
C_∞	concentration des espèces hors C.L	(Kg/ m^3)
d	Diamètre des pores	(m)
D_B	Coefficient de diffusion Brownienne	(m^2/s)
D_S	Diffusivité des espèces dans le milieu poreux	(m^2/s)
D_{Sm}	Diffusivité moléculaire des espèces dans le milieu poreux	(m^2/s)
D_T	Coefficient de diffusion de thermophorèse	(m^2/s)
f	Vitesse adimensionnée	(1)
F_0	Paramètre structural et thermo-physique du M.P	(1)
g	Accélération de la pesanteur	(m/s^2)
h	Coefficient de transfert thermique convectif	($W/m^2.K$)
K	Perméabilité du milieu poreux	(m^2)
k_m	Conductivité thermique effective du M.P	(W/m. K)
L_e	Nombre de Lewis régulier	(1)
L_n	Nombre de Lewis du nano-fluide	(1)
Nb	Paramètre du mouvement Brownien	(1)
Nc	Paramètre du rapport de flottabilité régulier	(1)
Nr	Paramètre du rapport de flottabilité	(1)
Nt	Paramètre de thermophorèse	(1)
Nu_x	Nombre de Nusselt local	(1)
p	Pression	(Pa)
q_w	flux de chaleur à la paroi	(W/m^2)
q'_w	flux de matière à la paroi	($Kg/ m^2.s$)
q''_w	flux de masse du nano-fluide à la paroi	(m/s)
Ra_d	Nombre de Rayleigh	(1)
Ra_x	Nombre de Rayleigh local	(1)
s	Fraction en volume des nanoparticules adimensionnée	(1)
Sh_x	Nombre de Sherwood local	(1)

T	Température	(K)
T_f	Température du fluide chaud adjacent à la paroi (cas 2)	(K)
T_w	Température de la paroi (identique à T_f (cas 1))	(K)
T_∞	Température ambiante hors C.L	(K)
u, v	Composants de la vitesse dans les directions x, y	(m/s)
v	Vecteur vitesse	(m/s)
x, y	Coordonnées cartésiennes	(m)

Symboles grecs

α	Diffusivité thermique	(m^2/s)
α_m	Diffusivité thermique moléculaire	(m^2/s)
β_C	Coefficient d'expansion de matière volumétrique du fluide	(m^3/Kg)
β_T	Coefficient d'expansion thermique volumétrique du fluide	(1/K)
γ	Concentration d'espèces adimensionnée	(1)
δ	Coefficient de dispersion thermique	(1)
ε	Porosité	(1)
η	Variable de similarité	(1)
θ	Température adimensionnée	(1)
μ	Viscosité dynamique du nano-fluide	($N.s/m^2$)
ν	Viscosité cinématique du nano-fluide	(m^2/s)
ξ	Coefficient de dispersion des espèces effectif	(1)
ρ	Densité du fluide	(Kg/m^3)
$(\rho c)_f$	Capacité calorifique du fluide de base	($J/ m^3.K$)
$(\rho c)_p$	Capacité calorifique effective des nanoparticules	($J/ m^3.K$)
$\rho_{f\infty}$	Densité du fluide hors C.L	(Kg/m^3)
ρ_p	Densité des nanoparticules	(Kg/m^3)
σ	Coefficient de dispersion solutale	(1)
ϕ	Fraction volumique des nanoparticules	(1)
ϕ_w	Fraction volumique des nanoparticules à la paroi	(1)
ϕ_∞	Fraction volumique des nanoparticules hors C.L	(1)
ψ	Fonction de courant	(m^2/s)

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte de l'étude

La compréhension et la prévision des écoulements, du transfert de chaleur et du transport de la matière en milieu poreux saturé, est un domaine de recherche extrêmement vaste et essentiel ayant de nombreux débouchés au niveau technique dans les domaines du pétrole, du gaz incluant la récupération assistée, dans les systèmes de traitement, de séparation…mais aussi de l'eau et de l'environnement.

Ces écoulements et transport ont été étudiés de manière approfondie par de nombreux chercheurs, mais la progression des sciences et la technologie a vu l'explosion du domaine dit de la nanotechnologie après un passage dans les décennies passées dans la micro-technologie.

L'étude des systèmes à l'échelle du nanomètre occupe de nombreux groupes de recherche depuis plusieurs dizaines d'années. L'intérêt de ces nanostructures est double, le fait qu'elles aient un nombre fini d'atomes les situent entre le solide et l'atome isolé, leur conférant des propriétés différentes du solide, d'une part. D'autre part le besoin de miniaturisation des appareils ainsi que la possibilité de les incorporer dans des structures ou fluides devient aisé tout en véhiculant leurs propriétés avantageuses à l'ensemble. Par contre, les problèmes de caractérisation, de modélisation et le passage du « nanoscale/macroscale » sont dépendants de la taille des nanoparticules.

Dans le domaine de la thermique, la recherche pour les matériaux de refroidissement efficaces a mené à l'apparition d'un nouveau type de fluide appelé nano-fluide (fluide de base + nanomatériau) et a suscité de nombreux travaux de recherche. L'engouement pour ces nouveaux fluides est tel qu'on envisage le remplacement à moyen terme les fluides classiques caloporteurs ou réfrigérants dans tous les procédés, circuits fermés ou dispositifs impliquant un transport de matière ou un transfert thermique.

L'extension de ces nano-fluides à l'écoulement au sein des milieux poreux est encore à ses débuts. En effet, la connaissance du comportement de tels fluides n'est pas suffisamment renseignée, pour deux raisons :

- Les paramètres d'un milieu poreux sont à priori mal définis, sujets au recours des approximations et moyennes via les statistiques d'un volume élémentaire représentatif.

- La stabilité du nano-fluide y est encore au stade d'étude et la perte de cette stabilité au sein d'un milieu complexe et enchevêtré, l'est encore plus. Ceci nécessite des recherches plus approfondies et une meilleure connaissance du mélange dans sa structure et des interactions entre les deux phases.
- La modélisation des écoulements et des transferts de ces fluides n'est pas encore développée et on assiste à une floraison d'approches pour la quantification.

Toutefois, et quel que soit le type d'écoulement considéré dans un milieu poreux, il a été mis en évidence des phénomènes de dispersion hydrodynamique. Les variations de vitesses dues aux obstacles internes constituants le milieu poreux par nature, provoquent des dispersions de l'écoulement. En conséquence, cette dispersion s'accompagne d'un transfert thermique et/ou massique s'additionnant aux diffusivités moléculaires, dans les milieux assez homogènes ou hétérogènes.

Cette thèse traite de l'écoulement d'un nano-fluide dans un milieu poreux sujet à la dispersion afin d'envisager le gain/perte des taux de transferts thermique et solutale en rapport aux niveaux des vitesses internes. Il s'agit en plus d'avoir un aperçu sur l'effet d'une condition convective à la paroi, hypothèse réaliste et moins contraignante lors des applications.

2. Objectifs de la thèse et organisation du manuscrit

L'objectif de la thèse est d'abord de mieux comprendre cet agrégat qu'est le nano-fluide et sa propension aux variations en dépendance des paramètres et des variables de transport ainsi qu'aux réactions aux multiples interactions.

Pour répondre à la problématique, mettant en jeu la double complexité du nano-fluide dans un milieu poreux avec ses composantes de dispersion thermale et solutale, il est proposé une approche numérique, conséquente à une modélisation choisie et adaptée à cette complexité. Les informations concernant les paramètres par exemple structurales du milieu poreux ainsi que les relations de dépendance de la dispersion sont examinées en premier lieu. L'ensemble est alors incorporé dans un système gouvernant l'écoulement, et les transferts via l'approche la plus réaliste, et adimensionné pour une classe plus large de résultats.

Ce document présente dans une première partie l'état de l'art du sujet et les connaissances détaillées et fondamentales pour répondre à la problématique. Cette première partie s'attache notamment à exposer la préparation des nano-fluides ainsi que leurs stabilités, à décrire le comportement des nano-fluides en relation de leur concentration, taille, morphologie, type,… en nanoparticules, et enfin à explorer les applications variées et intéressantes dans de multiples domaines. Un second chapitre sera consacré aux mécanismes théoriques responsables des propriétés exceptionnelles des nano-fluides, et nécessaires pour le choix du type de modélisation et des propriétés requises.

La seconde partie de ce document traite de l'éventail de la modélisation couplé à celle du milieu poreux relativement à l'écoulement. La poursuite du travail envisagé nécessite l'exploration détaillée de la dispersion en vue d'un modèle suffisamment fiable, et traduisant les mécanismes réellement actifs et importants. Le chapitre ultérieur et s'appuyant sur la collecte des informations précédentes se fixe comme objectif d'élaborer une modélisation répondant à la problématique posée et pouvant se présenter dans une forme particulière calculable. Les résultats seront présentés, à l'issue d'une validation, sous forme de graphes et de tableaux en quantités d'intérêt montrant les effets de la dispersion en liaison avec la structure et le type d'écoulement du milieu poreux.

PREMIERE PARTIE

ETAT DE L'ART

Cette partie rappelle les éléments indispensables à la compréhension et à l'étude du sujet. Un état de l'art sur les nano-fluides à travers une synthèse bibliographique est présenté dans le Chapitre I. Ce chapitre rappelle l'apparition de ces structures de la nanotechnologie récente avec leurs caractéristiques avantageuses en rapport des fluides de base utilisés seules, positionne leurs dimensions sur une échelle macro/micro/nano, synthétise leurs préparations, met en évidence le concept de leurs stabilité et décrit de façon détaillée les expressions de la conductivité thermique responsable de leurs attractions d'une part, et de la viscosité en relation avec la fraction des nanoparticules, d'autre part. Les différentes applications variées et potentielles sont mis en évidence en fin de chapitre.

Des éléments succincts mais indispensables des phénomènes à l'échelle nano/microscopique sont rappelés dans le Chapitre II, et notamment ceux intéressant le transport de la chaleur pour expliquer les anomalies de caractérisation du point de vue thermique observées par rapport à l'approximation de Maxwell. Dans ce chapitre, on s'attache à décrire les mécanismes émergents et principaux de transport sur un thème qui est encore ouvert au débat et à la théorisation.

PARTIE I ***CHAPITRE I***

Nano-fluides

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

La nanotechnologie traite de la production, l'application des matériaux à l'échelle nanométrique puis à l'intégration des nanostructures résultants dans de plus grands systèmes. Les tendances indiquent que la nanotechnologie est susceptible d'affecter notre vie quotidienne de façon considérable dans les prochaines décennies **[1].**

La recherche pour les matériaux de refroidissement efficaces a mené à l'apparition d'un nouveau type de fluide appelé nano-fluide (fluide de base + nanomatériau) et a suscité à titre d'illustration de nombreux travaux de recherche [2-12]. Ces nouveau fluides sont tout à fait différents des dispersions de l'ordre du mm ou micromètre. Comparés aux liquides de refroidissement conventionnels tels que l'eau, le kérosène, l'éthylène-glycol et les micro-fluides, les conductivités thermiques relevées sont plus élevées.

Les nano-fluides sont une classe relativement nouvelle de fluides qui se composent d'un fluide de base avec des particules suspendues de 1-100 nm. Ces particules, généralement un métal ou un oxyde de métal, augmentent la conduction et les coefficients de convection, permettant plus de transfert thermique d'un réfrigérant, par exemple [13]. Dans les dernières décennies, les avancées rapides en nanotechnologie ont contribué à l'émergence de la nouvelle génération de ces liquides réfrigérants.

Quelques nano-fluides typiques sont les nano-fluides de cuivre avec de l'éthylène-glycol comme fluide de base, et ceux d'oxyde de cuivre avec l'eau. Les nano-fluides sont aussi des suspensions diluées de nanoparticules en matières composites développées environ il y a une décennie dans le but spécifique d'être transférés en un secteur nano-technologique des plus prometteurs.

I.1.1 Caractéristiques des nano-fluides

Ils représentent une propre classe différente des colloïdes conventionnels réservés pour d'autres applications. Comparés aux suspensions conventionnelles de solide-liquide pour des intensifications de transfert thermique, les nano-fluides possèdent les avantages suivants **[13]** :

- Superficie spécifique élevée et donc plus de surface de transfert thermique entre les particules et les fluides.
- Stabilité élevée de dispersion avec le mouvement Brownien des particules prédominant.
- Puissance de pompage réduite par rapport au liquide pur afin de réaliser l'intensification équivalente du transfert thermique.

- Particule réduite non obstruant par rapport aux boues conventionnelles, de ce fait favorisant la miniaturisation de système.
- Propriétés réglables, y compris la conductivité thermique et la mouillabilité de surface, en changeant la concentration de particules pour convenir à différentes applications.
- Les propriétés telles que le comportement optique, électrique, et magnétique des matériaux, de sa réactivité et de sa résistance sont le résultat de deux principaux facteurs à cette échelle soit la superficie relative accrue et les effets liés à la théorie des quanta. A mesure que la taille d'une particule diminue, une plus grande proportion d'atomes est trouvée sur la surface comparée à ceux à l'intérieur.
- Les propriétés uniques, chimiques, physiques, et mécaniques des nanomatériaux sont exploitées dans une grande variété d'applications. De plus, ils ne bloquent pas les canaux et induisent une très petite chute de pression qui est bénéfique pour des applications de transfert thermique. Le mouvement Brownien vigoureux des nanoparticules suspendus dans les fluides de base rend plus stable ces nano-fluides par rapport aux micro-fluides **[14]**, qui est l'une des attractions pour des applications de transfert thermique.
- D'ailleurs, trois propriétés qui sont la conductivité thermique accrue, le transfert thermique accru, et le flux thermique critique élevé mettent ces fluides en première position. Les études prouvent qu'avec relativement un peu de nanoparticules, la conductivité thermique augmente de manière large.

Deux caractéristiques sont très importantes pour les systèmes de transfert thermique : stabilité extrême, et conductivité thermique élevée. Différents types ont été élaborés pour une large gamme des applications de technologie comme dans l'industrie des automobiles, des liquides réfrigérants **[15]**, des liquides de frein **[16],** des réfrigérateurs domestiques **[17]**, des dispositifs solaires **[18, 19]…** Nous indiquerons par la suite les applications réelles et potentielles des nano-fluides.

I.1.2 Echelle des nano-fluides

Serrano et al. **[20],** donne quelques exemples du nanomètre en comparaison avec le millimètre et le micromètre pour situer l'échelle des nano-fluides, **Figure I.1.**

C'est dans une gamme relativement assez large que se situent les dimensions des nanoparticules et qui part par convention de 10 fois celles des atomes à donc 1000 fois cette taille d'atome constituant un empilement d'atomes.

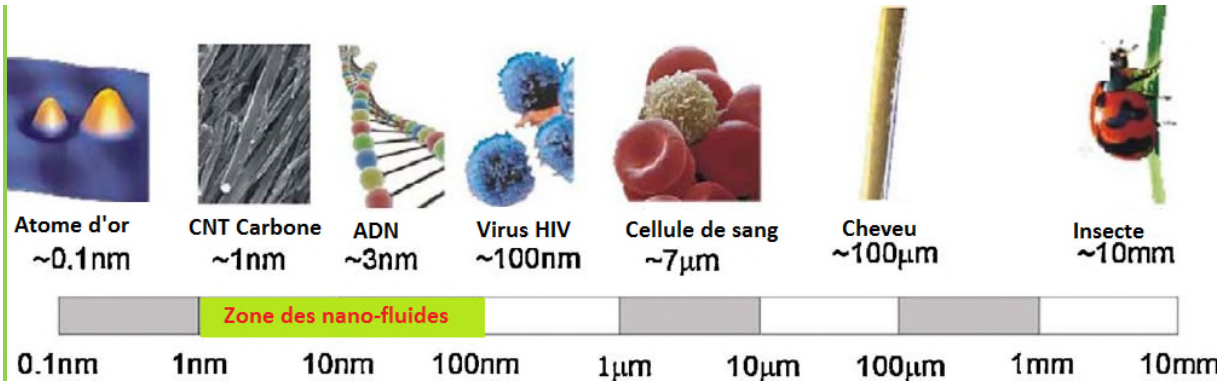


Figure I.1. Taille des nanoparticules des nano-fluides [20]

Il est remarquable de constater que les virus constituent en taille la limite des nanoparticules injectées dans le fluide de base. Par une expression imagée, la division d'un millimètre en dix fois est équivalente à la taille d'un cheveu –encore visible à l'œil nu- et la division en mille fois de ce dernier (le cheveu) est équivalente en dimensions à la plus grosse nanoparticule !

I.2. Préparation des nano-fluides

I.2.1 En une étape

Elle s'effectue en une étape, où la production des nanoparticules et leur dispersion dans un fluide de base sont faites simultanément **[21]**, soit par :

- Technique directe d'évaporation **[22-24]** qui consiste en une vaporisation dans le cylindre rotatif des nanoparticules dans un fluide de base, **Figure I.2-a**. La condensation de la vapeur se fait ensuite au contact du liquide. Le produit est insuffisant et la technique demande une basse pression de vaporisation.
- Réduction chimique : Des nanoparticules métalliques sont préparés dans divers dissolvants par réduction chimique des sels de métal dans les nano-fluides **[25-27].**
- Arc submergé ou Système SANSS : Une tige en Cu submergée dans un liquide diélectrique et dans une chambre à vide où une source appropriée d'énergie électrique est employée pour produire une température de 6.000 à 12.000 °C et fondre et vaporiser la tige en métal, **Figure I.2-b**. Celui-ci vaporisé subit la nucléation, la croissance et la condensation ayant pour résultat des nanoparticules dispersés dans l'eau dé-ionisée. **[28, 29]**.

- Ablation par laser est une autre technique pour produire et disperser des nanoparticules directement dans les fluides **[30-32], Figure I.2-c**. Des métaux solides tels que le Cu, Ag, ou Au qui sont submergés (par exemple dans l'eau ou dans des huiles de lubrification) sont enlevés. Cette méthode produit les fluides stables sans addition du dispersant.
- L'irradiation par microondes **[33]** : des nano-fluides en cuivre par exemple sont préparés en réduisant $CuSO_4.5H_2O$ avec $NaH_2PO_2.H_2O$ dans l'éthylène-glycol sous l'irradiation **[34-36].**
- Dans le procédé dit « polyol » **[37-38],** un précurseur en métal est dissous dans un « polyol » liquide (habituellement éthylène-glycol) et les conditions expérimentales sont ajustées pour réduire le précurseur métallique, suivi de nucléation et croissance.
- Dans la méthode de transfert de phase, le réactant migre dans une autre phase où la réaction se produit, **Figure I.2-d**. Cette méthode a l'avantage de surmonter les problèmes d'insolubilité des précurseurs dans les fluides de base pendant la préparation. **[39-41].** D'une manière semblable, des nanoparticules d'or et d'argent sont transférés de la phase aqueuse à la phase organique avec l'alkyl aminé comme agent tensio-actif **[42].** Pour préparer les fluides stables des agents tensio-actifs sont souvent employés en tant qu'agents stabilisants qui fournissent la répulsion électrostatique ou stérique ou la combinaison des deux entre les nanoparticules et empêchent l'agglomération de particules due aux forces attractives de Van Der Waals. [43-44]. les additifs peuvent modifier les propriétés extérieures des particules, qui peuvent avoir un effet synergique ou antagoniste sur les propriétés thermiques.

I.2.1 En deux étapes

Elle s'effectue aussi en deux étapes, et c'est la méthode la plus largement répandue, due à sa grande adaptabilité et rentabilité. Les nanomatériaux sont d'abord produit par un processus physique ou chimique, **Figure I.2-e** et sont alors dispersés dans fluide à l'aide de l'agitation magnétique intensive, agitation ultrasonique, **Figure I.2-f**, mélange à fort cisaillement, l'homogénéisation, ou par fraisage en boule.

Les nanoparticules sont préparées par la réduction de sel en métal de transition **[45],** le déplacement des organométalliques **[46]**, la synthèse de micro-ondes **[47]** et la co-précipitation **[48].** En raison de la grande superficie et de l'activité élevée de la surface, les nanoparticules ont une tendance de s'agglomérer. Par conséquent, les nanoparticules doivent être stabilisées pour empêcher ce phénomène physique **[49], Figure I.2-e**. Kim and Kwak par

exemple [50] ont préparé des nano-fluides d'oxyde de cuivre (CuO) en dispersant directement les nanoparticules obtenus de CuO dans l'éthylène-glycol par la sonication ou ulta-sons concentrés et sans stabilisateurs. Pour les nano-fluides contenant les nanotubes à face unique de carbone (SWCNTs) et les nanotubes multi-faces de carbone (MWCNTs), ils sont préparés par la méthode de deux étapes [51-53]. Des nano-fluides d'oxyde de zinc dans l'éthylène-glycol sont préparés par cette technique de deux étapes à l'aide d'un agitateur magnétique [54]. Le citrate d'ammonium est ajouté comme dispersant, pour augmenter la stabilité de la suspension.

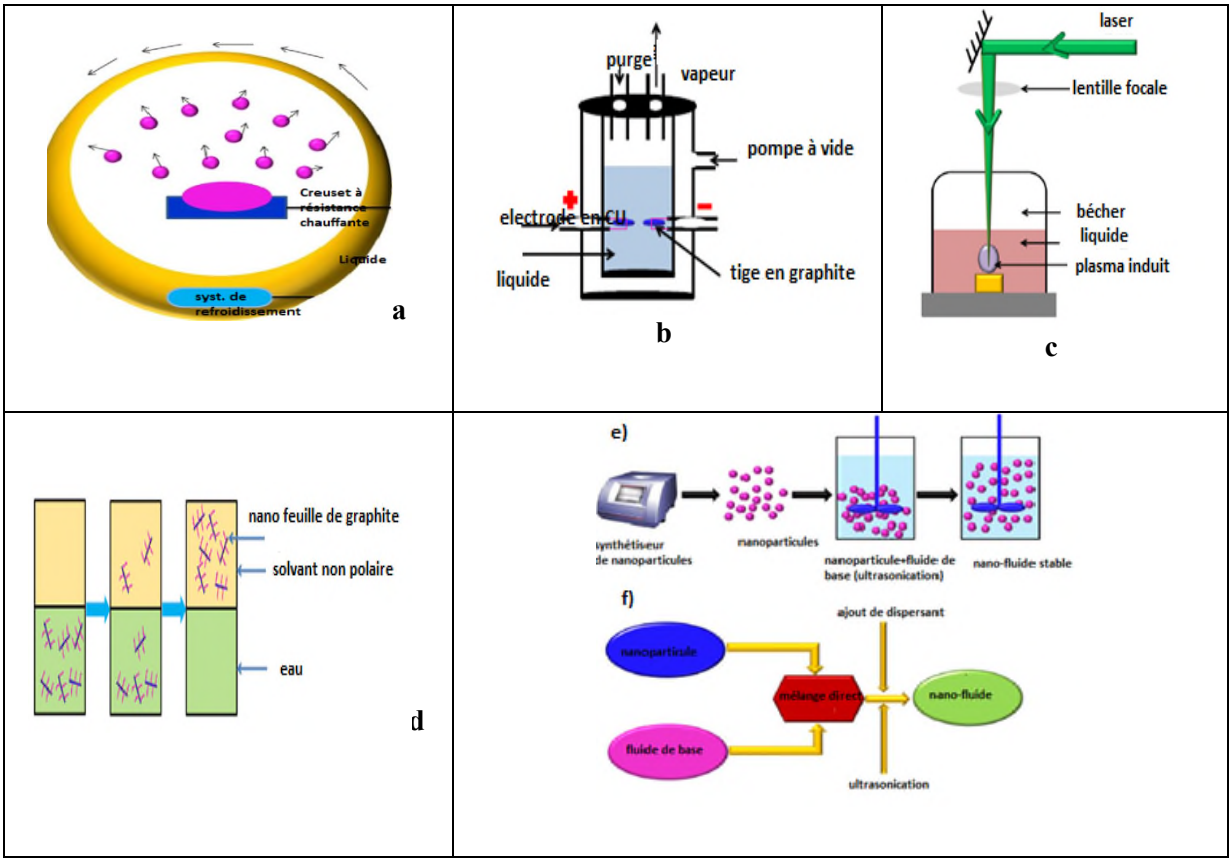


Figure I.2. a) technique d'évaporation directe. b) système de synthèse des nano-particules par arc submergé. c) ablation par laser. d) méthode de transfert de phase. Pour deux étapes : e) 1ère étape. f) 2ème étape. [55]

I.3. Stabilité des nano-fluides

La stabilité est un critère important. Souvent, les nanoparticules ont une tendance d'agglomérer en raison des forces d'attraction de Van Der Waals et sont enclin à la sédimentation en raison de la grande différence de densité entre les nanoparticules et le fluide de base. La stabilité du nano-fluide dépend également des caractéristiques des particules suspendues et du fluide de base. Ainsi d'après la loi de Stokes la vitesse de sédimentation

diminue avec la taille décroissante de la nanoparticule ou encore d'une plus faible différence de densité entre celle de la nanoparticule et du fluide de base, ou enfin le cas d'une viscosité basse

Il existe différentes méthodes d'évaluation de la stabilité du nano-fluide.

- La technique de dispersion de la lumière est une méthode largement répandue pour caractériser les dispersions. La stabilité du nano-fluide est grandement affectée par l'agglomération et la sédimentation provoquées par des attractions de particules. L'agglomération des particules peut également être surveillée en mesurant les variations de la taille des particules et de sa distribution en cours du temps.

  La méthode de dispersion de la lumière dynamique (DLS) mesure directement la taille des particules pour un plus grand volume d'échantillon. Dans la DLS, la lumière de laser est dirigée sur l'échantillon et la lumière du laser dispersée est ensuite collectée. Les avantages de la DLS sont sa capacité de fournir l'évaluation ramenée à une moyenne dans les suspensions, le grand choix accessible de la taille des particules dans la gamme submicronique et acquisition de données rapide.

  Une autre technique de dispersion appropriée pour sonder des nanomatériaux suspendus est le Rayon-X dispersant (SAXS) à petit angle. Cette méthode est puissante pour la solution même avec agglomération.
- La stabilité de la nanoparticule dans le soluté est étroitement liée à ses propriétés électrocinétiques. En général, les nano-fluides stables peuvent être obtenus avec une densité en nanoparticule élevée de charge extérieure sur la surface pour produire des forces répulsives fortes. Par conséquent, l'étude du comportement d'électrophorèse par la mesure du potentiel Zeta devient importante pour comprendre le comportement de dispersion des nano-fluides. La charge extérieure des nanoparticules dans une solution peut être déterminée en utilisant l'analyseur de potentiel de Zeta. Le potentiel de Zeta est la différence potentielle entre le milieu de dispersion et la couche stationnaire du fluide attaché à la particule, et indique le degré de répulsion entre les particules adjacentes. Des nano-fluides avec le potentiel élevé de zeta (positif ou négatif dans la gamme 40-60 mV), sont considérés comme électriquement stabilisés et les colloïdes avec le bas potentiel de zeta tendent à se coaguler, se floculer ou s'agglomérer **[47, 56].**
- La méthode de sédimentation et de centrifugation est la plus simple pour évaluer la stabilité d'un nano-fluide **[57, 58].** Le volume ou la masse du sédiment est une indication de la stabilité. Les fluides sont alors considérés comme stables quand la concentration ou la taille des particules est constante avec du temps.
- L'intensité d'absorptivité et la concentration des nanoparticules dans un fluide sont dépendantes. La stabilité des nano-fluides employant l'analyse - spectrale de force UV est

possible quand les nanomatériaux dispersés dans les fluides ont les bandes d'absorption caractéristiques dans la gamme de longueurs d'onde entre 190 - 1100 nm.

Les nanoparticules du nano-fluide tendent à former des agrégats pour une plus grande taille, qui a comme conséquence la séparation entre le couple sédimentation/phase. Selon la théorie, la stabilité d'une particule en solution est déterminée par la somme de force attractive de Van Der Waals et la force de répulsion de la double couche électrique entre les particules **[59].** Le mécanisme s'explique ainsi : si la barrière d'énergie est insuffisante pour empêcher le système de réaliser un état inférieur d'énergie, les forces attractives régneront et les particules agrégeront. Si par contre, les particules montrent une force de répulsion nette, les suspensions demeureront stables, sans agrégats.

Les particules dispersées peuvent être stabilisées par les forces stériques, électrostatiques ou électro-stériques. Dans le cas de la répulsion stérique, des polymères sont adsorbés sur la surface des nanoparticules produisant une force de répulsion stérique additionnelle. Dans le cas de la stabilisation électrostatique, une charge de surface sera développé sur les nanoparticules à travers l'adsorption préférentielle des ions, dissociation d'espèce chargée par surface, substitution isomorphe des ions, accumulation ou épuisement des électrons sur la surface et adsorption physique d'espèce chargée sur la surface.

Souvent des agents tensio-actifs sont employés pour augmenter la stabilité d'un nano-fluide. L'addition de l'agent tensio-actif abaisse la tension superficielle de du fluide de base et augmente la mouillabilité des nanoparticules car les agents tensio-actifs sont les molécules amphiphiles avec les parties hydrophiles et hydrophobes. Les agents tensio-actifs tendent à se placer à l'interface entre la nanoparticule et le fluide de base, où il présente un degré de continuité entre les nanoparticules et le fluide.

La stabilité colloïdale est directement liée aux propriétés électrocinétiques du nano-fluide et par conséquent le contrôle du pH du nano-fluide permet leur stabilité peut être assurée grâce aux forces de répulsion fortes **[60].** Un nano-fluide d'alumine est stable au pH de 8.0 tandis que celui de cuivre l'est à 9.5 **[61].**

Le bain ultrasonique et l'homogénéisation ont été également employés pour détruire les faisceaux de l'agglomération et pour améliorer la stabilité **[62].**

I.4. Expressions théoriques de la conductivité thermique des nano-fluides

I.4.1 Premiers modèles de la conductivité thermique des nano-fluides

Pour cette raison, les travaux se sont poursuivis tant théoriquement qu'expérimentalement pour trouver sa dépendance avec l'ajout des nanoparticules.

Maxwell **[63],** a le premier dérivé une expression pour la conductivité thermique des mélanges S/L en utilisant la théorie du milieu effectif « Effective Medium Theory ou EMT » en considérant une réponse spatiale électromagnétique homogène **[64].**

La cause principale de l'usage des nano-fluides est attribuée à la conductivité thermique plus avantageuse des nanoparticules dispersées dans le fluide de base à moindre conductivité thermique, **Figure I.3, [65].**

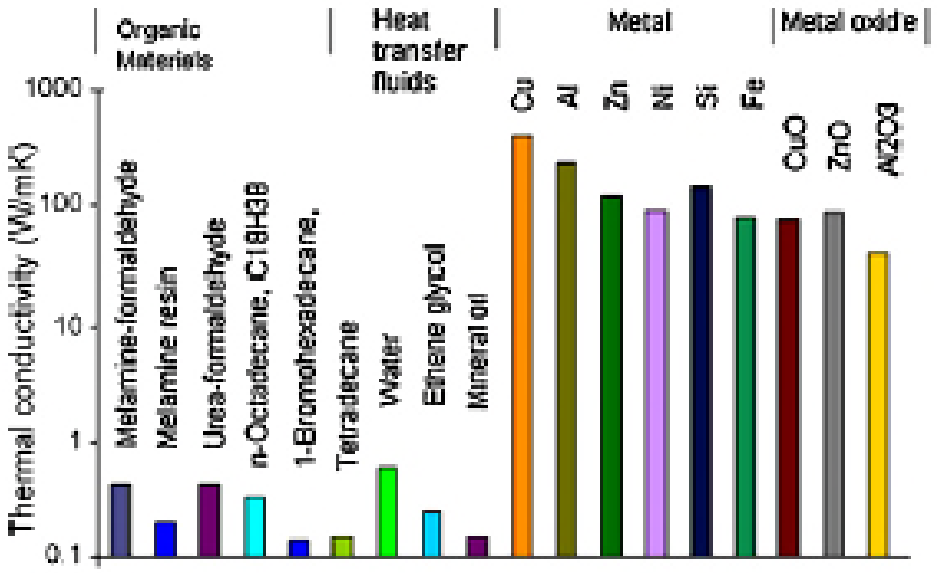


Figure I.3. Comparaison de la conductivité thermique des matériaux [66]

La formulation de base pour les modèles théoriques décrivant la conductivité thermique efficace d'un système à deux composants est que le système constitue une matrice continue dans laquelle des particules (composant discontinu) sont enveloppées. L'EMT a pris comme hypothèse des mélanges dans une condition statique, une fraction de volume faible de particules dans une matrice sans dispersion et sans agglomération **[64].** En utilisant cette approche, la conductivité thermique du nano-fluide (k_{nf}) aux fractions en volume faibles des nanoparticules (φ) sphériques non-interactives est déterminée en considérant les conductivités thermiques du fluide de base (k_f), des nanoparticules (k_p). Aux fractions de volume élevé, le

modèle de Maxwell n'explique pas l'amélioration de k_{nf} en raison de l'interaction entre les particules devient prédominant.

I.4.2 Modifications des modèles de la conductivité thermique des nano-fluides

-En considérant l'interaction inter-particule pour la fraction de volume plus élevé, Bruggeman **[66]** a modifié l'expression de Maxwell.

-Se basant sur le modèle de Bruggeman, Hamilton et Crosser **[67]** ont développé une théorie modifiée de Maxwell pour des systèmes de deux-composants contenant différentes formes de particules et dimensions particulaires s'étendant entre les millimètres et les micromètres.

-Yu et Choi **[68]** ont modifié le modèle de H-C en incluant la couche interfaciale de la particule-liquide pour la prévision de la conductivité thermique des nano-fluides ayant les particules de forme ellipsoïde.

-De même, Xuan et Li **[69]** s'appuient sur le mouvement Brownien de la particule dans le fluide de base pour l'expression de la conductivité thermique.

-Kumar et al. **[70]** ont modifié le modèle du Maxwell afin de prendre en compte la viscosité du fluide de base et de sa dépendance en température.

-Pour Prasher et al. **[71],** c'est la convection due au mouvement Brownien qui sera la base d sa proposition.

-Un modèle de cellules de nano-fluide contenant des nano-fibres de carbone est proposé par Yamada Ota **[72].**

-Hesselman et Johnson **[73]** ont proposé un nouveau modèle pour les nano-fluides dilués, en considérant une barrière à résistance thermique à l'interface des matériaux pour la particule sphérique, cylindrique et plate.

-Jang et Choi **[74]** ont dérivé une expression sur la base de l'épaisseur de couche liquide et du mouvement Brownien de la particule dispersée.

-Wang et al. **[75]** ont aussi modifié le modèle de Maxwell tenant compte de l'effet de la distribution des particules agglomérées.

-Pour les suspensions, Meibodi et al. **[76]** ont employé l'approche de résistance thermique pour établir une expression.

-Une corrélation a été présentée par Corcione **[77]** se basant sur le point de congélation du fluide de base.

Ces expressions ainsi que d'autres les plus couramment citées sont indiquées dans le **Tableau I.1**. Elles sont déduites comme il a été mentionné à partir des considérations du mouvement

Brownien seul ou avec la température, de l'interaction des nanoparticules, du concept de nano-couche inter-faciale, parfois de l'agglomération et de la taille et formes des particules…

Tableau I.1 : Modèles théoriques de la conductivité thermique des nano-fluides.

Auteurs	Expression mathématique de k du nano-fluide
Maxwell [63]	$\frac{k}{k_f}=\frac{1+2\beta\varphi}{1-\beta\varphi}\quad \beta=\frac{k_p-k_f}{k_p+2k_f}$
Bruggeman [66]	$\frac{k}{k_f}=k_f\frac{\left[(3\varphi-1)\frac{k_p}{k_f}+(2-3\varphi)+\sqrt{\Delta}\right]}{4}$ $\Delta=(3\varphi-1)^2(\frac{k_p}{k_f})^2+(2-3\varphi)^2+2(2+9\varphi-9\varphi^2)(\frac{k_p}{k_f})$
Hashin et Shtrikman [78]	$k_f\left[1+\frac{3\varphi[k]}{3k_f+(1-\varphi)k}\right]\le k\le\left[1-\frac{3(1-\varphi)[k]}{3k_p-\varphi[k]}\right]k_p.$
Hamilton et Crosser [67]	$\frac{k}{k_f}=k_f\left[\frac{k_p+(n-1)k_f-(n-1)(k_f-k_p)\varphi}{k_p+(n-1)k_f+(k_f-k_p)\varphi}\right]$
Yu et Choi [68]	$\frac{k}{k_f}=\left(1+\frac{n\varphi A}{1-\varphi A}\right)k_1$ $A=\frac{1}{3}\sum_{j=a,b,c}\frac{k_{pj}-k_f}{k_{pj}+(n-1)k_f}.$
Xuan et Lie [70]	$\frac{k}{k_f}=\frac{k_p+2k_f-2(k_f-k_p)\varphi}{k_p+2k_f+(k_f-k_p)\varphi}k_f+\frac{\rho_p\varphi c_p}{2}\sqrt{\frac{k_BT}{3\pi r_c\mu}}$
Kumar et al. [71]	$\frac{k}{k_f}=k_b+c\frac{2k_BT}{\pi\eta d^2}\frac{\varphi r_b}{k_b(1-\varphi)r_b}k_b.$
Prasher et al. [71]	$\frac{k}{k_f}=\left(1+ARe^m\,Pr^{0.333}\varphi\right)\left[\frac{k_p+2k_f+2(k_p-k_f)\varphi}{k_p+2k_f-(k_p-k_f)\varphi}\right]k_p,$ $h=\frac{k_p}{\alpha(1+ARe^m\,Pr^{0.333}\varphi)},\ \mathrm{Re}=\frac{1}{\nu}\sqrt{\frac{18k_fT}{\pi\rho_pd_p}},$
Yamada et Ota [72]	$\frac{k}{k_f}=\frac{\frac{k_p}{k_f}+K-K\varphi(1-k_p/k_f)}{\frac{k_p}{k_f}+K+\varphi(1-k_p/k_f)}k_f$ $K=2\varphi^{0.2}(l_p/d_p)$

Auteurs	Expression mathématique de k du nano-fluide
Hesselman et Johnson [73]	$\frac{k}{k_f}=\frac{[\alpha(1+2\beta+2)]+2\varphi[\alpha(1-\beta)-1]}{[\alpha(1+2\beta+2)]-\varphi[\alpha(1-\beta)-1]}$
Jang et Choi [74]	$\frac{k}{k_f}=k_f+(1-\varphi)+k_p\varphi+\varphi h\delta_T$
Wang et al. [75]	$\frac{k}{k_f}=\frac{(1-\varphi)+3\varphi\int_0^\infty\frac{k_{cl}(r)n(r)}{k_{cl}(r)+2k_f}dr}{(1-\varphi)+3\varphi\int_0^\infty\frac{k_fn(r)}{k_{cl}(r)+2k_f}dr}$
Meibodi et al. [76]	$\frac{k}{k_f}=\frac{\alpha'\left(1+\frac{\Delta}{d}\right)}{1+\frac{\alpha'\Delta}{d}}\qquad \alpha'=k_p/k_f.$
Corcione [77]	$\frac{k}{k_f}=1+4.4\mathrm{Re}^{0.4}\,Pr^{0.66}\left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10}\left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.03}\varphi^{0.66}$
Avsec et al. [79]	$\frac{k}{k_f}=\left[\frac{k_p+(n-1)k_f-(n-1)\alpha_e(k_f-k_p)}{k_p+(n-1)k_f+\alpha_e(k_f-k_p)}\right]$
Pak et al. [80]	$\frac{k}{k_f}=1+7.47\varphi$
Chandrasekar et al. [81]	$\frac{k}{k_f}=\left[\frac{k_p+(n-1)k_f+(n-1)(1+\beta)^3\varphi(k_p-k_f)}{k_p+(n-1)k_f-(1+\beta)^3\varphi(k_p-k_f)}\right]+\frac{C\varphi(T-T_0)}{\mu k a^4}$
Leong et al. [82]	$\frac{k}{k_f}=\frac{(k_p-k_{lr})\varphi k_{lr}[2\gamma_1^3-\gamma^3+1]+(k_p+2k_{lr})\gamma_1^3[\varphi\gamma^3(k_{lr}-k_f)+k_f]}{\gamma_1^3(k_p+k_{lr})-(k_p-k_{lr})\varphi[\gamma_1^3+\gamma^3-1]}$
Gupta et al. [83]	$k=k_f(0.0556Pe+0.1649Pe^2-0.0391Pe^3+0.0034Pe^4)$
Xie et al. [84]	$\frac{k}{k_f}=1+3\theta\varphi_T+\frac{3\theta^2\varphi_T^2}{1-\theta\varphi_T}$
Timofeeva et al. [85]	$\frac{k}{k_f}=1+3\varphi$

I.5. Effets des grandeurs significatives sur la conductivité thermique suivant les études expérimentales

Les nano-fluides ont été l'objet d'un grand intérêt pendant la dernière décennie principalement due à la conductivité thermique affichée et élevée en rapport du fluide de base et ceci avec un petit pourcentage des nanoparticules **[85-87].** Par exemple, Masuda **[88]** a rapporté une augmentation de la conductivité thermique de 30% avec 4.3 % en volume de nanoparticule d'AlO_3. Eastman et al. **[86]** ont observé plus de 40% dans 0.3 % en volume de CuO. En conséquence, la conductivité thermique des nano-fluides dépend de beaucoup de facteurs tels que la fraction de volume de particules, la composition des particules, la taille et

la forme de la particule, …. Les expérimentateurs ont rapporté ces variations de manière exhaustive. Dans ce qui suit, l'analyse de synthèse est effectuée suivant les données recueillies.

I.5.1 Effet de la concentration

- L'effet de la concentration : plusieurs études prouvent que la conductivité thermique augmente avec le chargement de particules au delà des prévisions de **l'EMT** **[85, 89-96]**, **Tableau I.2**

Tableau I.2 : Effet de la concentration des nanoparticules sur k_{nf} [55].

Nanoparticule /taille (nm)	Fluide de base	Concentra-tion φ %	Augment ation %	Nanoparticule /taille (nm)	Fluide de base	Concentra-tion φ %	Augment-ation %
Al_2O_3	eau	4.3	32	Fe_3O_4/8.7	Kérosène	1.71/5.03	0.6 /12.5
Al_2O_3	Méthanol	0.01/0.37/ 0.5/0.85	6/7/11/14	Fe_3O_4	Kérosène	2 /5	6 /18
Al_2O_3/10	PAO	0.4 /0.8	5 /15	Fe_3O_4/15	Kérosène	0.25 /1	4/32
γ- Al_2O_3	eau + EG	0/0.3/0.6/ 1.1/1.4/	0/0.5/2/3/ 4	Fe_3O_4	EG	0.3	16.5
CuO/10	EG	0.18/0.92/ 1.14	7 /12/14	ZnO/<50 nm	eau	0.02 /0.08	9 /12
CuO/18.6	EG	4	20	ND-Ni/25	eau	0.62 /3.03	3 /20
Cu	eau	0.3	74	ND-Ni/25	EG	0.62 /3.03	0.1 /8
Cu	Tétra décane	0.001/0.01/ 0.015/0.02	2 /6/9/14	CO_3O_4	EG	0/0.01/0.02/0. 03/0.045/0.06	0 /4/9/13/17/23
CuO/< 50 nm	eau	0.01 /0.05	27 /53	TiO_2/13	eau	1 /2/4	8/12/15
Cu/100	eau	2.5 /7.5	23 /78	SiC	eau	0.1 /1/2//3	3.3/3.9/5//7
Cu/100	TO	1.5 / 8	12 /45	N_2 dopé avec du Graphite	eau	0.01 /0.06	24 /33
Ag/200	EG	1	18	Nano-diamant	MO	0.5 /1.9	2.5/12
CNT/ID: 5–10 OD: 20–50	EG Huile	1 2	12 30	Nano-diamant	EG	0.2 /0.85	1 /11
CNT/Dia 10 L 5–10 µm	eau	0.3 /1	2 /10	Graphite	EG	0.05 /0.2	4.1 /11.9
SiC/170	eau	1/4	4 /22	Polyéthylène	Huile de silicone	10	13
Fe/98 nm	eau	0.003/0.002 5/0.01	0/1/5	Nano-fibres de Polyaniline	eau	0.08/0.16/ 0.24	9 /34/37

I.5.2 Effet de la taille et morphologie de la particule

- L'effet de la taille de la particule, **Tableau I.3**, joue un rôle physique important et majeur sur les propriétés des nano-fluides ainsi que sur la stabilité de ces fluides. Quelques auteurs ont montré une augmentation de k_{nf} avec une diminution de la taille

de la nanoparticule **[3, 97-99]** tandis que d'autres rapports ont montré une diminution de cette propriété avec l'augmentation de la dimension particulaire **[85, 100-101].**

- L'effet de la morphologie de la particule : plusieurs études ont montré une augmentation de k_{nf} avec l'augmentation de l'allongement de particules **[102-108],** **Tableau I.4.** Ces résultats expérimentaux suggèrent que la particule ayant un allongement plus élevé est plus favorable à une k_{nf} élevée que la particule sphérique. Ceci est dû au plus grand transfert thermique sur la longueur de la particule.

Tableau I.3 : Effet de la taille des nanoparticules sur k_{nf} [55].

Nanoparticule /fluide de base	Concentration φ %	Taille en mm	Augment-ation %	Nanoparticule /fluide de base	Concentration φ %	Taille en mm	Augment ation %
Al_2O_3/eau	0.5	13/20	7.2/2	Al/eau	1	10/45/150	7/5/2.3
Al_2O_3/eau	0.51	72/115/137	0/2/0.3	Cu/EG	0.03/ 0.0035	12/3	15/3.8
Al_2O_3/eau	0.51	20/50/100	6/5/4				
Al_2O_3/eau	1	11	8	SiO_2/eau	8	10/20/40/60	8/9/9/11
Al_2O_3/eau	2	12/16/282	3.6/5.8/11.5	TiO_2/eau	0.6	82/140/215	3.5/25/1
Al_2O_3/eau	14	36/47	13/17	Ag/EG	1	20/30-50/80	6/6/10
Al_2Cu/eau	0.5	9/20/25/35/ 83	30/23/19/ 12/4	Fe_3O_4/ kérosène	5.5	2.8/3.6/6.1/8.2 /9.5	5/10/17/1 9/22
Al_2Cu/EG	0.5	9/20/25/35/ 83	45/33/27/ 20/10	α-SiC/eau	4.1	16/29/66/90	8/9.8/11. 8/12.4
Al/EG	1	10/45/150	11/6/2	Fe/eau	0.01	37/71/98	7/6/5

Tableau I.4 : Effet de la morphologie des nanoparticules sur k_{nf} [55].

Nanoparticule /fluide de base	Concentration φ %	Morpho-logie	Augmentation %	Nanoparticule /fluide de base	Concentration φ %	Morpho-logie	Augment-ation %
Al_2O_3/eau	1	10nm 80x10nm^2	3.9 5.1	CNT		35Ar	32
				CNT/eau	1	18.8/666Ar	43/108
Al_2O_3/eau/EG	7	Cylindres Briques Plaques	26 24 18	CNT/eau	0.25 en wt. %	SWNT/ DWNT/FW NT/MWNT	21/16/13/ 6
TiO_2/eau	5	15nm 10x40nm^2	29 32	MWCNT/eau	0.24	0.5/1/1.7/5 µm	14/18/38// 48
CuO/huile	0.28	sphères n-rhombic n-barre	4.5 5.3 6.1	CNF/eau	2.5	10/20/40 diamètre	8/6/2.5

I.5.3 Effet de l'agglomération des particules

- Des études récentes indiquent que la conduction efficace de la chaleur par des agglomérés de nanoparticules peut avoir comme conséquence une k_{nf} augmentée **[49, 109-114],** et la sédimentation des agrégats dans les fluides de base, a comme conséquence une k_{nf} dramatiquement diminuée **[115,116].**

-Nasiri et al. [117] ont observé une diminution de k_{nf} avec le temps dû à la formation des agglomérés. Avec le temps, on observe une diminution de k_{nf} de nano eau-Cu et des nano-fluides de CNT dus à la sédimentation et à l'agglomération [115].

-Timofeeva et al. [85] ont montré un plus grand k_{nf} avec le temps dans les nano-fluides eau-AlO_3 dus à la formation de plus grands agglomérés.

I.5.4 Effet du type de la particule

- Il est rapporté par quelques auteurs que plus la particule se caractérise par une conductivité forte, plus celle du nano-fluide le sera aussi. Le **Tableau I.5.** récapitule des valeurs rapportées de k_{nf} / k_f pour des nano-fluides avec les nanoparticules différents.

Tableau I.5 : Effet du type de nanoparticule sur k_{nf} [55].

fluide de base	Concentration φ %	Type de particule	Augmentation %
eau	1	SiO_2/MWCNT/CuO/Al_2O_3/TiO_2	3/11/5/14/3
eau	1.8	Ag_2Al/ AL_2O_3	140/120
Eau+huile de transformateur	2	Al_2O_3/CuO	1.045/1.11
eau	4	Fe_3O_4/ TiO_2 / Al_2O_3/ SiO_2	38/15-30/9-30/9
EG	1	Cu/Fe	60/27
Kérosène	0.01	Fe_3O_4/Ag	2/4
Hexa décane	0.01	Fe_3O_4/Ag	5/5

I.5.5 Effet des additifs et du fluide de base

- Une concentration optimale d'additifs aura pour effet l'augmentation de k_{nf} [86,118-119]. **Tableau I.6.** L'addition de l'agent tensio-actif, même au delà de la concentration optimale n'entraverait pas la conductivité thermique des nano-fluides.
- A mesure que la température était augmentée de 21 à 50 C on constate 2 à 10% d'augmentation en k_{nf} [120]. Cependant, ces variations ne sont pas très importantes.
- Avec des fluides de base à faible conductivité thermique, l'augmentation de k_{nf} est plus grande que dans le cas de k_f plus élevée, [121].
- Quand le pH est élevé, l'augmentation en termes de la conductivité thermique pour le nano-fluide est faible, [121].

Tableau I.6 : Effet de l'ajout des additifs sur k_{nf} [55]

Particule/fluide de base	Concentration φ %	Additifs	Augmentation % Selon poids additif
Al_2O_3/eau	0.08	SDBS	9
Al_2O_3/eau	0.5	SDS/PVA	5-8/3-7
Al_2O_3/eau	4	SDS/NP9	13/18
CuO/EG	4	Acide thioglycolique	40
SiO_2/eau	4	NP9/CTAB	9/10
CNT/eau	1 en wt%	Chitosane	4.3

I.6. viscosité des nano-fluides

La viscosité d'un nano-fluide est un paramètre thermo-physique important pour des applications pratiques puisqu'elle affecte directement la chute de pression. Généralement, l'augmentation de la viscosité en ajoutant des nanoparticules est significative, comme la viscosité dépend également de la fraction en volume des nanoparticules, de la taille des particules, de la température, et de l'agglomération **[122].** La plupart des travaux indiqués dans la littérature sont des investigations d'ordre plus expérimentales que théoriques.

Sur la base des données expérimentales, il est possible de classifier le comportement rhéologique des nano-fluides en quatre groupes :

- Nano-fluides dilués (φ < 0.1%) l'expression d'Einstein convient
- Nano-fluides semi-dilués (φ = 0.1- 5%) l'expression de Krieger et Dougherty est valable
- Nano-fluides semi-concentrés (φ = 5 - 10%) avec l'expression de Krieger et Dougherty modifiée
- Nano-fluides concentrés (φ > 10 %) peu utilisés.

Dans le **Tableau I.7** des expressions de la viscosité des nano-fluides sont données en relation étroite avec la classification ci-dessus.

I.7. Densité et chaleur spécifique des nano-fluides

Wen et Ding **[132],** ont proposé la détermination de la densité des nano-fluides suivant la loi simple de mélange : $\rho_{nf} = \varphi\rho_p + (1 - \varphi)\rho_f$

Il a été observé qu'une déviation est plutôt < 5% si la charge du nano-fluide atteint 5%.

De même, pour la chaleur spécifique, on utilise $c_{p,nf} = \varphi c_{p,p} + (1-\varphi)c_{p,f}$

ou encore en combinant $(\rho c_p)_{nf} = \varphi(\rho c_p)_p + (1-\varphi)(\rho c_p)_f$.

Tableau I.7 : Viscosité des nano-fluides.

Auteurs [domaine de validité]	Expression mathématique de la viscosité du nano-fluide
Einstein [solutions diluées et particules sphériques] [123]	$\mu_{nf} = (1+2.5\phi)\mu_f$
Brinkman [pour max concentration] [124]	$\mu_{nf} = \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}}\mu_f$.
Batchelor [extension de celle d'Einstein] [125]	$\mu_{nf} = \left(1 + C_1\phi + C_2\phi^2\right)\mu_f$.
Chandrasekar et al. [celle de Batchelor modifiée] [126]	$\mu_{nf} = \left(1 + C_1\phi + C_2\phi^2 + C_3\phi^3\right)\mu_f$
Nguyen et al. [127]; Maiga et al. [128] ; Rea et al. [129] [spécifiques]	$\mu_{nf} = \left(1+2.5\phi+150\phi^2\right)\mu_f$, pour 36 nm Al_2O_3-eau ; $\mu_{nf} = \left(0.904e^{0.148\phi}\right)\mu_f$, pour 47 nm Al_2O_3-eau ; $\mu_{nf} = \left(2.1275 - 0.0215T + 0.0002T^2\right)\mu_f$. pour 1-9.4 vol.% Al_2O_3-eau ; $\mu_{nf} = (1.125 - 0.007T)\mu_f$ pour 1-9.4 vol.% CuO-eau ; $\mu_{nf} = \left(1 + 7.3\phi + 123\phi^2\right)\mu_f$ ou $\mu_{nf} = \left(e^{4.91\phi/0.2092-\phi}\right)\mu_f$. pour 0-6. vol.% Al_2O_3-eau
Esfe et al. [spécifique] [130]	$\mu_{nf} = \left(1 + 11.61\phi + 109\phi^2\right)\mu_f$ pour 40 nm MgO-eau
Krieger et Dougherty [131]	$\mu_{nf} = \left(1 - \frac{\phi_{agg}}{\phi_{max}}\right)^{-\mu\phi_{max}}\mu_f$
Corcione [77]	$\mu_{nf} = \left(1 - 34.87\left(\frac{d_p}{d_f}\right)^{-0.3}\phi^{1.03}\right)^{-1}\mu_f$

I.8. Applications réelles et potentielles des nano-fluides

I.8.1 Introduction

L'énergie a été évaluée pour le monde et se situe la plus importante pour les 50 années à venir, en particulier, le défi sérieux des 30 Térawatts à atteindre tout en atténuant l'émission de carbone et le chauffage global. La fixation de l'énergie propre est devenue la première priorité de la plupart des pays développés. Fondamentalement, la conversion d'énergie et le transport se produisent à l'échelle atomique et on s'attend à ce qu'à ces niveaux, la nanoscience et la nanotechnologie moléculaires jouent un rôle significatif en revitalisant les industries traditionnelles d'énergie et en stimulant les industries naissantes d'énergie renouvelable.

Parmi toutes les formes d'énergie nous employons aujourd'hui, plus de 70% sous forme de chaleur. Dans beaucoup de systèmes industriels, la chaleur doit être transférée à l'énergie d'entrée dans un système ou enlever l'énergie produite dans un système. Vu l'augmentation

rapide de la demande énergétique mondiale, le procédé d'intensification de transfert thermique et la réduction de la déperdition d'énergie due à l'utilisation inefficace sont devenus une tâche de plus en plus importante. Le déplacement et le contrôle de la chaleur sont les défis exigeants dans certains systèmes élevés de flux de chaleur tels que la fission nucléaire, la fusion, les systèmes mécaniques de micro/nanoélectroniques (MEMS/NEMS), l'intensification des procédés ainsi que les micro-réactions chimiques **[133].**

I.8.2 nano-fluides et échangeurs à plaques

Les concepteurs des échangeurs à plaques se sont attelés à la recherche d'une nouvelle substance qui pourrait plus loin contribuer à augmenter l'exécution de ces importants équipements plutôt que de la conception conventionnelle. C'est pourquoi, ces derniers temps, la miniaturisation des PHE (« Plate Heat Exchangers » et l'efficacité énergétique sont devenus un point focal de l'attention de la recherche. Tout en explorant pour de meilleurs remplacements, les nano-fluides sont les substituants probables aux fluides conventionnels, caractérisés par de plus grandes capacités d'absorber la chaleur et de transport de la chaleur. Il y a deux causes principales qui rendent l'utilisation plus large des nanoparticules, c'est une plus grande puissance de pompage et un coût élevé de nano-fluides. La communauté scientifique, cependant, a convenue en grande partie, sur le fait que les nano-fluides ont un grand potentiel pour le perfectionnement du transfert thermique et sont fortement appropriés à l'application dans différents types d'échangeurs de chaleur **[134].** .

I.8.3 nano-fluides à base de carbone

Les résultats des nano-fluides à base de carbone sont très prometteurs quant à leurs capacités de transfert thermique. En général, le transfert convectif par le biais d'un nano-fluide est plus important que le gain explicité par l'augmentation de la conductivité thermique. Les applications de ce type de nano-fluide vont directement vers l'absorption plus grande et sont donc orientés vers l'énergie solaire et les systèmes de capteurs solaires. La recherche est actuellement concentrée vers la modification des propriétés d'absorption/dispersion avec une sélectivité spectrale pour les diriger vers des applications différentes et convenables **[135].**

I.8.4 refroidissement des moteurs

Le refroidissement des moteurs par les nano-fluides a retenu l'attention des designers de cette industrie. Les nanoparticules sont déjà utilisés dans les huiles des moteurs et de transmission

ainsi que refroidisseurs dans les radiateurs afin d'évacuer la chaleur des véhicules. Le radiateur joue un rôle vital contre la surchauffe des moteurs due aux frottements. Conventionnellement, des ailettes fines les munissent et des additifs sont ajoutés dans le liquide pour éviter le gel par déplacement du point de congélation, dans les régions et pays de conditions extrêmes de froid.

Mais ces procédés ont atteint leurs limites et les nano-fluides se positionnent pour remplacer les liquides de refroidissement.Il a été expérimenté la performance des moteurs 4WD de Mazda, avec 4 vitesses de rotation (400, 800, 1200 et 1600 rpm) avec un nano-fluide (CuO puis Al_2O_3 comme nanoparticules plus un anti-moussant) au niveau de l'huile de transmission. Le meilleur transfert est obtenu avec CuO et cette lubrification avait réduit le frottement, mais l'optimum en nanoparticules n'est pas déterminé mais admis autour de 1%. Par ailleurs, l'évacuation de chaleur par ces nano-fluides peut atteindre 50% de plus mais l'efficacité est limitée par les pertes de charges **[136].**

I.8.5 Domaine de l'énergie solaire

L'énergie solaire est candidate pour pallier aux énergies fossiles décroissantes, jointe aux changements climatiques et aux émissions de gaz nocifs. A cet effet, il est avantageux d'utiliser les nano-fluides dans les systèmes de capteurs solaires concentrés ou plans et actuellement largement trouvés dans le chauffage de l'eau, le dessalement des eaux chargées ou encore dans le refroidissement ou chauffage en espace.

Les systèmes photovoltaiques hybrides sont constitués des panneaux PV ou modules d'une part et des systèmes d'extraction de chaleur refroidis d'autre part, et là aussi l'interet des nano-fluides n'est pas à démontrer.
Les nano-fluides ont été introduits comme solution viable pour améliorer les propriétés thermiques telles la chaleur spécifique. Ajoutant 9% en poids de nanoparticules d'Al à la parrafine (avec un dispersant SDBS à 0.5% en poids) a permis d'améliorer les propriétés de la parrafine pour les applications de stockage thermique **[137].**

I.8.6 Défis d'applications

Les applications spécifiques des nano-fluides se trouvent dans le refroidissement des moteurs, le chauffage solaire, le refroidissement des composants électroniques, refroidissement des huiles des transformateurs, pour l'amélioration de l'efficacité des

générateurs diesel, le refroidissement des dispositifs échangeant la chaleur, l'amélioration de l'efficacité du transfert thermique des réfrigérateurs, réfrigérateur-congélateurs domestiques, le refroidissant en usinage, dans les réacteurs nucléaires, la défense et l'espace .

En se basant sur les résultats disponibles dans la littérature, il a été trouvé que les nano-fluides ont une conductivité thermique beaucoup plus élevée et parfois fortement température-dépendante aux concentrations très basses des nanoparticules que les fluides conventionnels.

Des exemples de la façon dont la nanotechnologie peut être intégrée dans chacun de ces secteurs technologiques sont accentués dans les applications spécifiques suivantes **[138]:**

• Refroidissement de moteur.

• Huile de transmission de moteur.

• Dans le générateur électrique diesel en tant que chemise à liquide réfrigérant.

• Récupération de la fumée d'échappement de chaudière.

• Chauffage et refroidissement des bâtiments.

• Refroidissement des composants électroniques.

Les microprocesseurs sont continuellement devenus plus petits et plus puissants, et en conséquence les demandes de transfert de la chaleur ont augmenté menant à de nouveaux défis dans la gestion thermique. La stratégie qui consiste augmenter la surface pour améliorer le transfert ne peut pas être utilisée dans les microprocesseurs et les systèmes micro-électromécanique (MEMS) parce que le secteur ne peut pas être augmenté.

• Refroidissement des soudures.

• Nano-fluides dans les huiles de refroidissement de transformateur.

• Refroidissement des systèmes nucléaires.

La température maximale dans un réacteur nucléaire doit être gardée au-dessous d'une certaine valeur pour éviter des réactions et la fusion et d'emballement. Par conséquent, l'augmentation de cette température peut seulement être réalisé en diminuant la température du liquide du réfrigérant. Cependant, ceci réduirait le taux de la réaction nucléaire et diminuerait l'efficacité du processus **[138].**

• Chauffage d'eau solaire.

• Réfrigération (réfrigérateur, réfrigérateurs domestiques).

• La défense.

• L'espace.

• Lasers de haute puissance, tubes à micro-ondes.

• Applications biomédicales.

Les nano-fluides sont maintenant développés pour des applications médicales, y compris la thérapie de cancer. Les nanoparticules peuvent être employées comme véhicule de livraison des drogues ou porteurs du rayonnement sans endommager les tissus sains voisins par guidage des particules vers le haut du jet de sang aux endroits de la tumeur au moyen des aimants. De plus, les nano-fluides pourraient être employés pour produire les températures plus élevées autour des tumeurs, pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines voisines **[139].**

• Forage.

• Lubrifications.

• Stockage thermique.

• Réductions des frottements.

I.8.7 Applications spécifiques

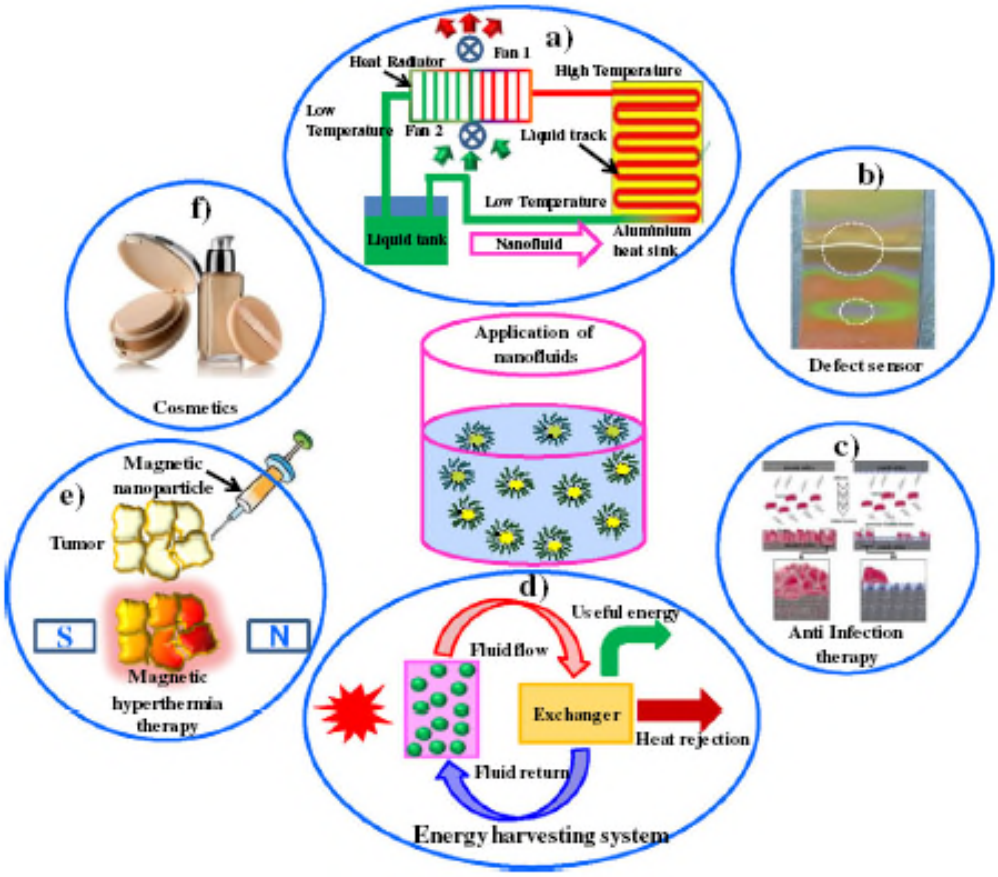


Figure I.4. Représentation des applications spécifiques des nano-fluides : (a) transfert thermique [141], (b) capteurs de defaults [142], (c) thérapies anti-infection [143], (d) système de récupération d'énergie [144], (e) thérapie hyperthermique magnétique [145] et (f) cosmétiques.

Récemment, la projection de la technologie des semi-conducteurs a projeté que, d'ici 2018, les circuits intégrés à rendement élevé contiendront plus de 9.8 milliards de transistors sur une surface de puce de 280 mm^2, soit plus que 40 fois autant que les puces d'aujourd'hui de 90 nm-nodale. On a projeté que de futurs processeurs pour les ordinateurs à rendement élevé et les serveurs dissiperont une puissance plus élevée dans la gamme de 100-300 W/cm^2 **[140].** Par ailleurs, des applications très spécifiques sont également envisagées, **Figure I.4.**

PARTIE I ***CHAPITRE II***

Nano-fluides & Mécanismes

II.1 Introduction

Une faible concentration de nanoparticules, une fois dispersé uniformément et stable dans un fluide de base, peut fournir des améliorations impressionnantes des propriétés thermiques des fluides de base. Les nano-fluides, qui sont un mélange colloïdal des nanoparticules et un liquide de base est d'abord découvert par Choi en 1995 **[146],** au laboratoire d'Argonne pour décrire la nouvelle classe en nanotechnologie des fluides utilisés pour le transfert thermique et qui présentent les propriétés thermiques supérieures.

Les phases dans le colloïde sont distinguables et interagissent avec les faibles forces moléculaires extérieures faibles sans réaction chimique. Comparé aux particules d'ordre du micromillimètre, les nanoparticules sont conçues pour avoir de plus grandes superficies relatives, de mobilité élevée, une meilleure stabilité de suspension et pour augmenter d'une manière primordiale la conductivité thermique du mélange.

La constitution intrinsèque du nano-fluide permet de caractériser le mélange, de prédire son comportement en passant par la connaissance des phénomènes internes.

II.2 Problématique du comportement des nano-fluides

II.2.1 Phénomènes physiques

En examinant les phénomènes physiques impliqués pour ces mélanges, il est intéressant de relever certains effets:

Le rapport de la conductivité thermique du nano-fluide à celle du fluide de base dépend du type de nanoparticule, de sa taille et forme, concentration de volume et la température de fonctionnement, **[147].**

- L'influence du type de nanoparticule est conséquente si cette dernière est de conductivité thermique élevée. Par exemple, l'emploi des particules en métal est plus important en termes de conductivité thermique que pour les particules d'oxyde de métal. Cependant, il est difficile de créer des nano-fluides de particules en métal sans qu'elles s'oxydent pendant le procédé de production. Il s'agit donc d'éviter cela pendant la production ou encore pendant l'utilisation.
- Une augmentation de la conductivité thermique du nano-fluide sera obtenue avec une taille réduite des nanoparticules en raison de la surface au rapport de volume.

- La forme géométrique le plus généralement utilisée des particules est sphérique et cylindrique. Les particules cylindriques montrent une augmentation due à une maille constituée par les particules assez longues en forme et qui conduisent la chaleur.
- De même, la conductivité thermique augmente avec une concentration accrue du volume de particules. On constate une amélioration jusqu'à 40% pour une concentration inférieure à 1.5% de particules métalliques, tandis que 4-5% seront nécessaires pour atteindre 30% avec les oxydes de métaux.
- La conductivité thermique des nanoparticules est plus sensible à la température que celle du fluide de base. En conséquence, une dépendance forte de la conductivité thermique du nano-fluide y est aussi relevée suivant le type de particules et ceci est dû au mouvement aléatoire des nanoparticules.

L'examen critique sur la conductivité thermique des nano-fluides révèle qu'il a été proposé une longue liste de phénomènes physiques pour expliquer l'augmentation observée expérimentalement, **[148].** La liste comme indiqué plus haut, inclut la concentration en volume, la taille des nanoparticules, la surface spécifique, l'effet de la température qui cause le mouvement Brownien, et la formation des faisceaux d'agrégats. D'autres promoteurs ou modérateurs tels le champ magnétique causant l'alignement de particules de nanoparticule, le pH favorisant la stabilité de la suspension ainsi que les stabilisants pour la tension superficielle sont potentiellement cités comme des effets inducteurs.

II.2.2 Données expérimentales et propositions de mécanismes

Comme représenté sur la **Figure II.1**, un certain nombre de données de conductivité thermique des nano-fluides sont complètement hors du modèle conventionnel issu de la théorie classique de Maxwell, Il s'agit des données expérimentales relevées par plusieurs expérimentateurs et qui montrent que l'EMT ne représente pas tout à fait les conductivités thermiques des nano-fluides.

Comme représenté à titre illustratif, sur la **Figure II.2**, la théorie de Maxwell sous-estime tout à fait l'importance de l'amélioration de la conductivité thermique des nano-fluides à particules métalliques, notamment. De plus, comme représenté sur les **Figures II.3 et II.4**, ceci a conduit expérimentalement à la découverte de similaires et imprévisibles dépendances

selon la température, **[3, 87, 89, 149-150],** la dépendance avec ou inverse de la taille des nanoparticules, **Figures II.5** et **II.6**, **[3, 97, 150-152]** et la dépendance au pH.**[153-154].**

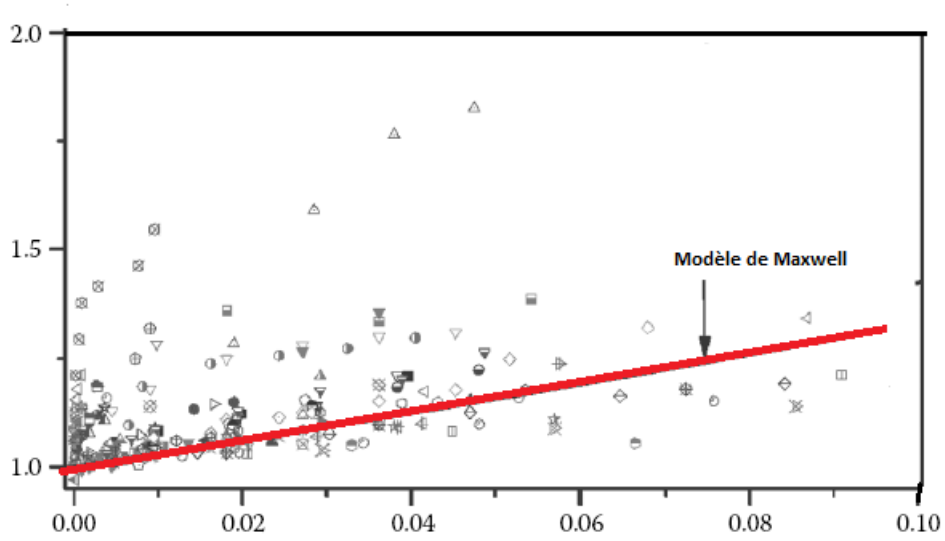


Figure II.1 Conductivité thermique relative/ βϕ des nano-fluides pour les oxydes métalliques (Al_2O_3+eau ; Al_2O_3+EG ; Al_2O_3+huile ; ZnO+eau ; ZnO+EG ; TiO_2+eau ; TiO_2+EG ; CuO+eau ; CuO+EG)

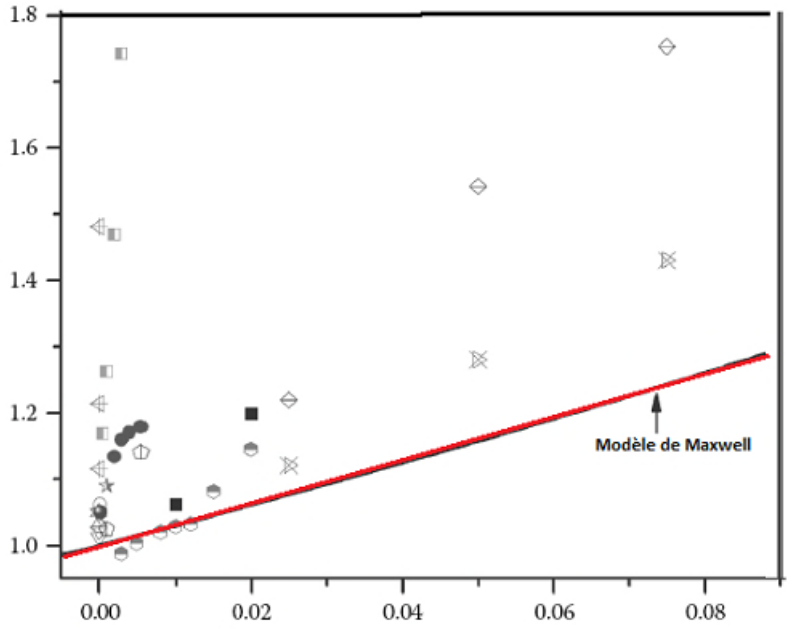


Figure II.2 Conductivité thermique relative/βϕ des nano-fluides pour les métaux (Au+eau ; Ag+EG ; Cu+huile ; Cu+eau ; Cu+EG)

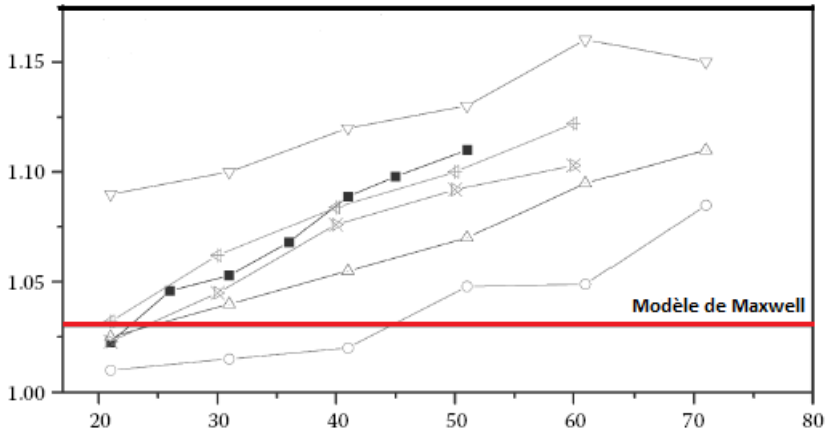


Figure II.3 Conductivité thermique relative/température (°C) du nano-fluide Al_2O_3 +eau ; ϕ=1%, Taille des particules de 11-150nm

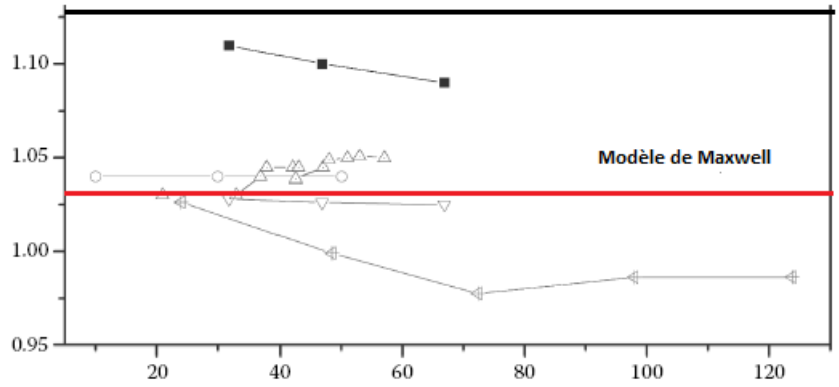


Figure II.4 Conductivité thermique relative/température (°C) du nano-fluide Al_2O_3 +eau ; ϕ=1%, Taille des particules de 12-38.4 nm

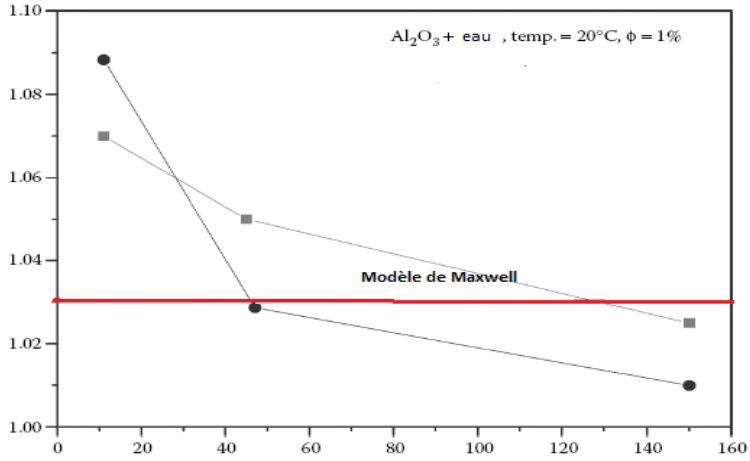


Figure II.5 Conductivité thermique relative/taille de particule (nm)

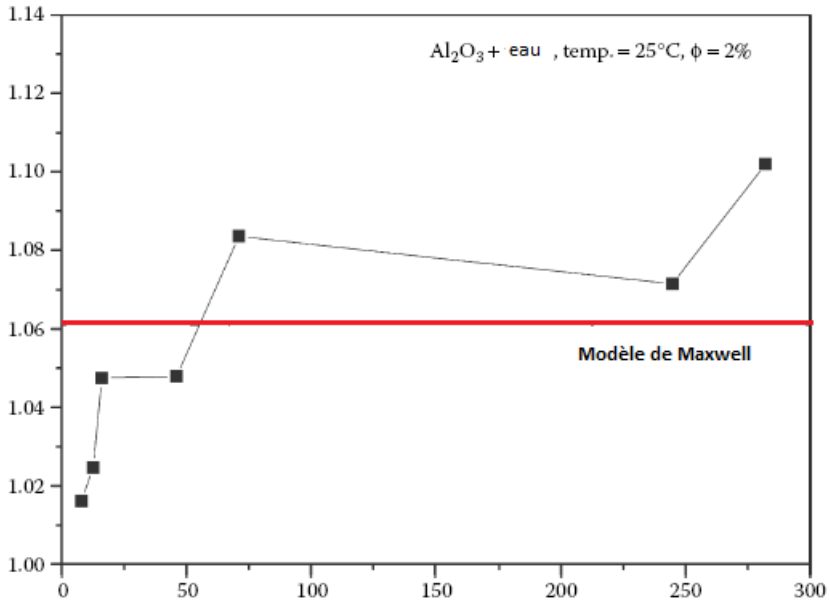


Figure II.6 Conductivité thermique relative/taille de particule (nm)

Par conséquent, de nombreux mécanismes ont été expérimentalement, théoriquement, et numériquement proposés afin de prévoir l'exactitude de la conductivité thermique des nano-fluides. Or, les mécanismes de conduction thermiques des nano-fluide sont proposés avec beaucoup d'incertitudes. Des discussions sont animées, dues à la controverse dans les données de conductivité thermique rapportées par chaque groupe. Par exemple, comme représenté sur les **Figure II.4** et **II.6**, quelques chercheurs ont récemment rapporté que la conductivité thermique des nano-fluides ne dépend pas de la température, **[155, 85]** et est directement proportionnelle à la taille particulaire, **[156, 157].** Là aussi, il ya des résultats controversées, **Figure II.5** et **Figure II.6.**

La controverse des données expérimentales observée peut être expliquée en raison des divers paramètres affectant la conductivité thermique des nano-fluides tels que la taille, la température, la qualité de la suspension en termes de stabilité, et le pH, et qui ne sont pas bien élucidés. L'incertitude élevée des dispositifs de mesure est également l'une des causes. Bien qu'il y ait beaucoup de diversité sur les données des nano-fluides, on montre clairement que les théories moyennes efficaces conventionnelles (EMTs) comme le modèle de Maxwell ne sont pas suffisantes pour expliquer les comportements thermiques des nano-fluides, **[158].** Par conséquent, un certain nombre de mécanismes et modèles ont été et continuent d'être proposés et discutés.

Des travaux expérimentaux sur la conductivité thermique des nano-fluides, il devient évident que les nanoparticules se comportent individuellement et collectivement en drainant leurs énergies particulaires ainsi qu'y a des les frottements et des chocs …. , et que l'explication simplificatrice par la théorie de l'EMT n'est plus suffisante. Des améliorations seront donc nécessaires, **[55].**

II.3 Propositions de mécanismes

Keblinski et al. **[2]** ont proposé quatre mécanismes possibles pour la conductivité thermique des nano-fluides notamment

- Mouvement Brownien des nanoparticules
- Existence d'une nano-couche moléculaire du liquide à l'interface liquide/particule
- Prise en compte du transport de la chaleur par les nanoparticules
- Agglomération des nanoparticules.

En conséquence, plusieurs modèles théoriques ont été avancés pour tenir compte de l'effet du mouvement Brownien **[70-71, 159-161],** de la nano-couche liquide **[84, 162-163]** et de l'agglomération des nanoparticules **[49, 75, 164].**

II.3.1 Mouvement Brownien des nanoparticules

Le mouvement Brownien permet le transport solide-solide direct de la chaleur d'une particule à l'autre, ayant pour résultat une augmentation de la conductivité thermique. Il est caractérisé par la constante de diffusion des particules D, donnée par la formule de Stokes-Einstein. En comparant l'échelle de temps du mouvement de particules à la diffusion de la chaleur dans les liquides, l'effet du mouvement brownien sur la conductivité thermique peut être déterminé. Le mouvement brownien de la nanoparticule est assez lent pour transporter une quantité significative de la chaleur par un nano-fluide. Par contre, le mouvement Brownien des particules peut influencer le groupement des particules qui peut influencer l'augmentation de la conductivité thermique.

II.3.2 Nano-couche moléculaire du liquide à l'interface liquide/particule

Dans le mélange ie. nano-fluides, les molécules liquides près d'une particule sont connues pour former les sous-couches qui se comportent comme des solides **[84].** Bien que l'épaisseur

de cette couche liquide soit de l'ordre du nanomètre, on pense qu'elle peut jouer un rôle important dans le transport de la chaleur du solide au liquide adjacent **[2, 68-165].** En raison de la plus grande surface spécifique des nanoparticules, on obtient une plus grande conduction de chaleur, **Figure II.7.**

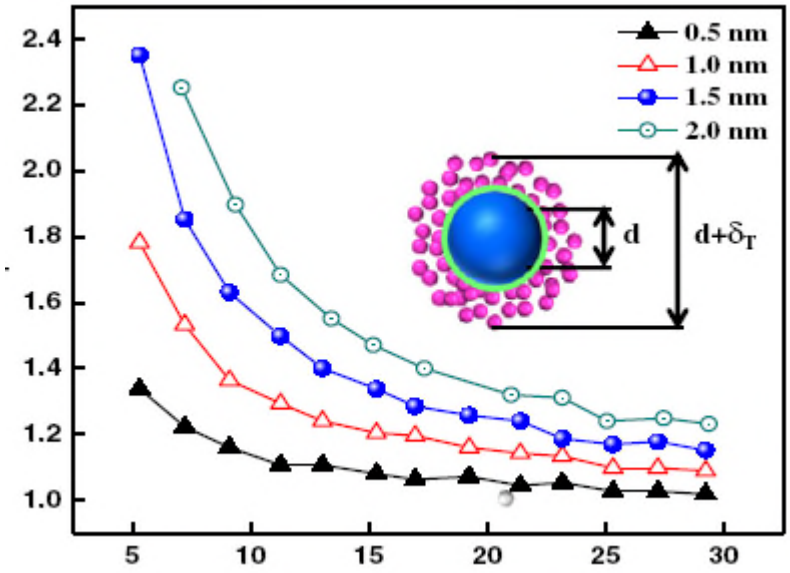


Figure II.7. Augmentation de la conductivité thermique effective selon la taille de la nanoparticule d due à la nano-couche liquide et à l'interface nanoparticule/fluide de base [55, 166]

II.3.3 Transport de la chaleur par les nanoparticules

Dans les solides cristallins, la chaleur est transportée par la propagation des phonons de vibrations ou phonons, qui sont créés aléatoirement, se propagent dans des directions aléatoires, et sont dispersés les uns des autres **[2].** Due au libre parcours moyen du phonon de 1-2 nm, sa diffusion sur une particule de diamètre de 10 nm n'a pas lieu, mais le transport balistique est possible, **Figure II.8.**

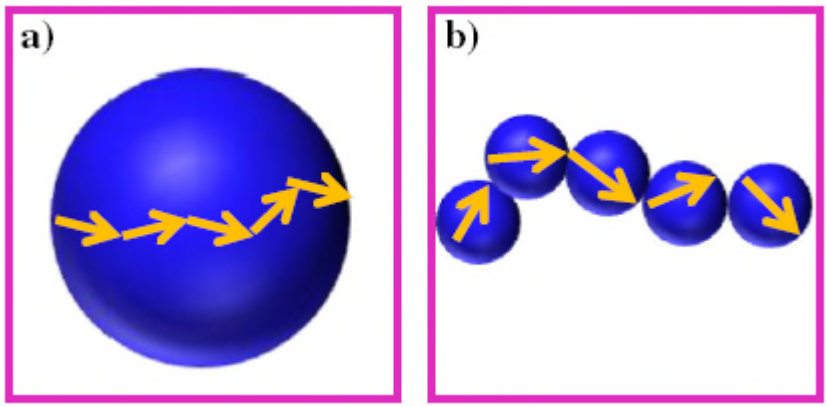


Figure II.8. Schémas de transport par particule (a) diffusive et (b) balistique ….par phonons [2].

II.3.4 Agglomération des nanoparticules.

L'agglomération des nanoparticules peut créer des chemins de moindre résistance thermique et une augmentation de la conductivité thermique est attendue. Dans la **Figure II.9.** Il est compréhensible que vers les faibles concentrations du nano-fluide en nanoparticules, le volume de « cluster » augmente se répercutant rapidement en conduction et par conséquent en meilleure conductivité thermique.

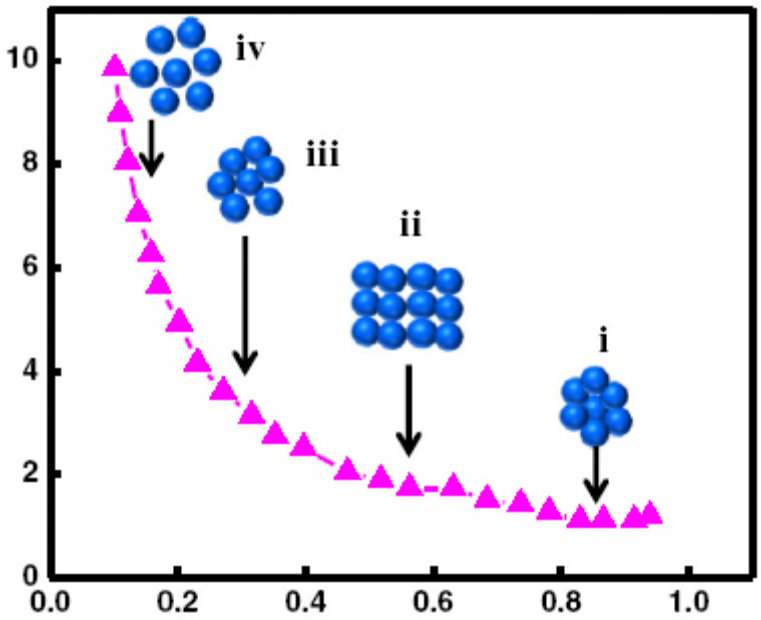


Figure II.9. Rapport des conductivités thermiques k_{nf} / k_f en fonction de la concentration des nanoparticules.
Schémas d'agglomération (de droite à gauche) (i) forte concentration des particules (ii) cubique simple (iii) structure irrégulière avec perte de concentration mais avec contact (iv) groupes séparés par les nano-couches liquides minces pour un transfert rapide [2].

II.3.5 Autres mécanismes.

La conductivité thermique dépend également d'autres mécanismes pour le mouvement de particules .

- Dispersion

  La dispersion est un système dans lequel des particules sont dispersées dans une phase continue de composition différente. Les agents tensio-actifs peuvent augmenter considérablement la stabilité cinétique des émulsions de sorte que, une fois formée, l'émulsion ne change pas sensiblement. Certains des agents tensio-actifs sont les thiols **[167],** l'acide oléique **[168, 169],** les sels de l'acide laurique, etc…Pak et Cho **[80],**

Xuan et Li **[170]** et d'autres ont affirmé que l'augmentation anormale de la conductivité thermique est due à la dispersion uniforme des nanoparticules.

- Intensification de la turbulence

  Quoique la conductivité thermique soit une fonction des variables primaires telles que la pression et la température, dans un écoulement turbulent la conductivité thermique efficace due aux effets des remous turbulents est beaucoup de fois plus grande que la valeur réelle. Par rapport aux nano-fluides, on croit qu'une telle intensification est possible et due à l'addition des nanoparticules. Xuan et Li **[170].** Cependant, Buongiorno **[171]** a expliqué qu'en raison de la dimension particulaire, les effets de la dispersion et de la turbulence peuvent être négligés et ainsi n'explique pas l'amélioration de la conductivité thermique des nano-fluides.

- Nano-convection du au mouvement Brownien

  C'est un mouvement apparemment aléatoire des particules suspendues dans un liquide ou le gaz et le mouvement est dû aux collisions avec les molécules. Ainsi, le mouvement Brownien s'intensifie avec une augmentation de la température selon la théorie cinétique des particules. Keblinski et al. **[2]** et Koo et Kleinstreuer **[172]** ont suggéré que le mécanisme potentiel pour une plus grande conductivité thermique soit le transfert de l'énergie des particules chaudes aux moins chaudes dû à la collision des particules. Il est à noter que L'efficacité du mouvement Brownien diminue avec une augmentation de la viscosité.

- Thermophorèse

  Ou l'effet Soret qui est un phénomène observé quand dans un mélange de deux types ou plus de particules mobiles, est soumis à la force d'un gradient de température. Le phénomène est plus significatif dans la convection naturelle. Les particules se déplacent dans la direction de la température décroissante et le processus du transfert thermique augmente avec une diminution de la densité.

- Diffusiophorèse (« Osmo-phoresis »)

  Se produit quand il y a une migration des particules d'une zone de concentration faible à une concentration plus élevée. Cependant, ce n'est pas un état favorable puisque les nano-fluides peuvent perdre leurs caractéristiques de non-agglomération. Buongiorno **[172]** a souligné que le mouvement Brownien, la thermophorèse et la diffusiophorèse sont significatifs en l'absence des remous turbulents.

D'autres effets tels inertie, effet Magnus, drainage du fluide, gravité… ont retenu l'attention des chercheurs mais de manière peu importante.

II.4 Travaux à partir des mécanismes

Pour expliquer la conduction des nano-fluides, on peut d'abord diviser les mécanismes en deux groupes, puis en les combinant :

- En considérant des nanoparticules fixes, ce qui suppose un mécanisme statique. Dans ce groupe, on a la théorie classique ou EMT, le concept de nano-couche et l'agglomération.
- En considérant une mobilité des nanoparticules suivant le mouvement Brownien induisant la nano-convection, ce qui mène vers un mécanisme dynamique.
- Par combinaison des mécanismes statique et dynamique.

II.4.1 Mécanismes statiques MS

- **EMT** classique ou « effective medium theory » est une approximation analytique pour prédire les propriétés d'un mélange à partir des propriétés de ses composants en relation avec leurs fractions relatives. Pour les nano-fluides, les modèles bases sur l'EMT peuvent être classifiés dans le groupe statique en raison de la dispersion stationnaire attribuée aux nanoparticules dans le fluide de base; **Figure II.10**.

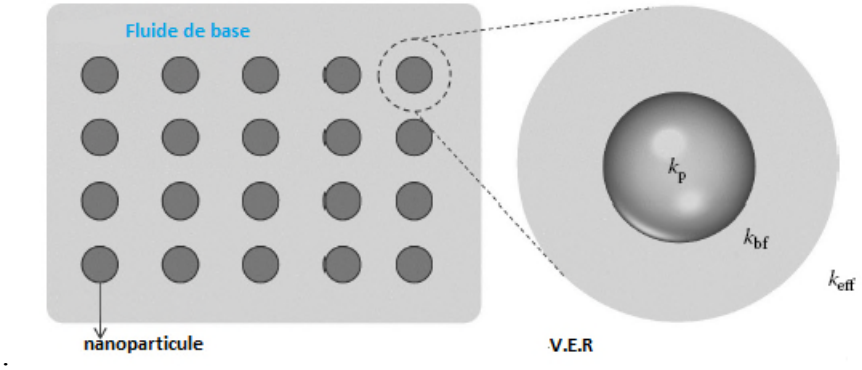


Figure II.10 Représentation de l'EMT

Le modèle de Maxwell tient compte seulement de la concentration (si elle est peu importante) en volume des nanoparticules car le rapport k_p/k_f est élevé. Il est utilisé

pour les suspensions diluées au mieux micro-millimétrique en particules. Les développements ultérieurs sont indiqués dans le **Tableau II.1**

Tableau II.1 Développements de modèles à partir de « l' EMT »

Auteurs de modèles	***Particularités du modèle***	***Usage / défauts***
Bruggeman **[66]**	Basé sur EMT-symétrique ; prise en compte des interactions entre les particules.	Grandes concentrations $k_p/k_f>100$
Hamilton et Crosser **[67]**	Les particules sont de forme quelconque-EMT	
Hashin et Shtrikman **[78]**	k_{nf}/k_f est entre celui de Maxwell et structure de chaine-agglomérée pour la limite sup. EMT	Structure non commune pour concent. diluées
Haselman et Johnson **[73]**	Formes diverses et résistance thermique inter-faciale. EMT	
Nan et al. **[173]**	EMT généralisée avec taille et forme des particules, résistance de Kapitza.	

- **Interface de nano-couche entre fluide et nanoparticule -INC**

Le concept de nano-couche a été présenté par Keblinski et al.**[2]** et Yu et Choi **[163]** se basant sur les résultats expérimentaux, **[174].** Yu et Choi ont proposé la première fois le modèle de conductivité thermique avec le concept de nano-couche en réexaminant le modèle de Maxwell. Ils ont supposé que la nano-couche fonctionne comme un chemin thermique préférentiel entre un fluide et une nanoparticule. Des résultats controversés sont rapportés par différents chercheurs et la validation de ce mécanisme reste à prouver.

Tableau II.2 Développements de modèles à partir de l' INC

Auteurs de modèles	***Particularités du modèle***	***Usage / défauts***
Yu et Choi **[163]**	Concept de l'INC étendu aux nano-fluides à CNT-particule sur la base du modèle de Hamilton-Crosser	
Xue **[175]**	INC et théorie de polarisation-EMT	Nano-fluides à base huile-CNT
Xue et Xu **[162]**	INC et modification du modèle de Bruggeman	
Xie et al. **[84]**	Distribution linéaire de k_{INC}	
Leong et al. **[82]**	INC et modèle similaire à EMT	

- **Agglomération « clustering » des nanoparticules-AG**

  Keblinski et al. ont aussi proposé le mécanisme d'agglomération des nanoparticules qui est capable d'améliorer et d'expliquer la conductivité thermique élevée des nano-fluides. On pense qu'un chemin de conduction rapide et efficace pour le transfert de chaleur passe par les nanoparticules agglomérées.

  Wang et al. **[75]** ont dérivé un modèle base sur l'EMT et la théorie des fractales. De plus, les agrégats ont une conductivité thermique basée sur le modèle de Bruggeman. Numériquement, Prasher et al**. [71]** ont examiné l'effet de l'agglomération en utilisant la simulation de Monte Carlo et ont montré que les agrégats linéaires de nanoparticules « back bone » peuvent contribuer fortement à cette augmentation pour les nano-fluides.

  Cependant, le niveau de l'agglomération est encore inconnu pour les nano-fluides synthétisés et il n'existe pas encore de méthode pouvant le quantifier. Il faut signaler qu'un niveau très élevé d'agglomération joue sur la stabilité du nano-fluide.

II.4.2 Mécanismes dynamiques MD

Les modèles EMT conventionnels et leurs dérivés sont employés pour évaluer les conductivités thermiques effectives des suspensions. Ces théories supposent que les particules incluses sont homogènes et suspendues dans le fluide de base et il n'y a aucun mouvement des particules. Cependant, comme décrit plus haut ceci n'est pas suffisant pour expliquer les comportements de la conductivité thermique des nano-fluides tels que les dépendances avec la température et la taille de la particule. Puisque les nanoparticules dans le milieu liquide se déplacent sans interruption avec des collisions vis à vis des molécules liquides alimentées par l'énergie thermodynamique (mouvement Brownien), plusieurs chercheurs ont proposé des mécanismes dynamiques basés sur ce mouvement afin d'expliquer les nouvelles caractéristiques de la conductivité thermique des nano-fluides.

Comme premier concept dynamique, Keblinski et al. ont proposé la collision entre les nanoparticules suspendus dans les nano-fluides. Cependant, Wangs et al. , Keblinski et al. ont prouvé que l'effet des collisions entre les particules sur l'augmentation de la conductivité thermique des nano-fluides est négligeable.

Alternativement, Jang et Choi **[74]** ont proposé la nano-convection induite par le mouvement Brownien des nanoparticules comme second mécanisme dynamique sous-jacent. Ils ont supposé que le mouvement Brownien des particules agite les molécules liquides environnantes et induit la convection à l'échelle nano.

Jang et Choi ont proposé un modèle basé par nano-convection- pour la prédiction de la conductivité thermique effective des nano-fluides. A cet effet, ils ont divisé la conduction thermique dans les nano-fluides en quatre modes :

(i) la collision des molécules liquides les unes aux autres,

(ii) la diffusion thermique des nanoparticules dans le fluide,

(iii) collision des nanoparticules les unes aux autres,

(iv) mouvement Brownien induisant la nano-convection par le mouvement des nanoparticules suspendues.

Le premier mode et les deux derniers ont été retenus et superposés pour le développement du modèle. Non seulement la nano-convention n'est pas encore prouvée mais aussi la vitesse de la particule n'est pas définie, le présent modèle donne des résultats qui corrèlent bien avec les données observées, à la différence des EMT.

Tableau II.3 Développements de modèles à partir des MD

Auteurs de modèles	***Particularités du modèle***	***Usage /défauts***
Kumar et al. **[70]**	Equation de Fourier pour le stationnaire et ajout du mouvement de la particule selon théorie cinétique des gaz.	Invalide pour de longs parcours moyens de la particule
Patel et al. **[176]**	Modèle –cellule avec 2 chemins parallèles de conduction (via liquide et via particules)	
Koo et Kleinstreur **[160]**	Mouvement Brownien ou dynamique ($2^{ème}$ terme) +modèle de Maxwell (1^{er} terme)	Paramètres par expériences
Prasher et al. **[71]**	EMT modifiée +nano-convection	
Yang **[177]**	Modèle basé sur théorie cinétique	

II.4.3 Combinaison des modèles statique et dynamique

- **Combinaison inter-faciale nano-couche – nano-convection INC+MB-NC**

  Ren et al. **[178]** ont proposé un modèle de conductivité thermique pour les nano-fluides en combinant INC+MB-NC soit l'existence de la nano-couche de liquide et la nano-convection induite par le mouvement Brownien. Le flux de chaleur total étant la somme de quatre flux à travers la nanoparticule, la nano-couche, la nano-convection et

enfin le fluide de base. Autre hypothèse, la conductivité thermique varie linéairement dans la nano-couche.

Tableau II.4 Développements de modèles à partir INC+MB-NC

Auteurs de modèles	*Particularités du modèle*	*Usage / défauts*
Murshed et al. [179]	Ajout de surface chimique et de l'interaction potentielle de DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeck)	Contribution majeure par INC

- **Combinaison Agglomération – nano-convection AG+MB-NC**

Xuan et al. [161] ont présenté un modèle basé sur le mouvement Brownien et l'agglomération des nanoparticules. Le mouvement stochastique des nanoparticules dans le liquide est modelé par la théorie du mouvement Brownien tandis que l'agglomération des nanoparticules est simulée par le modèle de diffusion limité d'un agrégat. Ce dernier tient compte de la morphologie de l'agrégat et de sa formation. Le premier terme n'est que le modèle de Maxwell et le second en est la contribution due au mouvement Brownien de l'agglomération.

Tableau II.5 Développements de modèles à partir des AG+MB-NC

Auteurs de modèles	*Particularités du modèle*	*Usage / défauts*
Prasher et al. [49]	EMT et k_{ag} est calculée selon le modèle de Bruggeman	Nombreux paramètres

- **Combinaison du Nano-couche et Agglomération INC+AG**

La combinaison des mécanismes de la nano-couche liquide et de l'agglomération s'est traduite par Feng et al. [164] La chaleur est transportée par une cellule composée de la nanoparticule, de la nano-couche et du fluide de base. Le premier terme contient l'expression de Yu and Choi qui représente l'effet de la nano-couche pour les particules non agglomérées.

De la revue de littérature on remarque qu'en dépit des avancées récentes en technologie du nano-fluide telle que les découvertes des propriétés thermiques inattendues, des nouveaux mécanismes et des modèles peu usuels proposés, il y a un certain nombre de problèmes n'ont pas été entièrement étudiées et restent pour les

nano-fluides non résolus. Par exemple, les résultats des modèles ou des corrélations théoriques proposés pour les propriétés thermo-physiques du nano-fluide et les caractéristiques de transfert thermique semblent être conformes aux données expérimentales d'un certain groupe d'auteurs s'avèrent être en désaccord avec des données d'autres auteurs. On comprend également et néanmoins qu'en raison du grand niveau de l'éparpillement des données, le développement d'un modèle complet qui peut expliquer toutes les tendances est devenu une tâche difficile.

II.5 Revue sur les mécanismes et propriétés des nano-fluides.

- Conductivité et mécanismes

La revue sur la conductivité thermique des nano-fluides indique qu'il a été proposé une longue liste de raisons ou de phénomènes physiques pour expliquer l'augmentation, expérimentalement observée, de la conductivité thermique des nano-fluides. Les travaux expérimentaux sur la conductivité thermique du nano-fluide permettent un appui pour les affirmations :

• De plus petits nanoparticules ont pu générer le mouvement brownien à températures élevées.

• La microstructure du nano-fluide a pu fournir des détails concernant l'alignement des nanoparticules ou de la formation des agrégats.

• La mesure du pH ainsi que le potentiel zêta a pu fournir les informations concernant la stabilité du nano-fluide préparé.

• L'application du champ magnétique pour contrôler la structure des nanoparticules magnétiques en suspension dans les fluides magnétiques.

En même temps, il doit être noté qu'il n'y a aucune technique expérimentale suffisante pour prouver la présence de la nano-couche et de la valeur de son épaisseur.

A la question "qui est le mécanisme dominant de transport de la chaleur responsable du l'augmentation de la conductivité thermique dans les nano-fluides?", la réponse reste ouverte, et il est nécessaire que la communauté scientifique développe des techniques expérimentales pour vérifier et décider le ou les mécanismes dominants de transport de la chaleur dans les nano-fluides.

- Viscosité et mécanismes

Par ailleurs, l'examen de la littérature sur la viscosité du nano-fluide montre que :

- La viscosité peut augmenter linéairement ou non avec la concentration des nanoparticules.
- La viscosité du nano-fluide diminue avec l'augmentation de la température.
- La viscosité du nano-fluide augmente avec la diminution de la taille particulaire.
- Un nano-fluide peut montrer les comportements Newtoniens ou non-Newtoniens en relation avec la concentration.

Les mécanismes possibles pour le changement de la viscosité du nano-fluide incluent des interactions hydrodynamiques entre les particules, la plus grande surface des particules, l'augmentation du taux de dissipation d'énergie, les effets combinés des forces électro-visqueuses, l'agrégation de particules et les effets de la double répulsion électrique de couche.

La diminution de fait c.-à-d., de la viscosité avec l'augmentation de la température est prometteuse pour l'usage des nano-fluide es en tant que liquides réfrigérants améliorés dans les systèmes thermiques.

Cependant, le phénomène de l'hystérésis rapporté par Nguyen et al. **[180]** doit est être considéré et exige davantage de recherche.

- Densité et mécanismes

La littérature montre que les travaux expérimentaux sur la densité et la chaleur spécifique du nano-fluide est limitée.

- La densité du nano-fluide a pu être bien prévue en utilisant la théorie de mélange classique.
- La chaleur spécifique des nano-fluides a été calculée en utilisant deux modèles, à savoir la théorie et le modèle thermique d'équilibre. Par expérience on a démontré que la prévision du modèle thermique d'équilibre montre la bonne concordance tandis que le modèle de mélange simple ne prévoit pas correctement la chaleur spécifique du nano-fluide.

- Conductivité-viscosité et mécanismes

Les résultats de Wang et al. **[181]** concernant la diminution de la conductivité thermique avec l'augmentation de la viscosité du nano-fluide et de la valeur limite de la viscosité à tenir si le mouvement Brownien est actif ou inactif est une information indisponible.

- Conductivité - densité et convection

On observe que les propriétés comme la conductivité thermique et la densité auront une influence positive tandis que les autres propriétés ont un effet négatif sur le coefficient de transfert thermique. Ainsi, la meilleure combinaison du fluide de base et de la nanoparticule doit être choisie pour avoir les propriétés thermo-physiques optimisées de nano-fluide pour rendre par exemple les liquides réfrigérants efficaces. Par conséquent un besoin d'optimisation des propriétés est donc apparent.

- Mécanismes principaux et conclusions

Les investigations expérimentales sur les résultats performants du transfert de chaleur par convection de divers nano-fluides indiquent que les mécanismes principaux peuvent inclure :

• Dispersion des nanoparticules en suspension.

• Migration de particules conséquence d'une distribution non-uniforme de la conductivité thermique et de la viscosité dans le domaine d'écoulement.

• Réduction d'épaisseur thermique de la couche limite.

• Conduction augmentée dans les conditions statiques et dynamiques.

• Effet de forme de particules et agglomération.

• Mouvement chaotique des nanoparticules avec supplément d'énergie échangée.

• Profil aplati de vitesse dû à la migration des particules induite par diffusion Brownienne.

• Thermophorèse.

• Une transition laminaire - turbulent prématurée due à la présence des nanoparticules.

• Transfert d'énergie thermique augmentée à partir de la paroi au nano-fluide.

Walsh et al. **[182]** ont décrit une nouvelle application pour l'obtention d'image de microparticule par vélocimétrie atteignant des mesures à l'intérieur du nano-fluide et ont démontré qu'elles peuvent être employés pour développer des théories basées sur l'écoulement observé ou à valider/invalider plusieurs des théories récemment proposées pour les mécanismes en jeu dans les nano-fluide.

[1] Bhushan B. Springer Handbook of Nanotechnology New York: Springer ; 2004.
[2] Keblinski P, Phillipot SR, Choi SUS, Eastman JA. Mechanism of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). Int J Heat Mass Transfer 2002; 45:855–63.
[3] Chon CH, Kihm KD, Lee SP, Choi SUS. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al2O3) thermal conductivity enhancement. Appl Phys Lett 2005; 87: 153107.
[4] Taylor R, et al. Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids. J Appl Phys 2013; 113: 011301.
[5] Philip J, Shima PD, Raj B. Evidence for enhanced thermal conduction through percolating structures in nanofluids. Nanotechnology 2008; 19: 305706.
[6] Karthikeyan NR, Philip J, Raj B. Effect of clustering on the thermal conductivity of nanofluids. Mater Chem Phys 2008; 109: 50–5.
[7] Gharagozloo PE, Eaton JK, Goodson KE. Diffusion, aggregation, and the thermal conductivity of nanofluids. Appl Phys Lett 2008; 93: 103110.
[8] Younes H, Christensen G, Luan X, Hong H, Smith P. Effects of alignment, pH, surfactant, and solvent on heat transfer nanofluids containing Fe2O3 and CuO nanoparticles. J Appl Phys 2012; 111: 064308.
[9] Komati S, Suresh AK. Anomalous enhancement of interphase transport rates by nanoparticles: effect of magnetic iron oxide on gas-liquid mass transfer. Ind Eng Chem Res 2010;49:390–405.
[10] Shalkevich N, Escher W, Burgi T, Michel B, Ahmed LS, Poulikakos D. On the thermal conductivity of gold nanoparticle colloids. Langmuir 2010; 26:663–70.
[11] Escher W, et al. On the Cooling of electronics with nanofluids. ASME J Heat Transfer 2011; 133:051401.
[12] Warzoha RJ, Weigand RM, Fleischer AS. Temperature-dependent thermal properties of a paraffin phase change material embedded with herringbone style graphite nanofibers. Appl. Eng 2015; 137:716–25.
[13] Choi SUS. In: Singer DA, Wang HP, editors. Development and application of non-Newtonian flows, vol. FED 231. New York: ASME; 1995. p. 99–105.
[14] Rosenzweig RE. Ferrohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press; 1985.
[15] Philip J, Shima PD, Raj B. Nanofluid with tunable thermal properties. Appl Phys Lett 2008; 92:043108.
[16] Kao MJ, Lo CH, Tsung TT, Wu YY, Jwo CS, Lin HM. Copper-oxide brake nanofluid manufactured using arc-submerged nanoparticle synthesis system. J Alloys Compd. 2007;134-435:672–4.
[17] Yu W, Xie H. A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications. J Nanomater 2012; 2012:1–17.
[18] Dudda B, Shin D. Effect of nanoparticle dispersion on specific heat capacity of a binary nitrate salt eutectic for concentrated solar power applications. Int J Therm Sci 2013; 69:37–42.
[19] Mahian O, Kianifar A, Kalogirou SA, Pop I, Wongwises S. A review of the applications of nanofluids in solar energy. Int J Heat Mass Transfer 2013; 57:582–94.
[20] Serrano E, Rus G, Martínez JG. Nanotechnology for sustainable energy. Renew. Sust Energy Rev 2009; 13(December (9)): 2373–84.
[21] Salehi JM, Heyhat MM, Rajabpour A. Enhancement of thermal conductivity of silver nanofluid synthesized by a one-step method with the effect of polyvinyl-pyrrolidone on thermal behavior. Appl Phys Lett 2013; 102:231907.
[22] Akoh H, Tsukasaki Y, Yatsuya S, Tasaki A. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. J Cryst Growth 1978;45:495–500.
[23] Sridhara V, Satapathy LN. Al2O3-based nanofluids: a review. Nanoscale Res Lett 2011;6:1–16.
[24] Choi SUS, Eastman JA. Enhanced heat transfer using nanofluids, in SciTech Connect US Patent 6221275; 2001.
[25] Sandhya SU, Nityananda SA. A Facile One Step Solution Route to Synthesize Cuprous Oxide Nanofluid. Nanomater Nanotechnol 2013; 3:1–7.

[26] Kumar SA, Meenakshi KS, Narashimhan BRV, Srikanth S, Arthanareeswaranc G. Synthesis and characterization of copper nanofluid by a novel one-step method. Mater Chem Phys 2009; 113:57–62.
[27] Kanaras AG, Kamounah FS, Schaumburg K, Kiely CJ, Brust M. Thioalkylated tetraethylene glycol: a new ligand for water soluble monolayer protected gold clusters. Chem Commun 2002; 20:2294–5.
[28] Lo CH, Tsung TT, Chen LC. Shape-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). J Cryst Growth 2005; 277: 636–42.
[29] Lo CH, Tsung TT, Lin HM. Preparation of silver nanofluid by the submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). J Alloys Compd 2007; 434-435:659–62.
[30] Kim HJ, Bang IC, Onoe J. Characteristic stability of bare Au-water nanofluids fabricated by pulsed laser ablation in liquids. Opt Lasers Eng 2009; 47:532.
[31] Lee SW, Park SD, Bang IC. Critical heat flux for CuO nanofluid fabricated by pulsed laser ablation differentiating deposition characteristics. Int J Heat Mass Transfer 2012 ;55:6908–15.
[32] Phuoc TX, Soong Y, Chyu MK. Synthesis of Ag-deionized water nanofluids using multi-beam laser ablation in liquids. Opt Lasers Eng 2007; 45:1099.
[33] Wang H, Xu JZ, Zhu JJ, Chen HY. Preparation of CuO Nanoparticles by Microwave Irradiation. J Cryst Growth 2002; 244:88–94.
[34] Zhu H., Lin Y, Yin Y. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. J Colloid Interface Sci 2004; 277:100–3.
[35] Bönnemann H, Botha SS, Bladergroen B, Linkov VM. Monodisperse copper- and silver-nanocolloids suitable for heat-conductive fluids. Appl Organomet Chem 2005; 19:768–73.
[36] Singh AK, Raykar VS. Microwave synthesis of silver nanofluids with polyvinyl-pyrrolidone (PVP) and their transport properties. Colloid Polym Sci 2008; 286: 1667–73.
[37] Bonet F, Tekaia-Elhsissen K, Sarathy KV. Study of interaction of ethylene glycol/PVP phase on noble metal powders prepared by polyol process. Bull Mater Sci 2000; 23: 165–8.
[38] Sun Y, Mayers B, Herricks T, Xia Y. Polyol Synthesis of Uniform Silver Nanowires: A Plausible Growth Mechanism and the Supporting Evidence. Nano Lett 2003;3: 955–60.
[39] Wanga C, Yanga J, Ding Y. Phase transfer based synthesis and thermophysical properties of Au/Therminol VP-1 nanofluids. Prog Nat Sci 2013; 23:338–42.
[40] Yang J, Sargent E, Kelley S, Ying JY. A general phase-transfer protocol formetal ions and its application in nanocrystal synthesis. Nat Mater 2010; 8:683–9.
[41] Kumar A, et al. Phase transfer of platinum nanoparticles from aqueous to organic solutions using fatty amine molecules. J Chem Sci 2004; 116:293–300.
[42] Wang X, Xu S, Zhou J, Xu W. A rapid phase transfer method for nanoparticles using alkylamine stabilizers. J Colloid Interface Sci 2010; 348:24–8.
[43] Zhu H, Zhang C, Tang Y,Wang J, Ren B, Yin Y. Preparation and thermal conductivity of suspensions of graphite nanoparticles. Carbon 2007; 45:226–8.
[44] Muthukumaran T, Gnanaprakash G, Philip J. Synthesis of Stable Magnetic Nanofluids of Different Particle Sizes. J Nanofluids 2012;1:85–92.
[45] Hyning DLV, KlempererWG, Zukoski CF. Silver nanoparticle formation: Predictions and verification of the aggregative growth model. Langmuir 2001; 17:3128–35.
[46] Chen Y, Luo X, Yue GH, Luo X, Peng DL. Synthesis of iron-nickel nanoparticles via a nonaqueous organometallic route. Mater Chem Phys 2009; 113:412.
[47] Pati SS, Mahendran V, Philip J. A simple approach to produce stable ferrofluids without surfactants and with high temperature stability. J Nanofluids 2013; 2: 94–103.
[48] Gnanaprakash G, Mahadevan S, Jayakumar T, Sundaram PK, Philip J, Raj B. Effect of initial pH and temperature of iron salt solutions on formation of magnetite nanoparticles. Mater Chem Phys 2007; 103:168–75.
[49] Prasher R, Phelan PE, Bhattacharya P. Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid). Nano Lett 2006; 6: 1529–34.
[50] Kwak K, Kim C. Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol. Korean-Australia Rheology J 2005; 17:35–40.

[51] Keblinski P, Eastman JA, Cahill DG. Nanofluids for thermal transport. Mater Today 2005; 8:36–44.
[52] Xie H, Lee H, YounW, Choi M. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. J Appl Phys 2003; 94: 4967–71.
[53] Liu MS, Lin MCC, Huang IT, Wang CC. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. Int Commun Heat Mass Transfer 2005; 32: 1202–10.
[54] Moosavi M, Goharshadi EK, Youssefi A. Fabrication, characterization, and measurement of some physicochemical properties of ZnO nanofluids. Int J Heat Fluid Flow 2010; 31:599–605.
[55] Angayarkanni S.A., Philip J. Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. Advances in Colloid and Interface Science 225 (2015) 146–176
[56] Fedele L, Colla L, Bobbo S, Barison S, Agresti F. Experimental stability analysis of different waterbased nanofluids. Nanoscale Res Lett 2011; 6:1–8.
[57] Li X, Zhu D, Wang X. Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions. J Colloid Interface Sci 2007; 310:456–63.
[58] Wei X, Wang L. Synthesis and thermal conductivity of microfluidic copper nanofluids. Particuology 2010; 8:262–71.
[59] Popa I, Gillies G, Papastavrou G, Borkovec M. Attractive and Repulsive Electrostatic Forces between Positively Charged Latex Particles in the Presence of Anionic Linear Polyelectrolytes. J Phys Chem B 2010; 114: 3170–7.
[60] Fovet Y, Gal JY, Toumelin-Chemla F. Influence of pH and fluoride concentration on titanium passivating layer: stability of titanium dioxide. Talanta 2001; 53:1053–63.
[61] Huang J, Wang X, Long Q,Wen X, Zhou Y, Li L. Influence of pH on the Stability Characteristics of Nanofluids. Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO '09), IEEE xplore; 2009.
[62] Angayarkanni SA, Philip J. Tunable Thermal Transport in Phase Change Materials Using Inverse Micellar Templating and Nanofillers. J Phys Chem C 2014; 118:13972–80.
[63] Maxwell JC. A treatise on electricity and magnetism. 2nd ed. Clarendon; 1881.
[64] Merrill WM, Diaz RE, LoRe MM, Squires MC, Alexopoulos NG. Effective Medium Theories for Artificial Materials Composed of Multiple Sizes of Spherical Inclusions in a Host Continuum. IEEE Trans Antennas Propag 1999; 47:142–8.
[65] Wen D. et al. Review of nanofluids for heat transfer applications. Particuology 7 (2009) 141–150
[66] Bruggeman DAG. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. Ann Phys 1935; 416:636–64.
[67] Hamilton RL, Crosser OK. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. Ind Eng Chem Fundam 1962; 1:187–91.
[68] Yu W, Choi SUS. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Hamilton–Crosser model. J Nanopart Res 2004; 6: 355–61.
[69] Xuan Y, Li Q. Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. J Heat Transfer 2003; 125:151–5.
[70] Kumar DH, Patel HE, Kumar VRR, Sundararajan T, Pradeep T, Das SK. Model for heat conduction in nanofluids. Phys Rev Lett 2004; 93:144301.
[71] Prasher R, Bhattacharya P, Phelan PE. Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluids). Phys Rev Lett 2005; 94:025901.
[72] Yamada E, Ota T. Effective thermal conductivity of dispersed materials. Heat and Mass Transfer 1980;13:27–37.
[73] Hesselman DPH, Johnson LF. Effective thermal conductivity of nanocomposites with interfacial thermal barrier resistance. J Compos Mater1987; 21:508–15.
[74] Jang SP, Choi SUS. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. Appl Phys Lett 2004; 84:4316.
[75] Wang BX, Zhou LP, Peng XF. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. Int J Heat Mass Transfer 2003; 46:2665–72.
[76] Meibodi ME, Sefti MV, Rashidi AM, Amrollahi A, Tabasi M, Kalal HS. A model for thermal conductivity of nanofluids. Mater. Chem Phys 2010; 123:639–43.

[77] Corcione M. Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. Energ Convers Manage 2011; 52:789–93.
[78] Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. J Appl Phys 1962; 33:3125.
[79] Avsec J, Oblak M. The calculation of thermal conductivity, viscosity and thermodynamic properties for nanofluids on the basis of statistical nanomechanics. Int J Heat Mass Transfer 2007; 50:4331–41.
[80] Pak BC, Choi YI. Hydraulic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Exp Heat Transfer 1998; 11:151–70.
[81] Chandrasekar M, Suresh S, Ramasamy S, Bose AC. New analytical models to investigate thermal conductivity of nanofluids. J Nanosci Nanotechnol 2009; 9:533.
[82] Leong KC, Yang C, Murshed SMS. A model for the thermal conductivity of nanofluids – the effect of interfacial layer. J Nanoparticle Res 2006; 8:245–54.
[83] Gupta SK, Advani SG, Huq P. Role of Micro-convection due to nonaffine motion of particle in mono-disperse suspension. Int J Heat Mass Transfer 1995; 38: 2945–58.
[84] Xie H, Fujii M, Zhang X. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. Int J Heat Mass Transfer 2005; 48:2926–32.
[85] Timofeeva EV, et al. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: Experiment and theory. Phys Rev E 2007; 76:061203.
[86] Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. Appl Phys Lett 2001; 78:718–20.
[87] Das SK, Putra N, Thiesen P, Roetzel W. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement of Nanofluids. ASME J Heat Transfer 2003; 125:567–74.
[88] Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N. Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of γ–Al2O3, SiO2, and TiO2 Ultra-Fine Particles). Netsu Bussei 1993; 7:227–33.
[89] Murshed SMS, Leong KC, Yang C. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. Int J Therm Sci 2008; 47:560–8.
[90] Yu W, Xie H, Wang X, Wang X. Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets. Phys Lett A 2011; 375:1323–8.
[91] Yu W, Xie H, Bao D. Enhanced thermal conductivities of nanofluids containing graphene oxide nanosheets. Nanotechnology 2010; 21:055705.
[92] Yu W, Xie H, Chen W. Experimental investigation on thermal conductivity of nanofluids containing graphene oxide nanosheets. J Appl Phys 2010;107:094317.
[93] Reinecke BN, Shan JW, Suabedissen KK, Cherkasova AS. On the anisotropic thermal conductivity of magnetorheological suspensions. J Appl Phys 2008; 104:023507.
[94] Cha G, Ju YS, Ahure LA,Wereley NM. Experimental characterization of thermal conductance switching in magnetorheological fluids. J Appl Phys 2010;107: 09B505.
[95] Sundar LS, Singh MK, Ramana EV, Singh B, Gracio J, Sousa ACM. Enhanced Thermal Conductivity and Viscosity of Nanodiamond-Nickel Nanocomposite Nanofluids. Sci Rep 2014;4:14.
[96] Mehrali M, et al. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets. Nanoscale Res Lett 2014; 9:1–12.
[97] Kim SH, Choi SR, Kim D. Thermal Conductivity ofMetal-OxideNanofluids: Particle Size Dependence and Effect of Laser Irradiation. ASME J Heat Transfer 2007; 129:298–307.
[98] Vajjha RS, Das DK. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. Int J Heat Mass Transfer 2009; 52:4675–82.
[99] Mintsa HA, Roy G, Nguyen CT, Doucet D. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. Int J Therm Sci 2009; 48:363–71.
[100] Beck MP, Yuan Y, Warrier P, Teja AS. The thermal conductivity of alumina nanofluids in water, ethylene glycol, and ethylene glycol + water mixtures. J Nanopart Res 2010; 12:1469–77.

[101] Beck MP, Yuan Y, Warrier P, Teja AS. The thermal conductivity of aqueous nanofluids containing ceria nanoparticles. J Appl Phys 2010; 107:066101.
[102] Murshed SMS, Leong KC, Yang C. Enhanced thermal conductivity of TiO2—water based nanofluids. Int J Therm Sci 2005; 44:367–73.
[103] Glory J, Bonetti M, Helezen M, Hermite MML, Reynaud C. Thermal and electrical conductivities of water-based nanofluids prepared with long multiwalled carbon nanotubes. J Appl Phys 2008; 103:094309.
[104] Assael MJ, Metaxa IN, Arvanitidis J, Christofilos D, Lioutas C. Thermal conductivity enhancement in aqueous suspensions of carbon multi-walled and double-walled nanotubes in the presence of two different dispersants. Int J Thermophys 2005; 26:647–64.
[105] Yang Y, Grulke EA, Zhang ZG, Wu G. Thermal and rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersions. J Appl Phys 2006; 99:114307.
[106] Xie H, Wang J, Xi T, Liu Y. Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles. Int J Thermophys 2002;23: 571–80.
[107] Lee KJ, Yoon SH, Jang y. Carbon Nanofibers: A Novel Nanofiller for Nanofluid Applications. Small 2007; 3:1209–13.
[108] Timofeeva EV, Routbort JL, Singh D. Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. J Appl Phys 2009;106:014304.
[109] Philip J, Shima PD, Raj B. Enhancement of thermal conductivity in magnetite based nanofluid due to chainlike structures. Appl Phys Lett 2007; 91:203108.
[110] Li Q, Xuan Y, Wang J. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. Exp Therm Fluid Sci 2005; 30:109–16.
[111] Parekh K, Lee HS. Magnetic field induced enhancement in thermal conductivity of magnetite nanofluid. J Appl Phys 2010; 107:09A310.
[112] Wensel J, et al. Enhanced thermal conductivity by aggregation in heat transfer nanofluids containing metal oxide nanoparticles and carbon nanotubes. Appl Phys Lett 2008;92:023110.
[113] Xuan Y, Huang Y, Li Q. Experimental investigation on thermal conductivity and specific heat capacity of magnetic microencapsulated phase change material suspension. Chem Phys Lett 2009; 479:264–9.
[114] Hong H, Wright B, Wensel J, Jin S, Ye XR, Roy W. Enhanced thermal conductivity by the magnetic field in heat transfer nanofluids containing carbon nanotube. Synth Met 2007; 157:437–40.
[115] Jana S, Khojin AS, Zhong WH. Enhancement of fluid thermal conductivity by the addition of single and hybrid nano-additives. Thermochim Acta 2007; 462:45.
[116] Kim YJ, Ma H, Yu Q. Plasma nanocoated carbon nanotubes for heat transfer nanofluids. Nanotechnology 2010; 21:295703.
[117] Nasiri A, Niasar MS, Rashidi A, Amrollahi A, Khodafarin R. Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid. Exp Therm Fluid Sci 2011; 35:717–23.
[118] Zhu D, Li X, Wang N, Wang X, Gao J, Li H. Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al2O3–H2O nanofluids. Curr Appl Phys 2009; 9:131–9.
[119] Wang XJ, Zhu DS, Yang S. Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids. Chem Phys Lett 2009; 470:107–11.
[120] Das SK, Putra N, Roetzel W. Pool boiling characteristics of nanofluids. Int J Heat Mass Transfer 2003; 46:851–62.
[121] Lomascolo M. et al. Review of heat transfer in nanofluids: Conductive, convective and radiative experimental results, Renewable and Sustainable Energy Reviews Renewable and Sustainable Energy Reviews 43 (2015) 1182–1198)
[122] Eapen J, et al. Mean-field versus microconvection effects in nanofluid thermal conduction. Phys Rev Lett 2007; 99:095901.
[123] Einstein A., A new determination of the molecular dimensions, Ann. Phys. 324 (2) (1906) 289-306.
[124] Brinkman H.C., The viscosity of concentrated suspensions and solutions, J. Chem. Phys. 20 (1952) 571-581.

[125] Batchelor G.K., The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles, J. Fluid Mech. 83 (1977) 97-117.
[126] Chandrasekar M., Suresh S.,. Chandra Bose B.A, Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al2O3/ water nanofluid, Exp. Therm. Fluid Sci. 34 (2010) 210-216.
[127] Nguyen C., Desgranges F., Roy G., Galanis N., Mare T., Boucher S.,. Mintsa H.A, Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids hysteresis phenomenon, Int. J. Heat Fluid Flow 28 (6) (2007) 1492-1506.
[128] Maïga S.E.B., Nguyen C.T., Galanis N., Roy G., Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube, Superlattices Microstruct. 35 (2004) 543-557.
[129] Rea U., McKrell T., Hu L.W., Buongiorno J., Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina e water and zirconia water nanofluids, Int. J. Heat Mass Transfer 52 (2009) 2042-2048.
[130] Esfe Mohammad Hemmat, Saedodin Seyfolah, Mahmoodi Mostafa, Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of MgO water nanofluid under turbulent flow, Exp. Therm. Fluid Sci. 52 (2014) 68-78.
[131] Krieger I.M., Dougherty T.J., A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres, Trans. Soc. Rheol. 3 (1959) 137-152.
[132] Wen D., Ding Y., Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, Int. J. Heat Mass Transfer 47 (2004) 5181-5188.
[133] Wen D, Lin G, Vafaei S , Zhang K. Review of nanofluids for heat transfer application Particuology Volume 7, Issue 2, April 2009, Pages 141–150
[134] Kumar V, Tiwari Ak , Ghosh SK. Application of nanofluids in plate heat exchanger: A review Energy Conversion and Management, Volume 105, 15 November 2015, Pages 1017–1036
[135] Sadeghinezhad E, Mehrali M , Saidur R , Mehrali M, Latibari ST , Amir Reza Akhiani AR, Metselaar HSC, A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications , Energy Conversion and Management, Volume 111, 1 March 2016, Pages 466–487
[136] Sidik NAC , Yazid MNAWM , Mamat R , A review on the application of nanofluids in vehicle engine cooling system, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 68, November 2015, Pages 85–90
[137] Kasaeian A, Eshghi AT, Sameti M. A review on the applications of nanofluids in solar energy systems , Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 43, March 2015, Pages 584–598
[138] Saidura R., Leong K.Y, Mohammad H.A. A review on applications and challenges of nanofluids. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 3, April 2011, Pages 1646–1668
[139] Shanthi Ra, Shanmuga sundaram Anandan, Velraj Ramalingam, Heat transfer enhancement using nanofluids – an overview, Thermal Science 2012 Volume 16, Issue 2, Pages: 423-444
[140] Yu W, France DM, Jules L. Routbort JL , Choi SUS, Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements, Heat Transfer Engineering, Volume 29, Issue 5, 432-460, 2008
[141] Thang BH, Quang LD, Hong NM, Khoi PH, Minh PN. Application of Multiwalled Carbon Nanotube Nanofluid for 450 W LED Floodlight. J Nano Mater 2014; 2014:1–6.
[142] Mahendran V, Philip J. Naked eye visualization of defects in ferromagnetic materials and components. NDT&E Int 2013; 60:100–9.
[143] Liakos I, Grumezescu AM, Holban AM. Magnetite Nanostructures as Novel Strategies for Anti-Infectious Therapy. Molecules 2014; 19:12710–26.
[144] Khullar V, et al. Harvesting solar thermal energy through nanofluid-based volumetric absorption systems. Int J Heat Mass Transfer 2014;77: 377–84.
[145] Taylor RA, Otanicar T, Rosengarten G. Nanofluid-based optical filter optimization for PV/T systems. Light Sci Appl 2012; 1:1–7.

[146] Choi SUS. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in Developments and Applications of Non-Newtonian Flows. ASME FED 231/ MD 1995; 66:99–103.

[147] Godson L, Raja B, Lal DM, Wongwises S. Enhancement of heat transfer using nanofluids—An overview Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 629–641

[148] Chandrasekara M., Sureshb S., Senthilkumara T. Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids – A review Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 3917– 3938

[149] Li CH. and Peterson GP. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). Journal of Applied Physics 99 no. 8, 2006: 084314.

[150] Patel H. E., Sundararajan T., and Das S. K. An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids. Journal of Nanoparticle Research 12 no. 3, 2010: 1015–1031.

[151] Chopkar M., Das P. K., and Manna I. Synthesis and characterization of nanofluid for advanced heat transfer applications. Scripta Materialia 55 no. 6, 2006: 549–552.

[152] Hong K S., Hong TK., and Yang HS. Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles. Applied Physics Letters 88 no. 3, 2006: 031901.

[153] Lee D., Kim JW., and Kim B G. A new parameter to control heat transport in nanofluids: Surface charge state of the particle in suspension. The Journal of Physical Chemistry B 110 no. 9, 2006: 4323–4328.

[154] Dongsheng Z., Li X., Wang N., Wang X., Gao J., and Li H. Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al2O3–H2O nanofluids. Current Applied Physics 9 no. 1, 2009: 131–139.

[155] Zhang X., Gu H, and Fujii M. Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. Journal of Applied Physics 100 no. 4, 2006: 044325.

[156] Chen G., Yu W., Singh D., Cookson D, and Routbort J. Application of SAXS to the study of particle-size-dependent thermal conductivity in silica nanofluids. Journal of Nanoparticle Research 10 no. 7, 2008: 1109–1114.

[157] Beck M P, Yuan Y, Warrier P, and Teja A S. The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids. Journal of Nanoparticle Research 11 no. 5, 2009: 1129–1136.

[158] Lee, JH, Lee SH., Choi, C, Jang S P, and Choi SUS. A review of thermal conductivity data, mechanisms and models for nanofluids. International Journal of Micro-Nano Scale Transport 1 no. 4, 2010: 269–322.

[159] Jang SP, Choi SUS. Effects of various parameters on nanofluid thermal conductivity. Journal of Heat Transfer 2007; 129:618–23.

[160] Koo J, Kleinstreuer C. A new thermal conductivity model for nanofluids. Journal of Nanoparticle Research 2004; 6:577–88.

[161] Xuan Y, Li Q, Hu W. Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. AIChE Journal 2003;49: 1038–43.

[162] Xue Q, Xu WM. A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells. Materials Chemistry and Physics 2005; 90: 298–301.

[163] Yu W, Choi SUS. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. Journal of Nanoparticle Research 2003; 5:167–71.

[164] Feng Y, Yu B, Xu P, Zou M. The effective thermal conductivity of nanofluids based on the nanolayer and the aggregation of nanoparticles. Journal of Physics D: Applied Physics 2007;40: 3164–71.

[165] Lee S, Choi SUS, Li S, Eastman JA. Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. ASME J Heat Transfer 1999; 121:280–9.
[166] Wang XQ, Mujumdar AS. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, International Journal of Thermal Sciences 46 (2007) 1–19
[167] Bhat S, Maitra U. Facially amphiphilic thiol capped gold and silver nanoparticles. Journal of Chemical Sciences 2008; 120(6):507–13.
[168] Frimpong RA, Hilt JZ. Poly (n-isopropylacrylamide)-based hydrogel coatings on magnetite nanoparticles via atom transfer radical polymerization. Nanotechnology 2008; Vol 19 (17),
[169] Jean NC, Tan CP, Yaakob CMB, Misni M. a-Tocopherol nanodispersions: preparation, characterization and stability evaluation. Journal of Food Engineering 2008; 89:204–9.
[170] Xuan Y, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. International Journal of Heat and Fluid Flow 2000; 21:58–64.
[171] Buongiorno J. Convective transport in nanofluids. J. Heat Transfer 128(3), 240-250 (Aug 15, 2005)
[172] Koo J, Kleinstreuer C. Impact analysis of nanoparticle motion mechanisms on the thermal conductivity of nanofluids. International Communication on Heat and Mass Transfer 2005; 32(9):1111–8.
[173] Nan CW., Birringer R, Clarke DR, and Gleiter H. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance. Journal of Applied Physics 81 no. 10, 1997: 6692–6699.
[174]Yu CJ, Richter AG, Datta A, Durbin MK, and Dutta P. Molecular layering in a liquid on a solid substrate: An X-ray reflectivity study." Physica B: Condensed Matter 283 no. 1–3, 2000: 27–31.
[175] Xue QZ. Model for effective thermal conductivity of nanofluids. Physics Letters A 307 no. 5–6, 2003: 313–317.
[176] Patel H E, Sundararajan T, and Das S K. A cell model approach for thermal conductivity of nanofluids. Journal of Nanoparticle Research 10 no. 1, 2008 : 87–97.
[177] Yang B. Thermal conductivity equations based on Brownian motion in suspensions of nanoparticles (nanofluids). ASME Journal of Heat Transfer 130 no. 4, 2008: 042408.
[178] Ren Y, Xie H, and Cai A. "Effective thermal conductivity of nanofluids containing spherical nanoparticles." Journal of Physics D: Applied Physics 38 no. 21, 2005: 3958–3961.
[179] Murshed, S. M. S., Leong, K. C., and Yang, C. "A combined model for the effective thermal conductivity of nanofluids." Applied Thermal Engineering 29 no. 11–12, 2009: 2477–2483.
[180] Nguyen CT, Desgranges F, Galanis N, Roy G, Mare T, Boucher S, et al. Viscosity data for Al2O3/water nanofluid-hysteresis: Is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? International Journal of Thermal Sciences 2008; 47:103–11.
[181] Wang B, Wang X, Lou W, Hao J. Ionic liquid-based stable nanofluids containing gold nanoparticles. Journal of Colloid and Interface Science 2011; 362:5–14.
[182] Walsh PA, Egan VM, Walsh EJ. Novel micro-PIV study enables a greater understanding of nanoparticle suspension flows: nanofluids. Microfluid Nanofluid 2009; 8(6):837–42.

DEUXIEME PARTIE

DISPERSION-

MODELISATION & RESULTATS

Cette partie présente dans un premier temps, dans le chapitre III, les différentes approches de la modélisation de l'écoulement et du transfert thermique pour un nano-fluide, aboutissant à l'alternative de Buongiorno, pour un fluide clair ou évoluant dans un milieu poreux, notamment non-Darcéen. Cette complexité du milieu induit la dispersion hydrodynamique qui ne peut être ignorée dans des situations de convection naturelle vigoureuse, objet du chapitre IV, dans un second temps.

La modélisation ultérieure des dispersions thermiques et solutale nécessite des validations puisqu'elles sont essentielles et permettent de formuler un modèle plus étendu des nano-fluides dans le milieu poreux. Dans cet ordre, les modèles dédiées à la dispersion sont confrontées aux mesures expérimentales.

Dans un troisième temps (chapitre V), les équations de la modélisation dans le contexte décrit de l'étude sont écrites et rapportées avec une maximisation relativement aux phénomènes de transfert intervenants ainsi que pour les conditions aux limites classiques puis les plus réelles. Les résultats de la simulation invoquant le modèle précédent et obtenus pour une gamme large des paramètres gouvernants sont présentés dans un quatrième temps (chapitre VI). Ces résultats permettent de bien comprendre les effets de la dispersion sur les variables de transfert de quantité de mouvement, de l'énergie et de la concentration des espèces, de mettre en relief l'intérêt ou non d'une circulation d'un nano-fluide dans un milieu poreux et de définir en perspective les critères de choix d'un milieu le plus opportun pour mener un procédé défini.

PARTIE II ***CHAPITRE III***

Nano-fluides & Modèles

III.1 Introduction

La convection naturelle est largement utilisée dans des domaines varies chaque fois où un besoin de transfert de chaleur s'impose. L'avantage de ce procédé est qu'aucune force externe n'est introduite pour le transfert à l'exception de la densité variable induite par la température. Cependant, ces transferts sont quantitativement limités à cause des faibles conductivités thermiques des fluides, à l'exemple de l'eau, huile, Ethylène Glycol et mélanges.

Le remplacement de ces fluides par des nano-fluides mène à une amélioration substantielle du transfert mais du fait que ces nouveaux fluides sont des mélanges fluide de base et nanoparticules, la modélisation de l'écoulement et du transfert est posée.
Dans la littérature, les transferts convectifs par nano-fluides peuvent être modélisés par deux approches à une-phase ou à deux-phases **[1].** Dans cette dernière approche, les vitesses du fluide de base et des nanoparticules sont différentes en raison de la gravité et des frottements entre ces deux constituants. D'autres facteurs telles les forces et la diffusion Browniennes, la sédimentation et la dispersion des nanoparticules jouent des rôles absents ou négligeables en présence d'une seule phase. Cependant, il est concevable que les nano-fluides étant des suspensions diluées, l'ensemble puisse être considéré encore comme une seule phase **[2].** avec le gain de simplicité et de calcul.

III.1.1 Modélisation à une phase

L'approche conventionnelle pour les nano-fluides utilisée par de nombreux chercheurs est le modèle à une phase. Les raisons invoqués sont la faible concentration et la petite taille des nanoparticules ce qui se traduit par un ensemble homogène de fluide de base et nanoparticules se déplaçant à une même vitesse et en équilibre thermique local. Aussi, les propriétés thermo-physiques des nano-fluides sont alors évaluées en fonction de la part de leurs constituants. Les équations classiques de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie restent donc valables avec les propriétés définies et calculées selon cette procédure.

III.1.2 Modélisation à deux phases

Plusieurs auteurs ont opté pour le transfert convectif des nano-fluides par une modélisation à deux phases en accord avec les deux constituants réels du fluide de base et des nanoparticules comme phase solide. Il est alors nécessaire de tenir compte des vitesses de glissement

entre la particule et le fluide de base. L'écoulement est en conséquence de nature multiphasique avec l'adoption de la théorie des mélanges comme dans les travaux **[3-5].**

III.2 Travaux sur les transferts convectifs

III.2.1 Travaux expérimentaux

Plusieurs chercheurs ont rapporté leurs résultats expérimentaux relatifs aux transferts convectifs et dans diverses configurations dès lors que le fluide en mouvement et en interaction avec les parois est un nano-fluide.

Il y a lieu de citer les travaux de plusieurs chercheurs couvrant des aspects applicatifs assez larges **[3-23].** Les corrélations présentées dans ces publications pour le coefficient de frottement ou le nombre de Nusselt reflètent bien les données recueillies. Cependant, peu de travaux sont établis pour les applications où les phénomènes d'ébullition, du rayonnement, des écoulements de génération d'entropie et de giclée, d'uniformité expérimentale, suivant la nature chimique, des coefficients de diffusion massique pour les nano-fluides ont été réalisés.

III.2.2 Travaux avec les modèles à une et deux phases

Au niveau de la simulation, les deux types de modèles ont été utilisés **[24].** A titre d'illustration, dans le **Tableau III.1**, on relate différents travaux d'auteurs avec les résultats relatifs à une comparaison entre les deux approches.

Le modèle à deux phases peut fournir de meilleurs résultats dans le domaine d'écoulement des nano-fluides, puisque les phases solide et liquide sont considérées séparément.
Il est facile de comprendre les équations régissantes pour le modèle à une phase pour les débutants dans la modélisation avec l'avantage d'un modèle moins complexe et plus rapide en temps de calcul. On peut ajuster aussi quelques termes dans les équations gouvernantes à une phase en vue de l'augmentation de la précision des calculs.

Une modélisation alternative consiste à tenir compte du mouvement Brownien des nanoparticules et de la thermophorèse comme mécanismes principaux, Buongiorno **[25].** Cet auteur a développé sur la base d'hypothèses raisonnables, un modèle de quatre équations

où le fluide de base et les nanoparticules sont en équilibre thermique, sans réaction chimique, pour un mélange dilué ne subissant aucune force externe et se mouvant sans dissipation visqueuse.

Tableau III.1 Transfert de chaleur par convection naturelle externe dans un milieu poreux [231].

Auteur	Modèle	Résultat
Orezinç et al **[26].**	Une phase/expérimental	Bonne précision à condition de prendre une conductivité et une diffusion thermique variable
Bianco et al **[27].**	Une phase / deux phases	Faibles différences entre les résultats par les deux approches si les propriétés thermo-physiques sont prises dépendantes de la température
Tongkratoke et al. **[28].**	Une phase/expérimental	Modèle précis avec conductivité thermique modifiés par rapport EMT
Tongkratoke et al.**[29].**	Une phase/expérimental	Dans le cas de la turbulence, Realisable k-ε est plus précis.
Behzadmehr et al. **[30].**	Une phase/expérimental	Certains cas seulement, le modèle sous-estime les Nusselt associés au problème
Fard et al. **[31].**	Une phase / deux phases	Le modèle à deux phases donne de résultats meilleurs / au modèle à une phase
Kalteh et al **[32].**	Une phase / deux phases	La vitesse relative entre les phases est peu importante
Akbari et al. **[33].**	Une phase / deux phases/expérimental	Les champs hydrodynamiques prédits sont identiques. Les champs thermiques sont différents. Le second modèle bien que plus précis devient moins précis pour les fortes concentrations

De plus, les effets du rayonnement entre les constituants est négligeable. La formulation mathématique correspond alors à une modélisation à une phase mais non-homogène

III.3 Présentation du modèle de Buongiorno

Un modèle qui décrit le comportement de transfert de la chaleur et de la masse des nano-fluides est d'importance principale pour une analyse approfondie des systèmes où les nano-fluides sont impliqués.

Deux approches différentes peuvent être distinguées à ce stade : homogène ou non-homogène. Ces deux approches différentes mènent à différents ensembles d'équations régissantes :

- le modèle homogène est totalement équivalent au modèle utilisé pour les fluides clairs avec un ajustement approprié des paramètres régissant dus à la présence des

nanoparticules à l'intérieur du fluide de base par Magyari, **[34].** Parmi tous les modèles homogènes possibles, un exemple est celui défini par Tiwari et Das **[35].**

- Un modèle non-homogène, cependant, ajoute une ou plusieurs équations à l'ensemble d'équations régissantes afin de décrire la distribution de nanoparticule et/ou la vitesse de nanoparticule. Parmi les modèles non-homogènes possibles, le plus généralement appliqué est le modèle établi par Buongiorno **[25],** qui constitue un modèle approprié à l'analyse du transfert thermique et à la recherche des distributions non-homogènes des nanoparticules.

Il s'est concentré sur l'amélioration du transfert thermique observé dans des situations convectives. Buongiorno a conclu que la turbulence n'est pas affectée par la présence des nanoparticules ainsi ceci ne peut pas expliquer l'augmentation observée.
La rotation de particules a été également proposée comme cause, mais Buongiorno a calculé que cet effet est trop petit pour expliquer les résultats observés.
La dispersion, la turbulence, et la rotation de particules étant éliminé en tant qu'agents significatives pour l'augmentation du transfert thermique, Buongiorno a proposé un nouveau modèle basé sur les mécanismes de la vitesse relative liquide de nanoparticule/base.
Il a noté que la vitesse absolue de la nanoparticule peut être regardée comme somme de la vitesse liquide de base et d'une vitesse relative (appelées la vitesse de glissement). Il a alors considéré sept mécanismes de glissement: inertie, diffusion Brownienne, thermophorèse, diffusiophorèse, effet de Magnus, drainage liquide, et sédimentation par gravité.
Il a conclu qu'en l'absence des effets turbulents, c'est la diffusion Brownienne et la thermophorèse qui sont importants en procédant à l'écriture des équations de conservation basées sur ces deux effets.

III.3.1 Hypothèses

Le modèle de Buongiorno traite le nano-fluide comme un mélange de deux-composants (fluide de base et nanoparticules) avec les hypothèses suivantes :

1. Ecoulement incompressible.

2. Aucune réaction chimique n'a lieu.

3. Forces externes négligeables.

4. Mélange dilué.

5. Dissipation visqueuse négligeable.

6. Transfert négligeable par rayonnement.

7. Nanoparticules et le de fluide de base sont localement en équilibre thermique.

III.3.2 Equations de conservations

Les équations classiques du mouvement et de l'énergie sont écrites en tenant compte des particularités du fluide en tant que nano-fluide. De plus, selon Buonogiorno une quatrième équation est incorporée dans le système, et de conservation des nanoparticules, qui sera explicitée en premier.

- L'équation de conservation des nanoparticules en absence de réaction chimique est :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \varphi = -\frac{1}{\rho_p} \nabla \cdot \mathrm{j_p} \tag{3.1}$$

où t est le temps, ϕ est la fraction volumique des nanoparticules, ρ_p est la densité des nanoparticules, $\mathbf{j}_p$ est le flux massique de diffusion the diffusion des nanoparticules représenté comme la somme de deux termes, la diffusion Brownienne et la themophorèse par

$$j_p = j_{p,B} + j_{p,T} = -\rho_p D_B \nabla \varphi - \rho_p D_T \frac{\nabla T}{T} \tag{3.2}$$

où T est la température. La thermophorèse est analogue à l'effet Soret dans les mélanges gazeux ou liquides.
D_B est le coefficient de la diffusion Brownienne donné par l'équation d'Einstein– Stokes:

$$D_B = -\frac{k_B T}{3\pi\mu d_p} \tag{3.3}$$

Où : k_B est la constante de Boltzmann, μ la viscosité du fluide et d_p est le diamètre de la nanoparticule.

La dépendance à l'égard la température du coefficient de thermophorèse est prise en considération explicitement, selon Buongiorno. Ainsi, D_T a les mêmes dimensions que D_B, à savoir, $m^2\ s^{-1}$.

L'expression de la vitesse de thermophorèse $\mathbf{V}_T$ est : $V_T = -\tilde{\beta}\frac{\mu}{\rho}\frac{\nabla T}{T}$ (3.4)

Où : ρ la densité du fluide et $\tilde{\beta}$ un facteur de proportionnalité donné par

$$\tilde{\beta} = 0.26\ \frac{k_f}{2k_f + k_p}$$

avec k_f et k_p les deux conductivités thermiques du fluide de base et de la nanoparticule, le flux correspondant devient

$$j_{p,T} = \rho_p\, \varphi\, V_T = -\rho_p\, D_T \frac{\nabla T}{T}$$

Et alors $D_T = \tilde{\beta}\frac{\mu}{\rho}\varphi$ (3.5)

Ceci constitue alors l'expression de conservation des nanoparticules :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{v}\cdot\nabla\varphi = \nabla\cdot(D_B\,\nabla\varphi + D_T\frac{\nabla T}{T}) \quad (3.6)$$

- L'équation de continuité pour le nano-fluide est :

  $$\nabla.\mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (3.7)$$

  où v est la vitesse du nano-fluide.

- L'équation de la quantité de mouvement d'un nano-fluide se présente sous la même forme que celle d'un fluide pur. Cependant une dépendance entre la viscosité et la concentration des nanoparticules comme souligné précédemment est à tenir compte. L'approximation de Boussinesq est ici nécessaire. Alors :

  $$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}\cdot\nabla\mathbf{v}\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\mathbf{v} + \rho\mathbf{g} \quad (3.8)$$

où: **g** est le vecteur d'accélération de la pesanteur.

et $\rho = \varphi\rho_p + (1-\varphi)\rho_f$

Mais elle peut être prise à celle du fluide de base si ϕ est petit comme c'est toujours le cas et conformément à l'approximation de Boussinesq traduisant la convection naturelle.

$$\rho\mathbf{g} = \left[\varphi\rho_p + (1-\varphi)\{\rho[1-\beta(T-T_0)]\}\right]\mathbf{g} \quad (3.9)$$

Avec ρ est ici la densité du fluide de base

- Quant à l'équation de l'énergie, on aura

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\mathbf{v}\cdot\nabla T\right)=-\nabla\cdot\mathbf{q} \tag{3.10}$$

où: c est la chaleur spécifique du nano-fluide, T est la température du nano-fluide et $\mathbf{q}$ est le flux d'énergie du nano-fluide à vitesse $\boldsymbol{v}$, soit,

$$\mathbf{q}=-k\nabla T+h_p j_p \tag{3.11}$$

et où k est la conductivité thermique du nano-fluide, h_p est l'enthalpie spécifique de la nanoparticule, soit $\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\mathbf{v}\cdot\nabla T\right)=\nabla\cdot(k\nabla T)-c_p j_p\cdot\nabla T$

et finalement pour tenir compte des deux mécanismes à savoir la diffusion Brownienne et la thermophorèse :

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\mathbf{v}\cdot\nabla T\right)=\nabla\cdot(k\nabla T)+\rho_p c_p\left(D_B\nabla\varphi\cdot\nabla T+D_T\frac{\nabla T\cdot\nabla T}{T}\right) \tag{3.12}$$

Il est entendu que la présence d'autres mécanismes pourra s'intégrer de la même manière avec les modèles ou lois appropriées.

III.3.3 Adaptation pour la convection forcée et mixte

Un terme additionnel devra être ajouté. Il s'agit de la thermophorèse due à l'application d'une pression externe issue du mécanisme propre à la convection forcée ou mixte.

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\mathbf{v}\cdot\nabla T\right)=\nabla\cdot(k\nabla T)+\rho_p c_p\left(D_B\nabla\varphi\cdot\nabla T+D_T\frac{\nabla T\cdot\nabla T}{T}-\varphi_0\mathbf{v}_0.\nabla T\right) \tag{3.13}$$

où: ϕ_0 est une fraction des nanoparticules moyenne et $\mathbf{v}_0$ la vitesse moyenne de l'écoulement.

III.3.4 Adaptation pour un milieu poreux

- Description d'un milieu poreux et modèles d'écoulement

Un milieu poreux est un matériau plein avec des structures intérieures vides entièrement saturées par un fluide mobile, ou un nano-fluide, comme, par exemple, sable, cailloux, et mousse métallique. En référence au schéma suivant, on peut considérer un volume

élémentaire représentatif *VER* pourra être choisi suffisamment petit sur une échelle macroscopique même si il est grand sur l'échelle de la structure simple actuelle dans le milieu poreux. Si V_f est la partie vide *de V*, alors appelons la porosité, ε, le nombre sans dimensions et strictement inférieure à l'unité. $\varepsilon = \frac{V_f}{V}$

Afin d'étudier la convection dans un milieu poreux, décrit comme un milieu continu, On peut aussi définir la vitesse intrinsèque, comme valeur moyenne de la vitesse locale du liquide $\mathbf{u}^*$

$$U = \frac{1}{V_f}\int_{V_f} \mathbf{u}^* \, \mathrm{dV} \tag{3.14}$$

dans la partie vide V_f du volume élémentaire représentatif V et la vitesse de filtration ou vitesse de Darcy, définie comme une moyenne intégrale de la vitesse intrinsèque sur le VER.

$$\mathbf{u} = \frac{1}{V}\int_{V} \mathbf{u}^* \, \mathrm{dV} \tag{3.15}$$

La relation dite de Dupuit–Forchheimer's lie donc les deux vitesses

$$\mathbf{u} = \varepsilon U$$

- L'écriture mathématique de l'équation de continuité sera donc pour un fluide saturé dans un milieu poreux

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho \mathbf{u}) = \mathbf{0} \tag{3.16}$$

- **Spécificité du milieu poreux.** La loi de Darcy est l'équation constituante reliant la vitesse aux forces :

$$\frac{\mu}{K}\mathbf{u} = -\boldsymbol{\nabla} p + \mathbf{f}$$

Où : *K* est la perméabilité qui dépend de la forme, taille et quantité des pores dans une section transversale à l'écoulement du fluide. μ est la viscosité dynamique du fluide, *p* est la pression du fluide et f représente les forces externes par unité de volume appliqué au fluide.

- **Darcy-Forchheimer.** Si l'hypothèse d'un écoulement non laminaire dans chaque pore n'est pas possible, la loi de darcy est remplacée par le modèle de Darcy–Forchheimer :

$$\frac{\mu}{K}\left(\mathbf{1} + \frac{\boldsymbol{\rho} c_f \sqrt{K}}{\boldsymbol{\mu}} |\mathbf{u}|\right)\mathbf{u} = -\boldsymbol{\nabla} p + \mathbf{f} \tag{3.17}$$

où: $|\mathbf{u}|$ est le module de **u,** ρ est la densité du fluide, c_f est un nombre sans dimension du milieu poreux appelé coefficient de trainée et qui dépend de la phase solide du milieu poreux.

Entre le cas particulier du modèle de Darcy ($c_f \to 0$), ce modèle permet une transition graduelle vers un régime hydraulique où les forces actives sont proportionnelles au carré de la vitesse, lorsque la condition suivante est remplie :

$$\frac{\rho c_f \sqrt{K}}{\mu} |\mathbf{u}| \gg \mathbf{1}$$

Un critère largement accepté et se basant sur un nombre de Reynolds spécifique est,

$$Re_K = \frac{\rho\sqrt{K}}{\mu} |\mathbf{u}|$$

permet de distinguer la perte du modèle de Darcy à partir de $Re_K \sim 10^2$ et une transition à partir de ce critère de 1-10.

- **Darcy-Brinkman.** La condition à la limite solide-fluide est une condition d'imperméabilité ($\mathbf{u}\cdot\boldsymbol{n} = 0$, où $\boldsymbol{n}$ est le vecteur unité normal à la surface), cependant cette condition de non-glissement ou d'adhérence non réalisée avec les modèles précédents provoque le même problème entre les équations de Navier–Stokes et celles d'Euler à propos du fluide parfait et du glissement/non-glissement..

Toutefois, une transition continue est possible entre le cas d'un fluide régi par les équations de Navier–Stokes tendant vers la loi de darcy est décrite par le modèle de Brinkman :

$$\frac{\mu}{K}\mathbf{u} - \mu'\boldsymbol{\nabla}^2\mathbf{u} = -\boldsymbol{\nabla}p + \mathbf{f} \qquad (3.18)$$

La quantité μ′ introduite est appelée la viscosité effective qui dépend de la viscosité μ du fluide et de la perméabilité K du milieu poreux.

Pour les suspensions diluées l'expression d'Einstein est utilisée :

$$\mu' = \mu\,[1 + 2.5(1 - \varepsilon)] \qquad (3.19)$$

Le modèle de Brinkman permet de prescrire un non-glissement des conditions à la paroi à l'instar des équations de Navier-Stokes pour un fluide hors d'un milieu poreux. Si la porosité est égale à l'unité, on a un fluide clair et ceci implique que $\mu' = \mu$. D'ailleurs, si $\varepsilon = 1$, l'équation se réduit à celle de Navier-Stokes sans contribution

d'inertie (accélération négligeable), à condition que la limite de la perméabilité infinie soit également prise ($K \to \infty$).

Au contraire, dans la limite d'une perméabilité très petite ($K \to 0$), le modèle de Brinkman se réduit à la loi de Darcy.

Une forme étendue de l'équation de Brinkman incorpore les effets inertiels est proposée par Vafai et Tien [36] ; et Hsu et Cheng [37].

$$\rho\left[\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}+\frac{1}{\varepsilon}(\mathbf{u}.\nabla)(\frac{\mathbf{u}}{\varepsilon})\right]=-\nabla p-\frac{\mu}{K}\left(\mathbf{1}+\frac{\rho c_f\sqrt{K}}{\mu}|\mathbf{u}|\right)\mathbf{u}+\frac{\mu}{\varepsilon}\nabla^2\mathbf{u}+\mathbf{f} \qquad (3.20)$$

- **Equations de conservations pour un nano-fluide dans un milieu poreux saturé**

Nous considérons un milieu poreux dont la porosité est dénotée par ε et la perméabilité par K. La vitesse de Darcy est dénotée par $\mathbf{v}_D$. Ceci est lié **à** $\mathbf{v}$ par $\mathbf{v}_D = \varepsilon\,\mathbf{v}$, comme explicité plus haut. Les équations de conservation seront pour un nano-fluide saturant un milieu poreux et suivant l'analyse de Buongiorno :

$$\nabla\cdot\mathbf{v}_D=0$$

$$\rho\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial\mathbf{v}_D}{\partial t}+\frac{1}{\varepsilon^2}\mathbf{v}_D\cdot\nabla\mathbf{v}_D\right)=-\nabla p+\tilde{\mu}\nabla^2\mathbf{v}_D-\frac{\mu}{K}\mathbf{v}_D$$
$$+\left[\phi\rho_p+(1-\phi)\left\{\rho\left[1-\beta(T-T_0)\right]\right\}\right]\mathbf{g}$$

$$(\rho c)_m\frac{\partial T}{\partial t}+(\rho c)_f\mathbf{v}_D\cdot\nabla T=\nabla\cdot(k_m\nabla T)+\varepsilon(\rho c)_p$$
$$\times\left(D_B\nabla\phi\cdot\nabla T+D_T\frac{\nabla T\cdot\nabla T}{T}-\frac{1}{\varepsilon}\phi_0\mathbf{v}_0\cdot\nabla T\right)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial t}+\frac{1}{\varepsilon}\mathbf{v}_D\cdot\nabla\phi=\nabla\cdot\left(D_B\nabla\phi+D_T\frac{\nabla T}{T}\right) \qquad (3.21)$$

Dans ces équations il a été introduit la viscosité effective *μ'*, la capacité de chaleur effective $(\rho c)_m$ et la conductivité thermique effective k_m du milieu poreux.

Il a été supposé que le mouvement Brownien et le mécanisme de thermophorèse demeurent inclus, bien que des moyennes de volume au-dessus d'un volume élémentaire représentatif soient prises. Il est à noter que la thermophorèse et le mouvement Brownien sont des

processus intrinsèques dans le sens que les moyennes appropriées sont assurées pour le nano-fluide seulement et la matrice du milieu poreux n'étant pas impliquée. De plus, les nanoparticules sont petits comparés aux pores comme indiqué plus haut.

Cette extension est l'objet d'un large débat. Certains discutent le point jusqu'où les expressions fiables existent pour l'évaluation des données de thermophorèse. Ils discutent également la similitude entre la thermophorèse dans les nano-fluides et la thermo-diffusion dans les mélanges binaires.

Choi et autres **[38]** se réfèrent au modèle de Buongiorno comme modèle non-homogène contrairement au modèle homogène où les propriétés du nano-fluide et la fraction de volume ne changent pas dans le domaine d'étude. Ils citent un grand nombre d'études numériques dans lesquelles le modèle homogène a été employé et dans lesquels les nombres de Rayleigh et de Nusselt ont été définis en termes de conductivité du fluide de base.

Il semble qu'il devrait être faisable pour exécuter des calculs numériques d'utiliser la combinaison des modèles relatif aux propriétés et rapportés dans les premiers chapitres. Le présent modèle pourra être adopté et qui tient compte justement des propriétés en accord avec la concentration des nanoparticules. Un début dans cette direction a été fait par Nield et Kuznetsov **[39],** qui ont obtenu une solution analytique approximative pour le problème de Horton-Rogers-Lapwood.

III.4 Travaux spécifiques avec le modèle de Buongiorno

III.4.1 Travaux pour convection naturelle externe, milieu non poreux

Le problème de l'écoulement de la couche limite d'une plaque verticale maintenue à une température constante (problème classique lié à Pohlhausen et Kukien) a été traité par Nield et Kuznetsov **[40],** Kuznetsov et Nield **[41, 42],** ensuite suivant un modèle révisé pour la condition nulle à la paroi du flux de particules, Kuznetsov et Nield **[43].**

III.4.2 Travaux pour convection naturelle et mixte, milieu poreux

Les travaux présentés dans la littérature pour ce domaine et intéressant les milieux poreux sont succinctement indiqués.

Le problème de Cheng-Minkowycz de la convection naturelle à travers une plaque verticale, dans un milieu poreux saturé par un nano-fluide, est étudié analytiquement par Nield et Kuznetsov **[40, 44].** L'extension au modèle révisé et indiqué a été discutée par Kuznetsov et Nield **[43].** Le modèle de Darcy est utilisé et la description du nano-fluide incorpore les effets du mouvement Brownien et la thermophorèse. Une solution de similarité est présentée, selon le nombre de Lewis, le nombre de rapport de flottabilité, le nombre de mouvement Brownien, et le nombre de la diffusion de thermophorèse. Le nombre de Nusselt est évalué et sa dépendance à l'égard ces quatre paramètres est étudiée.

Un grand exposé est présenté par Nield et Bejan **[45]** pour l'écoulement des nano-fluides dans les milieux poreux.

Dans le travail de Gorla et al. **[46],** une étude numérique de l'écoulement de couche limite au-dessus d'un coin vertical incorporée dans un milieu poreux saturé avec un nano-fluide est présentée. La vitesse, la température, et les profils de fraction de volume de nanoparticule, aussi bien que le coefficient de frottement, les taux de transfert de la chaleur et de la masse, sont présentés pour des variations paramétriques du paramètre de rapport de flottabilité, de paramètre de mouvement Brownien, du paramètre de la diffusion de thermophorèse, et du nombre de Lewis.

L'effet de l'angle d'inclinaison avec la verticale est étudié par Rana, et al. **[47].** Cette disposition mérite l'intérêt particulier en raison des applications telles que les collecteurs solaires de film ou le stockage géothermique d'énergie. Les auteurs étudient numériquement l'écoulement mixte régulier de couche limite de convection d'un nano-fluide incompressible le long d'un plan incliné dans un milieu poreux. Le nombre de Nusselt s'avère en diminution avec l'augmentation du nombre de mouvement Brownien ou du nombre de thermophorèse, tandis qu'il augmente avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison. Les effets de Lewis, rapport de flottabilité, et le paramètre de la convection mixte sur des distributions de la température et de concentration sont également examinés en détail.

Pour la convection mixte, on relève que le modèle utilisé est parfois celui dit homogène.

Ahmad et Pop **[48],** étudient l'écoulement mixte régulier de couche limite convective sur une plaque verticale incorporée dans un milieu poreux saturé de nano-fluide, se rapportant à différents types de nanoparticules. Les auteurs emploient le modèle homogène de nano-fluide proposé par Tiwari et Das **[35].**

Le même modèle de nano-fluide est considéré par Nazar et al. **[49],** qui étudient l'écoulement mixte régulier de couche limite de convection d'un cylindre circulaire horizontal isotherme incorporé dans un milieu poreux saturé de nano-fluide. Les deux cas d'un cylindre de chauffage et aussi refroidi sont étudiés numériquement, au moyen d'un arrangement de discrétisation implicite en différence-finies. Trois types différents de nanoparticules sont considérés, et on constate que pour chaque nanoparticule particulière, et à mesure que la fraction de volume de nanoparticule augmente, l'importance du coefficient de frottement diminue, et ceci mène à une augmentation en valeur du paramètre mixte de la convection, qui ne produit d'abord aucune séparation. D'ailleurs, on constate également que le chauffage du cylindre retarde la séparation de la couche limite, et si le cylindre est assez chaud, elle est supprimée complètement. Au contraire, le refroidissement du cylindre se réalise le point de séparation de couche limite plus près du point inférieur de stagnation, et pour un cylindre suffisamment froid, il n'y aura pas de couche limite sur le cylindre.

PARTIE II ***CHAPITRE IV***

Dispersion-Revue critique

IV.1 Introduction

En présence d'un milieu poreux, un effet secondaire à l'écoulement surgit en raison du mélange et du recyclage des particules liquides locales par les chemins tortueux constitués par les particules solides du milieu poreux, **[50].** C'est la dispersion des vitesses.

IV. 2 Phénoménologie de la dispersion

IV. 2.1 Loi de Darcy et Darcy- Forchheimer en milieu poreux et dispersion

Modéliser des phénomènes de transport dans des milieux poreux par la mécanique continue exige le passage d'une balance microscopique à une balance macroscopique, qui rend nécessaire un pont entre le vrai milieu dispersif et un milieu continu factice.

Par exemple, aux vitesses élevées de filtration par un milieu poreux le fluide subit l'action de l'inertie microscopique. Le transfert thermique est non seulement affecté par l'écoulement macroscopique ; il est également influencé par l'interaction entre les fluctuations locales de la vitesse et la température à l'échelle du pore **[51],** causant les dispersions thermiques et massiques en cas d'un gradient de concentration..

D'un cadre historique, Darcy **[52].** a établi qu'à de basses vitesses de filtration par un milieu poreux, les pertes associées de pression sont proportionnelles à la vitesse imposée. En revanche, aux vitesses élevées de filtration, la chute de pression devient plus grande que celle donnée par la loi linéaire de Darcy.

- Au commencement, la déviation en rapport de la loi de Darcy a été considérée par rapport à la turbulence. Cependant, Beavers et al. **[53],** ont expérimentalement observé ce phénomène non linéaire et Dybbs et Edwards **[54],** pour des situations en régime laminaire.
- Plusieurs travaux expérimentaux ont été menés à bien afin de mesurer l'impact de l'inertie microscopique. À cet égard, Ergun **[55],** a proposé une corrélation empirique pour le coefficient d'inertie de Forchheimer apparaissant dans la limite non linéaire sous forme en relation avec la porosité et des constants déterminées. En ce qui concerne les constantes, McDonald et autres **[56],** ont suggéré des valeurs plus supérieures s'étendant et qui sont directement liés à l'état extérieur des particules solides.

- En outre, Chikh et al. **[57],** ont analysé numériquement le seuil existant entre les écoulements de Darcy et de non-Darcy dans un canal partiellement poreux tenant compte du coefficient d'inertie et de la perméabilité.
- Pour des milieux poreux avec une structure périodique ou répétitive, Coulaud et al. **[58],** ont évalué le coefficient d'inertie en calculant numériquement la perte macroscopique de la pression. Pour un arrangement régulier des cylindres, ces auteurs ont montré l'existence de trois régimes d'écoulement : Darcy (R_{ed}<1), transition (1<R_{ed}<13) et Forchheimer (13<R_{ed}<25) comme relevé au chapitre III.
- Sahraoui et Kaviany **[59],** ont proposé une corrélation basée sur une étude numérique pour la perméabilité *K*, et qui a été exprimée par $\frac{K}{d^2} = \frac{0.015\pi\varepsilon^{5.1}}{1-\varepsilon}$ pour une porosité comprise entre 0.4-0.8 avec *d,* le diamètre des cylindres disposés en ligne.
- Dans un travail lié, Ait Saada et Chikh **[60],** ont souligné l'importance des effets non linéaires sur l'hydrodynamique dans un milieu poreux de structure régulière.
- Dans le travail cité **[51],** une technique de moyenne sur une cellule avec pivotement dans le calcul des variables à l'échelle macroscopique et suivant le modèle de Darcy-Forchheimer, a été utilisé. Une contribution supérieure à 70% dans la chute de pression est due aux effets non-linéaires d'une part. D'autre part l'effet induit de dispersion est aussi trouvé à hauteur de 50% issu de ces mêmes effets non-linéaires. L'interaction de l'hydrodynamique et du champ thermique est soulignée.
- Les résultats sont illustrés dans la **Figure IV.1** qui montre les liens entre les champs de vitesse, leurs niveaux et les dispersions thermiques

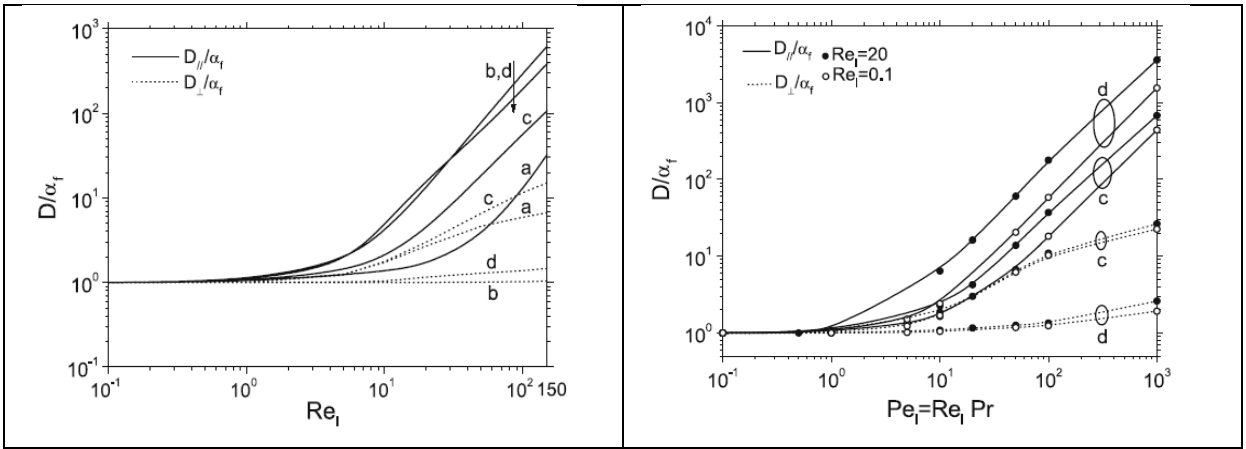


Figure IV.1 Effet des vitesses sur la dispersion thermique // et ⊥ selon Re et selon Pe [51].

IV. 2.2 Dispersion thermique et hydrodynamique en milieu poreux

La littérature sur la chaleur et le transport de masse dans des milieux poreux précise que la diffusion se compose de deux mécanismes de base avec une phénoménologie distincte **[61],**

- Le premier mécanisme est celui de la diffusion moléculaire, présent dans presque chaque procédé de transport. Le contrôle de ce mécanisme est associé aux gradients spatiaux des propriétés thermophysiques. La conduction pure de la chaleur et la diffusion massique pure sont deux exemples classiques de cette nature. La diffusion moléculaire se produit dans des milieux stagnants aussi bien que dans ceux en écoulement, mais est le seul mécanisme à enclencher dans les systèmes parfaitement stagnants.

- La dispersion hydrodynamique est la deuxième source connue de diffusion. On le trouve dans les configurations du fluide se déplaçant à travers les systèmes de milieux poreux en convection naturelle. Elle induit la dispersion thermique responsable de l'augmentation du transfert thermique. Pour le cas de la conduction pure de la chaleur, la conductivité thermique de dispersion est absente **[61, 62],**

La dispersion thermique est la propagation de la chaleur provoquée par des variations de la vitesse liquide en rapport de la vitesse moyenne. En plus de la diffusion thermique moléculaire, il y a la dispersion mécanique significative dans le flux de fluide de la chaleur et dans un milieu poreux fluide-saturé, en raison du mélange hydrodynamique des particules liquides passant par des pores. Cette dispersion thermique cause le transfert thermique additionnel, qui provoque d'autres complications en faisant face aux procédés de transport dans des milieux poreux saturés en fluide. En général on utilise la théorie du volume élémentaire représentatif qui peut être exploitée pour évaluer la conductivité thermique stagnante et la conductivité thermique de dispersion dans des milieux poreux

La convection naturelle dans des milieux poreux a suscité l'attention considérable dans les dernières décennies, partiellement dues à la demande croissante pour des solutions des problèmes écologiques. La majeure partie du travail existant sur cette matière a été consacrée à la convection naturelle favorisée par la diffusion d'une propriété simple qu'est la température dans la plupart des cas. La convection naturelle conduite par les effets combinés de deux composants diffusifs est un sujet d'intérêt **[61].**

Le cas d'une double diffusion est étudié par Telles et Trevisan **[61],** faisant ressortir quatre cas suivant une analyse d'échelle à partir des dominances moléculaires et dispersives. En rapport des forces motrices massique et thermique, les deux diffusions sont plus ou moins importantes.

IV. 2.3 Applications

La double dispersion a des applications de technologie, telles les lits sensibles de stockage de chaleur, élaboration des céramiques, dans les réservoirs de production d'huile et de gaz et la récupération de pétrole, **[63].** Les effets thermiques et massiques de la dispersion deviennent plus importants quand les effets d'inertie sont importants dans les milieux poreux, par exemple aux abords des puits.

On cite d'autres applications de la dynamique des sources souterraines chaudes, la chaleur terrestre traversant les couches aquifères, injection d'un fluide chaud et amorçages pour les déplacements du front en « reservoir engineering », l'échange thermique entre le sol et l'atmosphère, l'écoulement de l'humidité à travers les matériaux industriels poreux, et les échanges thermiques avec les lits de fluidisation.

Le transfert de masse en conditions isothermes a été étudié avec des applications aux problèmes du mélange de l'eau salée et pure dans les couches aquifères, des déplacements miscibles dans des réservoirs d'huile, de la propagation des corps dissous dans les lits et les laveurs ou de fluidisation des cristaux, du sel se filtrant dans les sols. La prévention de la dissolution de sel dans les eaux de lac près des rivages de mer est devenue un problème sérieux de recherche.

Le phénomène couplé de transfert de la chaleur et de la masse dans des milieux poreux retient l'attention due à ses applications intéressantes. Le phénomène d'écoulement est relativement complexe par rapport au processus thermique de convection pure. Des processus comportant le transfert de la chaleur et de la masse dans des milieux poreux sont souvent produits dans l'industrie chimique, même dans la technologie en « reservoir engineering », en liaison avec le processus thermique de récupération assistée, quand une phase dissoute, puis suivant des conditions se libère et diffuse dans les couches productrices. La propagation souterraine des pertes chimiques et d'autres polluants, le stockage de grain, le refroidissement par évaporation, et la solidification sont les quelques autres domaines d'application où on observe la convection naturelle thermo-solutale combinée dans des milieux poreux, **[64],**

IV.3 Identification de la dispersion

Plusieurs expériences ont été conduites pour identifier et quantifier la diffusion thermique effective (moléculaire + dispersive) dans le cas de la convection dans des milieux poreux **[65-67],**

La diffusion thermique a été explorée suivant une forme générale par plusieurs auteurs, par exemple par Fried et Combarnous **[68],**

Une comparaison entre les données expérimentales au niveau des valeurs des taux de transfert thermique **[69],** avec ceux théoriques obtenus par Plumb et Huenefeld **[70],** pour le problème convectif d'une plaque verticale chauffée et immergée dans un milieu poreux non-Darcéen, a conduit Cheng **[71],** à attribuer les différences au compte de la dispersion ignorée. Le nouveau modèle développé **[71],** suivant des diffusivités thermiques dispersives longitudinale et transversale en relation des vitesses avait conduit à de meilleures concordances avec les données expérimentales.

Hong et Tien **[72]** adoptent une expression linéaire de cette diffusivité avec la vitesse. De plus, une proportionnalité est aussi incluse selon le diamètre moyen du pore. Plumb **[73]** avait considérer la même dépendance avec un coefficient de proportionnalité allant de 1/3 à 1/7. Basé sur l'existence des dispersions, Lai et Kulacki **[74]** ont corrigé leurs travaux antérieurs portant sur la convection entre des surfaces horizontales et un milieu poreux non-Darcéen. Le coefficient impliqué avec le nombre de Peclet provoque un changement très important des taux de transfert thermiques obtenus sans tenir compte de la dispersion.

Dans un milieu poreux, les effets d'inertie sont prouvés pour des écoulements modérés et rapides, avec un critère de Reynolds basé sur le diamètre moyen du pore, supérieur à l'unité.

Pour les milieux à porosité faible, le modèle de Forchheimer a été utilisé largement par Vafai et Tien **[75, 76]** et Whitaker **[77].** Il a été constaté que lorsque les effets d'inertie sont présents, les effets de dispersion le sont aussi et si elles sont importantes dans les convections forcée ou mixte, il est aussi remarquable de les considérer dans les écoulements convectifs naturels vigoureux.

Des passages succincts sur la dispersion peuvent être trouvés dans **[78-81],**

La complexité des écoulements augmente de plusieurs ordre quand des effets thermiques, solutales, cheminement le long des parois, variations de la porosité du milieu poreux sont présents et pris en compte, à l'exemple des travaux de Dagan **[82],** Karimi-Fard et al **[83],** ou encore de Murthy et Sing **[84].**

L'étude de Murthy **[64]** relative à la convection mixte a permis de mettre en relief les effets de la dispersion thermique et massique, via les nombres de Peclets de dispersion thermiques et solutale sur les taux de transferts correspondants.

.

IV.4 Modèles de dispersion

D'habitude, la recherche sur la dispersion thermique dans des médias poreux se sert de la notion du volume élémentaire représentatif (VER) dans lequel les équations de transport sont intégrées **[85-88]** Ces modèles, basés sur un point de vue macroscopique, perdent des détails sur le modèle d'écoulement à l'intérieur du VER, mais avec l'information ad-hoc fournissent finalement les propriétés globales d'écoulement telles que les vitesses et les températures moyennes. Un certain nombre de papiers peuvent être trouvés dans la littérature, qui emploie les modèles macroscopiques détaillés pour la dispersion dans les milieux poreux **[89-92]** D'autre part, l'écoulement dans des milieux poreux peut également être analysé en modelant la topologie du milieu et en résolvant les équations d'écoulement à l'échelle du pore. Ce traitement indique la structure d'écoulement au niveau de pore **[93-96]** employé pour déterminer les tenseurs thermiques de dispersion avec des conditions d'interface périodiques pour des équations de la masse, de quantité de mouvement et d'énergie, autrement dit dans la cellule cinq types de conditions et combinaison de gradient longitudinal, transversal…..

IV.4.1 Modèle de Pedras et De Lemos

Pedras et De Lemos **[97]** ont conduit une étude pour déterminer les dispersions thermiques dans les milieux poreux schématisés et en relation avec deux cas du rapport des conductivités thermiques du solide et du fluide du milieu poreux. Ce travail intéressant présente des résultats sous diverses conditions et impliquant des dispersions longitudinale et transversale.

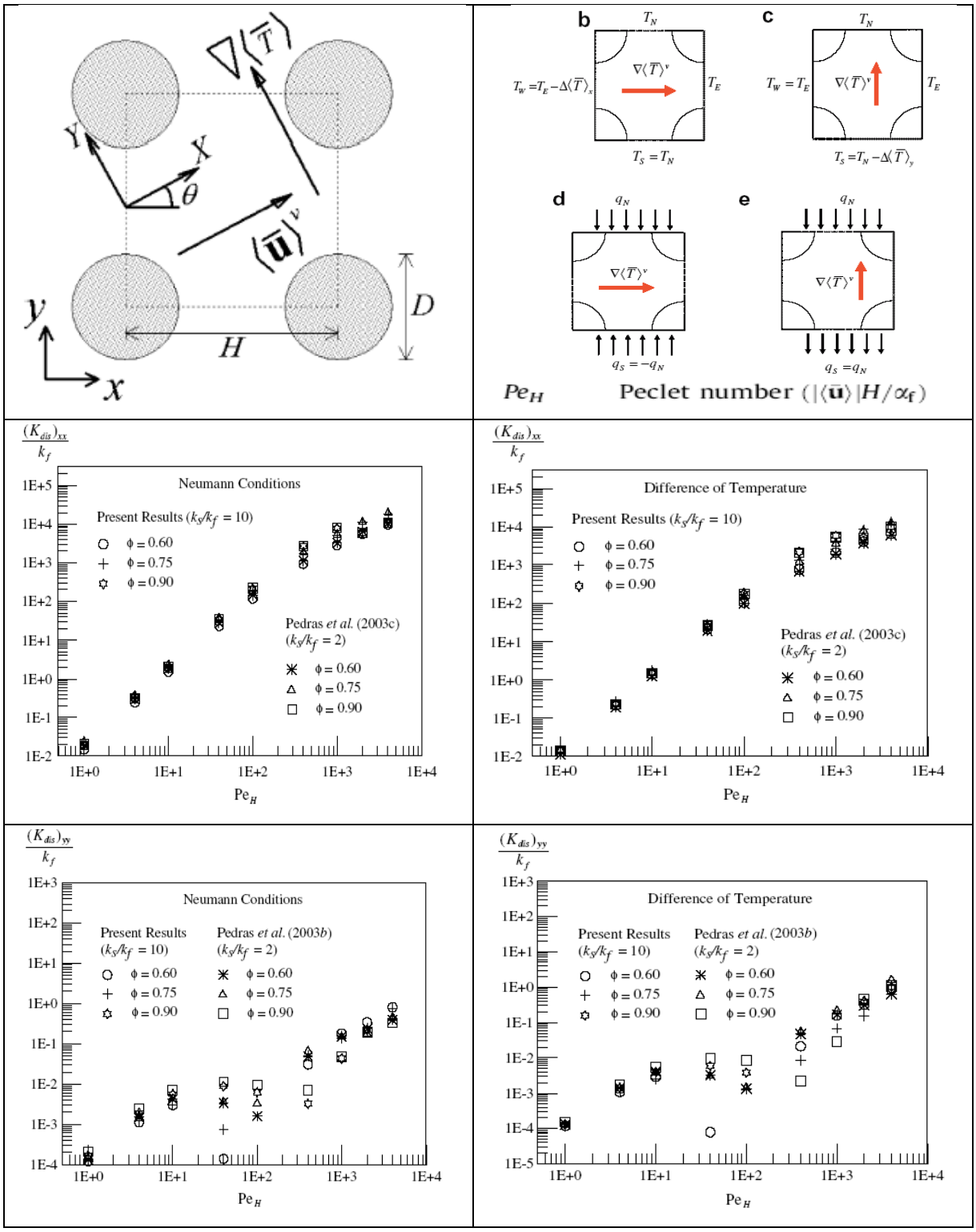


Figure IV.2 cellule unitaire de calcul ; différents conditions aux limites : b)-e) [97]
Figure IV.3 Dispersion thermique longitudinale pour k_s/k_f=2 et k_s/k_f=10; G : cond. Newmann ; D : cond. Temp [97]
Figure IV.4 Dispersion thermique transversale pour k_s/k_f=2 et k_s/k_f=10; G : cond. Newmann ; D : cond. Temp [97]

Pour avoir une vue détaillée des résultats et de la procédure, l'ensemble est reporté dans la **Figure IV.2, Figure IV.3** et **Figure IV.4.**

D'après la **Figure IV.2** il est montré que le rapport des conductivités thermiques n'a que peu d'influence sur la dispersion longitudinale pour une large gamme du nombre de Peclet et de porosités. Une comparaison avec les résultats établis pour $k_s/k_f = 10$ et ceux calculés par **[98]** pour $k_s/k_f = 2$ montre une concordance satisfaisante. Ainsi, la dispersion thermique longitudinale n'est en fait dépendante que de la conductivité thermique du fluide.

Cet effet est toutefois différent pour la dispersion thermique transversale, **Figure IV.3**, où une déviation est observée vers $Pe_H = 100$ avec une dispersion plus grande pour un rapport plus grand. Selon Pedras et al. **[98]** des recirculations derrière les barres sont observées.
Cinq principaux résultats de l'étude **[97]** émergent :

- Les dispersions thermiques longitudinales ne dépendent pas ou peu pour les transversales, des conditions aux limites en raison des champs de température similaires dans le fluide.
- La conductivité thermique longitudinale, la plus importante puisqu'elle est de l'ordre 10^2 par rapport à la transversale, n'est pas affectée par les variations de la porosité, ni par le rapport des conductivités thermiques solide-liquide.
- Par contre pour la conductivité thermique transversale, l'influence de la morphologie de la phase solide (tubes carrés, circulaires…) est perceptible pour une morphologie moyenne.
- Une porosité faible provoque l'obstruction des sections offertes à l'écoulement et influence la dispersion transversale.
- La dispersion transversale est réduite pour certaines porosités et pour des rapports élevés des conductivités thermiques.

L'objectif d'un tel effort de recherches était d'étudier l'effet du rapport de conductivité thermique entre les phases solide et liquide sur le transport dispersif dans des milieux fortement perméables.

Finalement les corrélations suivantes pour les dispersions longitudinale et transversale sont établies.

$$\frac{(K_{dis})_{xx}}{k_f} = 3.45\ 10^{-2} {Pe_H}^{1.65} \qquad \frac{(K_{dis})_{yy}}{k_f} = 1.55\ 10^{-4} {Pe_H}^{0.94}$$

IV.4.2 Modèle de Yang et Nakayama

Yang et Nakayama **[62]** ont proposé un modèle général de cellules unitaires et consistant en des solides rectangulaires reliés entre eux suivant un arrangement intégré, et pouvant décrire la plupart des milieux poreux homogènes.

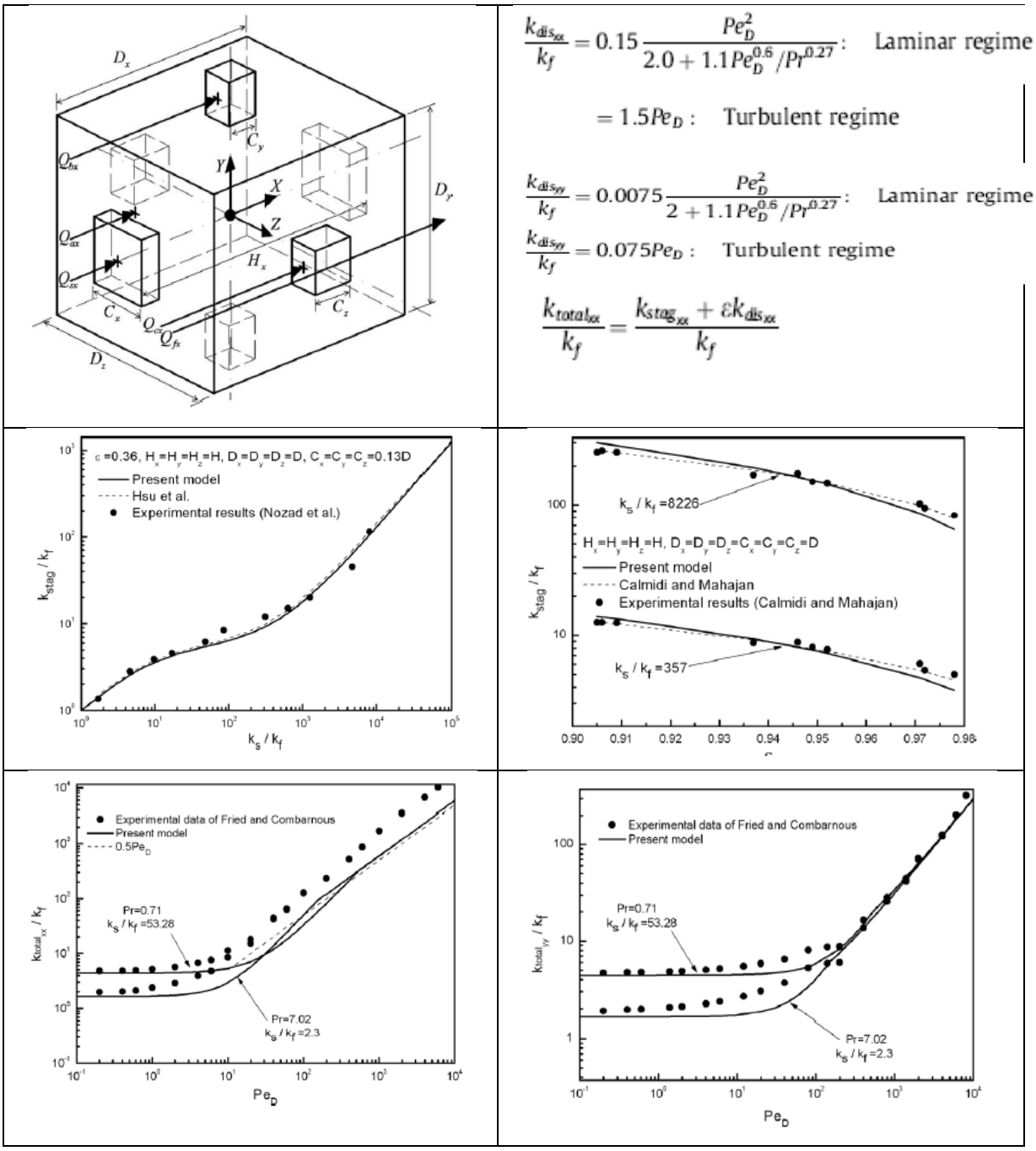


Figure IV.5 unité cellulaire de calcul, expressions en laminaire et turbulent pour les conductivités de dispersion, validation pour les conductivités moléculaires pour les lits et mousses poreuses, validation pour les conductivités longitudinale et transversale pour les lits, [62].

L'expression résultante pour la conductivité thermique stagnante a été validée en comparant les résultats obtenus avec ceux disponible avec la voie expérimentale et les données théoriques pour les lits structurés et mousses poreuses, d'une part.

D'autre part, et quant à la conductivité thermique de dispersion, une expression générale a été dérivée avec l'aide des deux équations d'énergie pour les deux phases solide et liquide. Il a été trouvé que l'interface du transfert thermique en cas de non- équilibre thermique local, commande la distribution spatiale de la température macroscopique et ainsi des dispersions thermiques. Les expressions résultantes pour les conductivités thermiques longitudinales et transversales de dispersion sont conformes aux données expérimentales disponibles et aux corrélations, **Figure IV.5.**

Il est tout à fait clair que la dispersion principalement longitudinale peut être modélisée. Qu'elle est liée à la vitesse dans le milieu poreux comme variable fondamentale de dépendance. Que le diamètre du pore moyen peut être pris comme longueur caractéristique et par là devient un paramètre de quantification de la dispersion et représente ainsi la structure du milieu. Son importance est d'autant plus grande pour les vitesses élevées, ce qui est la traduction des effets inertiels du modèle d'écoulement de Darcy-Forchheimer Qu'elle est présente indépendamment de la porosité du milieu. Qu'elle est insensible au rapport des conductivités thermiques des particules et du fluide, ce qui dans notre cas se comprend de la matrice au type de fluide.

Ainsi en première approximation, la modélisation de la dispersion thermique est à priori présentable selon la vitesse et le diamètre moyen des pores, avec un coefficient de proportionnalité incluant tous les autres effets mais qui est sensiblement constant.

PARTIE II ***CHAPITRE V***

Problématique & Modélisation

V.1. Problématique

Dans cette contribution, il s'agit d'une problématique faisant intervenir plusieurs complexités induisant à leurs tours des modélisations ou de choix de modèles pour concevoir une modélisation adaptée aux situations les plus complexes.

- **Intérêt du nano-fluide**

Les nano-fluides comme vu plus haut ont des applications réelles et potentielles considérables. La raison principale étant une plus grande conductivité thermique en rapport du fluide base. Ces colloïdes qui consistent en des suspensions de taille du nanomètre dispersées dans un fluide de base conventionnel ont été expérimentés et ont montré une amélioration notable et parfois extraordinaire du transfert thermique à travers le coefficient de convection. Cet effet est d'autant plus bénéfique qu'il se passe même aux faibles concentrations de la phase solide des nanoparticules. Comme relevé aux chapitres précédents un large éventail de travaux tant expérimentaux que théoriques ont été publiés dans la dernière décennie, on pourra en citer de plus **[6,11, 16, 99-107],** chapitre I.

- **Diffusions des nanoparticules**

Quelques pour cent de nanoparticules faits en métaux peuvent améliorer la conductivité thermique du nano-fluide dans la gamme de 15 - 40 % au-dessus du fluide de base. On comprend également que des augmentations typiques dans la gamme de 10 - 50 %, même jusqu'à 100 % sont dues à la micro-convection qui a été attribué au mouvement Brownien.

Pour expliquer l'amélioration observée dans la conductivité thermique, beaucoup d'auteurs ont suggéré une liste de mécanismes explicités dans le chapitre II précédent.

Keblinski et autres **[108]** ont suggéré tous les facteurs possibles de mécanismes qui sont responsables d'un certain changement extraordinaire de propriétés.

Parmi les modèles développés sur la base des mécanismes viables, Buongiorno **[25]** a proposé une explication alternative pour les augmentations anormales de coefficient de transfert thermique. Seules la diffusion Brownienne et la diffusion due à la thermophorèse ont été trouvés importantes comme mécanismes dans les nano-fluides. Ce point a été amplement développé au chapitre III.

- **Intérêt du milieu poreux**

Une autre manière d'augmenter le transfert thermique est d'utiliser le milieu poreux avec le nano-fluide. Cette procédure est soit dictée initialement par des écoulements dans des procédés faisant intervenir des milieux poreux, soit envisagée pour ce but tout en admettant des pertes de charges supplémentaires admissibles. Le gain est alors confronté en termes thermiques relativement aux couts de pompage pour surmonter les résistances induites par la présence d'un milieu poreux.

La complexité du traverser un milieu poreux est décrite par la loi de Darcy-Forchheimer (chapitre III), quand les effets à inertie dominent.

- **Double diffusion et dispersion**

En plus, quand le transfert de la chaleur et de la masse couplés se produisent, et des effets à inertie sont prépondérants, les dispersions thermique et solutale deviennent significatives, chapitre IV. Ces effets ont été également observés suivant un certain niveau lors de la convection naturelle vigoureuse. La dispersion hydrodynamique peut être aussi bien provoquée par écoulement et obstruction géométrique **[109].** Elle est généralement attribuée à la distribution de vitesse dans chaque pore variable.

Il est à souligner ici, que la dispersion thermique due aux variations des vitesses du fluide de base, et la dispersion thermique produite par les particules fines ou la dispersion de nanoparticules ne sont pas similaires.

Pour les nanoparticules, Chandrasekar et autres **[104]** dans un travail de revue sur les nano-fluides ont argué le fait que la dispersion thermique est le mécanisme causant le perfectionnement du transfert thermique. L'impact extrêmement grand des collisions moléculaires sur une particule fine avec la taille moins de 0.1µm produit une force qui provoque la dispersion, Michaeledis **[111]**

Cependant, Kumar et al. **[110]** ont observé que la dispersion induisant la conductivité thermique additionnelle est située près des interfaces fluide-structure. Il est à rappeler que le transfert thermique principal est celui de la phase solide du milieu poreux.

Buongiorno **[25]** a déclaré que l'énergie transférée par la dispersion des nanoparticules est négligeable. En se basant sur la littérature passée en revue, il est clair que le rôle de la dispersion des nanoparticules est encore peu clair. De l'autre côté, il était bien établi que la

dispersion provoquée par l'écoulement ait été corrélée avec le transfert thermique ou solutale longitudinal et transversal.

En résumé, il est plus important de considérer la dispersion thermique ou solutale induite par les variations de vitesse (dispersion hydrodynamique) prouvée expérimentalement chapitre IV, et donc intéressant le nano-fluide comme un tout (fluide base). D'ailleurs, l'amélioration de la conductivité thermique du fluide de base y est incluse du fait de la présence des nanoparticules. Ce tout donc se meut avec une dispersion hydrodynamique et dans ce cadre, la dispersion des nanoparticules quoique négligeable selon plusieurs auteurs est incluse dans cet ensemble.

Avec précision, la dispersion hydrodynamique se rapporte à un mélange de solide-liquide dans un milieu poreux de diamètre de pore ayant au moins des diamètres de l'ordre de 20-800 μm.

Pour un fluide clair, le sujet de la dispersion a été étudié par plusieurs auteurs. Cheng **[112],** Hong et Tien **[72]** ont proposé que la diffusivité thermique effective puisse être considérée comme la somme de la diffusivité moléculaire et de la diffusivité de dispersion.

Le concept macroscopique de la dispersion thermique ou solutale peut être modelé par la vitesse et le diamètre de pore, comme montré dans le chapitre IV. Il a également noté que le modèle a été soutenu par les travaux expérimentaux.

Mokmeli et Saffar-Avval **[113]** ont rapporté quelques modèles de dispersion pour les nano-fluides. Ils ont conclu que l'anomalie entre les modèles proposés de dispersion et les résultats expérimentaux étaient rarement plus grand que 5%.

Pour le milieu poreux, les nombreuses investigations **[50, 61, 64, 74, 96, 114]** ont été conduites pour étudier les effets de dispersion en de diverses situations. Les effets de dispersion de double sur un transfert de la chaleur et de la masse simultané a été étudiés par Amin **[115]** pour un fluide classique.

- **Travaux conduits en convection naturelle dans un milieu poreux saturé de nano-fluide**

Les travaux édités récents ont été le sujet de la convection naturelle dans un milieu poreux saturé par un nano-fluide. Par exemple, Gorla et Chamkha **[116]** ont analysé un fluide diffusif simple au-dessus d'une plaque verticale non-isotherme.

Pal et Mondal **[117]** ont traité quelques effets combinés par un milieu poreux non-Darcy. D'autres effets ont été considérés dans le papier de Hamad et de Ferdows **[118].**

Le problème de la convection mixte par un nano-fluide est étudié par Rashad et al. **[119]** et Rana et al **[120].** Murthy et al **[121]** se sont concentrés sur l'effet de Soret pour un double cas diffusif.

Srinivasacharya et Surender [34] ont exploré le même cas avec le milieu poreux doublement stratifié.

Kuznetsov et Nield ont étudié le problème général pour une plaque verticale dans le cas diffusif thermique **[41]** et dans le double cas diffusif **[42].** Ils ont revisité leur modèle, y compris la condition convective passive **[123]**

Nield et Kusnetsov dans **[40, 43, 44, 124]** ont examiné en simple diffusif, la double couche limite diffusive et le modèle révisé dans un milieu poreux.

En se basant sur cette discussion et tenant compte de la complexité, il est intéressant de développer un modèle mathématique plus complexe et adapté pour tenir compte des éléments avancés à savoir une double diffusion thermique et solutale dans un milieu poreux Darcéen ou non-Darcéen tout en utilisant les deux phénomènes les plus significatifs du mouvement Brownien et de la thermophorèse des nanoparticules d'un nano-fluide.

A ces effets, les phénomènes de dispersion dans le milieu poreux sont pris en compte et la condition convective passive des nanoparticules à l'interaction plaque-milieu poreux est aussi étudiée. On pourra par la suite, envisager une condition frontière thermiquement constante ou encore une condition d'existence d'un flux thermique.

V.2. Formulation mathématique

V.2.1 Représentation physique et hypothèses

Un croquis du domaine physique et du système de coordonnées tels que l'axe x est le long de la plaque verticale tandis que l'axe y est normal à celui des x, est montré dans la **Figure V.1.**

- On considère ici l'écoulement laminaire en convection naturelle le long d'une plaque verticale immergée dans un milieu poreux homogène et isotrope avec la porosité ε.
- On part de l'hypothèse que l'équation de Darcy étendue par Forsheimer du mouvement du nano-fluide dans ce milieu poreux décrit l'écoulement avec des vitesses compatibles plus élevé nécessairement que celui représenté par l'équation de Darcy.
- Le nano-fluide impliqué se compose par un mélange d'un fluide de base auquel on a ajouté en plus des particules solides, caractérisés par une fraction de volume φ des nanoparticules. Seuls les deux mécanismes fondamentaux, à savoir le mouvement Brownien et la diffusion de thermophorèse sont pris en compte pour modéliser le comportement du nano-fluide **[25]** Pour la fraction de volume des nanoparticules, une équation additionnelle est incluse suivant le modèle de Buongiorno décrit au chapitre III au présent modèle mathématique.

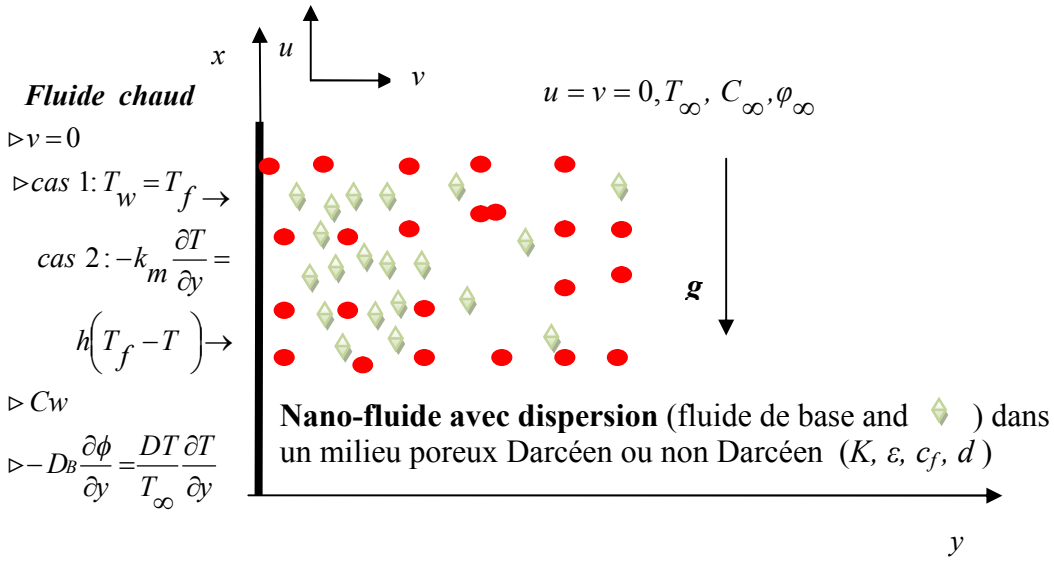


Figure V.1 Représentation de la physique du problème et des conditions aux limites

- Une attention particulière est apportée dans ce travail au transfert de la chaleur de convection et au transfert de masse qui prennent en place naturellement induits par une différence de température et une différence de concentration. Dans la formulation actuelle, l'effet d'inertie du mouvement au sein du milieu poreux et les dispersions thermiques et solutale sont pris en compte, chapitre IV.
- La plaque est maintenue à la température constante (cas1 ou :isotherme) et la constance des espèces de concentration à cet endroit, soit $T_w = T_f$ et C_w. On assume

sans restriction de la généralité que ces valeurs sont plus grandes que la température ambiante et la concentration des espèces loin de la paroi, T_∞ and C_∞, respectivement.

- Les effets de diffusions dites croisés (des effets de Dufour et de Soret) sont ici ignorés parce que le fluide de base du nano-fluide a généralement un poids moléculaire élevé. Pour les nano-fluides, Michaeledis **[111]** a constaté que l'effet de Soret est manifesté par le mécanisme de thermophorèse. D'autre part, le coefficient de transfert de masse augmente avec le nombre de Dufour seulement jusqu'à une certaine valeur critique du nombre de Soret. Cependant, la formulation actuelle peut être prolongée sans difficultés pour tenir compte de ces diffusions pour un cas spécifique (poids moléculaire modéré du nano-fluide, comme présenté dans **[42, 44]**
- L'approximation d'Oberbeck-Boussinesq habituelle en conditions d'utilisation des équations de Navier-Stokes pour le fluide est utilisée, elle concerne donc la convection naturelle.

V.2.2 Cas de condition convective et nanoparticules actives à la paroi

- Le cas 2 traité ou appelé par opposition : non-isotherme, est plus approprié. Une température constante à la paroi reflète un modèle d'un réchauffeur idéal suivant un bon contact et ayant une grande conductivité thermique. Mais, un état réaliste plus général et moins restrictif décrit tout à fait bien le transfert de chaleur de convection entre la plaque et le fluide chaud, Makinde et Aziz **[125].** Des surfaces isothermes et uniformes de flux de la chaleur sont rarement obtenues dans la pratique. D'ailleurs, la conception et l'optimisation des systèmes thermiques ont besoin de matériaux classiques ou nouveaux qui sont choisis en dépit de leur basse conductivité thermique, comme expliqué par Jaluria **[126].** Le développement d'une conception réalisable et acceptable de n'importe quel système thermique devrait être couplé à une condition à la limite convective.

- Une fraction prescrite de la concentration de nanoparticules à la paroi est aussi trouvé non raisonnable. D'après Nield et Kuznetsov **[43, 115, 124],** un modèle révisé qui inclut l'état de condition à la limite passive est adopté ici, tandis que la valeur correspondante loin de cette plaque est dénotée φ_∞.

V.2.3 Développement du modèle

Le modèle de base développé dans le travail de Nield et de Kuznetsov **[44]** est employé. Néanmoins il est ici étendu suivant les hypothèses et conditions indiquées plus haut.

Les équations régissantes de la conservation pour le champ des quatre variables, le vecteur de la vitesse **v** = (*u*, v), la température *T*, la concentration de l'espèce *C* et la fraction de volume des nanoparticules ϕ, peuvent être écrits comme :

$$\nabla.\mathbf{v} = 0 \tag{5.1}$$

$$0 = -\nabla p - \frac{\mu}{K}\mathbf{v} - \rho_{f\infty}\frac{c_f}{\sqrt{K}}\mathbf{v}|\mathbf{v}| + \left[\phi\rho_p + (1-\phi)\rho_f\left(1 - \beta_T(T-T_\infty) - \beta_C(C-C_\infty)\right)\right]\boldsymbol{g} \tag{5.2}$$

$$(\rho c)_f \mathbf{v}.\nabla T = k_m\nabla^2 T + \varepsilon(\rho c)_p\left[D_B\nabla\phi.\nabla T + \left(\frac{D_T}{T_\infty}\right)\nabla T.\nabla T\right] \tag{5.3}$$

$$\frac{1}{\varepsilon}\mathbf{v}.\nabla C = D_S\nabla^2 C \tag{5.4}$$

$$\frac{1}{\varepsilon}\mathbf{v}.\nabla\phi = D_B\nabla^2\phi + \left(\frac{D_T}{T_\infty}\right)\nabla^2 T \tag{5.5}$$

Le fluide se déplace dans des pores, entrant en contact avec la paroi aussi bien avec la phase solide du milieu poreux. L'écoulement intrinsèque peut satisfaire la condition de non-glissement au contact de la partie solide. Cependant, la vitesse de filtration dans la loi de Darcy est une vitesse ramenée à une moyenne comptabilisée dans le VER comme expliqué dans le chapitre dédié à cet effet et dont le volume est plus grand que celui calculé avec les dimensions d'une microstructure. En conséquence, on s'attend à ce contact une vitesse d'écoulement différente de zéro et est parfaitement admissible.

Quelques auteurs avaient l'habitude d'utiliser le modèle de Brinkman pour satisfaire la condition de non-glissement. Les contrôles expérimentaux du type équation de Brinkman ont montré qu'elle est valide pour un milieu poreux à porosité plus grande que 0.8, Rubinstein **[127].** Le terme du Laplacien dans le modèle de Brinkman est significatif seulement dans une

couche de contact mince dont l'épaisseur habituelle est de l'ordre de la racine carrée de la perméabilité, pour laquelle l'épaisseur de couche limite prédite par le modèle peut être moins que la taille de pore. A cet effet, l'utilisation du non-glissement comme condition fluide-solide du milieu poreux peut mener à un changement du modèle d'écoulement près de ce contact, **[128, 129].**

Enfin, ces équations sont sujettes macroscopiquement aux conditions aux limites suivantes :

$$at\ y = 0, v = 0, T = T_w = T_f\ (\textbf{cas 1}) \qquad ou \qquad -k_m \frac{\partial T}{\partial y} = h\left(T_f - T\right)(\textbf{cas 2}),$$

$$C = C_w\,, \qquad D_B \frac{\partial \phi}{\partial y} + \left(\frac{D_T}{T_\infty}\right)\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \qquad (5.6a)$$

$$quand\ y \to \infty,\ u = v = 0,\ T \to T_\infty\,,\ C \to C_\infty\,,\ \phi \to \phi_\infty \qquad (5.6b)$$

Ici, le milieu poreux est caractérisé par la porosité ε, la perméabilité K et la constante empirique c_f liée aux effets d'inertie conformément au modèle Darcy-Forsheimer.
Le vecteur d'accélération de la gravité est indiqué par **g.**
β_T et β_C sont les dilatations volumétrique thermique et son équivalent le coefficient solutale du fluide de base.
ρ est p sont la densité et la pression du nano-fluide. L'indice inférieur p représente la particule et $le\ f$ le fluide de base.
Les coefficients D et μ sont le coefficient de diffusion et la viscosité du nano-fluide.
Les indices B, T, et S se sont rapportés au mouvement Brownien, à l'effet de thermophorèse et à la diffusivité solutale du milieu poreux, respectivement.
La conductivité thermique efficace est k_m pour le milieu poreux et la capacité de chaleur est (ρc).
h est le coefficient de transfert thermique entre la plaque et le fluide chaud.

Considérant que la concentration des nanoparticules est diluée, de sorte que l'équation (5.2) puisse être linéarisée et reformulée comme

$$0 = -\nabla p - \frac{\mu}{K}\mathbf{v} - \rho_{f\infty}\frac{c_f}{\sqrt{K}}\mathbf{v}|\mathbf{v}| + \left[(\rho_p - \rho_{f\infty})(\phi - \phi_\infty) + (1-\phi_\infty)\rho_{f\infty}(\beta_T(T - T_\infty) + \beta_C(C - C_\infty))\right]\boldsymbol{g} \quad (5.7)$$

Selon la présentation ci-dessus incluant les dispersions thermique et solutale, $\alpha = k_m/(\rho c)_f$ et D_S sont la somme des diffusivités moléculaires et la dispersion qui sont exprimées linéairement avec la vitesse **[72].**

Avec le concept de la couche limite et des approximations classiques relatives, les équations de conservation (5.1.5.3-5.5, 5.7) deviennent :

- ***équation de continuité***

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5.8)$$

- ***équation de quantité de mouvement***

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{K}u - \rho_{f\infty}\frac{c_f}{\sqrt{K}}u^2 + \left[(1-\phi_\infty)\rho_{f\infty}g\left(\beta_T(T - T_\infty) + \beta_C(C - C_\infty)\right) - (\rho_p - \rho_{f\infty})g(\phi - \phi_\infty)\right] \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (5.10)$$

- ***équation de l'énergie***

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left((\alpha_m + \delta du)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\varepsilon\,(\rho c)_p}{(\rho c)_f}\left[D_B\frac{\partial \phi}{\partial y}.\frac{\partial T}{\partial y} + \left(\frac{D_T}{T_\infty}\right)\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2\right] \quad (5.11)$$

- ***équation de la concentration des espèces***

$$u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} = \varepsilon\,\frac{\partial}{\partial y}\left((D_{Sm} + \sigma du)\frac{\partial C}{\partial y}\right) \quad (5.12)$$

- ***équation de la fraction volumique des nanoparticules***

$$u\frac{\partial \phi}{\partial x} + v\frac{\partial \phi}{\partial y} = \varepsilon\left(D_B\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \left(\frac{D_T}{T_\infty}\right)\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{5.13}$$

Où $\delta,\ \sigma,\ d,\ \alpha_m$ et D_{Sm}sont des constants de la dispersion, le diamètre moyen des pores, la diffusivité thermique moléculaire et celle équivalente de la concentration des espèces dans le milieu poreux, respectivement.

Par dérivation croisée des équations (5.9) et (5.10), la pression p est éliminée pour aboutir à une seule équation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[u + \frac{c_f\sqrt{K}}{\nu}u^2\right] = \frac{(1-\phi_\infty)\rho_{f\infty}gK}{\mu}\left[\beta_T\frac{\partial T}{\partial y} + \beta_C\frac{\partial C}{\partial y}\right] - \left(\rho_p - \rho_{f\infty}\right)\frac{gK}{\mu}\frac{\partial \phi}{\partial y} \tag{5.14}$$

V.2.4 Modèle mathématique adimensionné

D'après les travaux de **[43, 44]** pour le milieu poreux les quantités adimensionnées sont introduites afin d'obtenir des solutions affines ou de similarités :

$$\eta = \frac{y}{x}{Ra_x}^{1/2}, f(\eta) = \frac{\psi}{\alpha_m\,{Ra_x}^{1/2}}\ \left(u = \frac{\partial \psi}{\partial y}\ and\ v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}\right),$$
$$\theta = \frac{T-T_\infty}{T_f-T_\infty},\ \gamma = \frac{C-C_\infty}{C_w-C_\infty},\ s = \frac{\phi-\phi_\infty}{\phi_w-\phi_\infty} \tag{5.15}$$

Quant au nombre de Rayleigh local, il est introduit et défini pertinemment par

$$Ra_x = \frac{(1-\phi_\infty)\rho_{f\infty}\beta_T\left(T_f-T_\infty\right)gKx}{\mu\alpha_m} \tag{5.16}$$

Où η est la variable de similarité, $f\,(\eta)$ est la fonction adimensionnée du courant, $\theta\,(\eta)$ la température adimensionnée, $\gamma\,(\eta)$ est la concentration des espèces adimensionnée et $s\,(\eta)$ est la fraction volumique des nanoparticules adimensionnée.

Usant des quantités adimensionnées (5.15-5.16), les équations (5.11-5.14) avec les conditions aux limites (5.6a-5.6b) peuvent être réduites à un système d'équations différentielles ordinaires pour lesquels une solution numérique est avantageusement obtenue

$$f''[1 + 2F_0 Ra_d f'] = \theta' + N_c\gamma' - N_r s' \tag{5.17}$$

$$\theta''[1 + \delta Ra_d f'] = -\frac{1}{2} f\theta' - N_b s'\theta' - N_t(\theta')^2 - \delta Ra_d \theta' f'' \tag{5.18}$$

$$\gamma''[1 + \xi Ra_d f'] = -\frac{1}{2} L_e f\gamma' - \xi L_e Ra_d \gamma' f'' \tag{5.19}$$

$$s'' = -\frac{1}{2} L_n f s' - \frac{N_t}{N_b}\theta'' \tag{5.20}$$

Les conditions aux limites deviennent :

$$\text{à } \eta = 0,\ f = 0, \quad \theta = 1\ (\textbf{cas 1}) \quad ou \quad \theta' + Bi(1-\theta) = 0\ (\textbf{cas 2}),$$
$$\gamma = 1, \quad N_b s' + N_t\theta' = 0 \tag{5.21a}$$

$$pour\ \eta \to \infty,\ \ f' = 0,\ \ \theta \to 0,\ \ \gamma \to 0,\ \ s \to 0 \tag{5.21b}$$

Les paramètres indiqués dans ces équations et qui apparaissent à partir de l'adimensionnement sont définis comme suit :

$$F_0 = \frac{c_f\sqrt{K}}{\nu d}\alpha_m \tag{5.22}$$

$$Ra_d = \frac{(1-\phi_\infty)\rho_{f\infty}\beta_T(T_w - T_\infty)gKd}{\mu\alpha_m} \tag{5.23}$$

$$N_c = \frac{\beta_C(C_w - C_\infty)}{\beta_T(T_w - T_\infty)} \tag{5.24}$$

$$N_r = \frac{(\rho_p - \rho_{f\infty})(\phi_w - \phi_\infty)}{(1-\phi_\infty)\rho_{f\infty}\beta_T(T_f - T_\infty)} \tag{5.25}$$

$$N_b = \frac{\varepsilon\,(\rho c)_p D_B(\phi_w - \phi_\infty)}{(\rho c)_f \alpha_m} \tag{5.26}$$

$$N_t = \frac{\varepsilon\,(\rho c)_p D_T(T_f - T_\infty)}{(\rho c)_f T_\infty \alpha_m} \tag{5.27}$$

$$L_e = \frac{\alpha_m}{\varepsilon D_{Sm}} \tag{5.28}$$

$$L_n = \frac{\alpha_m}{\varepsilon D_B} \tag{5.29}$$

$$Bi = \frac{Bi_x}{Ra_x{}^{1/2}} = \frac{hx/k_m}{Ra_x{}^{1/2}} \tag{5.30}$$

F_0 est un paramètre qui représente la structure du milieu poreux. Il combine les effets d'inertie issus du terme additionnel à celui de Darcy et la diffusivité du milieu poreux. Ra_d, est le précédent nombre de Rayleigh qui est maintenant exprimé avec d, diamètre du pore.
N_c, N_r, N_b, and N_t sont le nombre régulier de double-diffusion d'Archimède, son équivalent pour le nano-fluide, le paramètre du mouvement Brownien et celui de la thermophorèse, respectivement.
L_e réfère au nombre classique de Lewis, L_n est le nombre de Lewis du nano-fluide. Le nouveau constant de la dispersion solutale qui apparait ξ est égal à $\varepsilon\sigma$.
Si on se place dans le cas de la condition à la limite convective, l'interaction entre la plaque et le fluide chaud est représentée par le nombre de Biot Bi.

V.3. Quantités d'intérêt

Pour les applications pratiques, les quantités physiques d'intérêt sont le flux de chaleur à la paroi q_w et le flux massique à la paroi q'_w et les quantités physiques locales adimensionnées peuvent être quantifiées par

$$Nu_x Ra_x{}^{-1/2} = -[1 + \delta Ra_d f'(0)]\theta'(0) \tag{5.31}$$

$$Sh_x Ra_x{}^{-1/2} = -[1 + \xi Ra_d f'(0)]\gamma'(0) \tag{5.32}$$

Il est enfin à noter que le nombre de Sherwood du nano-fluide est toujours trouvé égal à $-s'(0) - \frac{N_t}{N_b}\theta'(0) = 0$ et servira pour vérifier les résultats obtenus.

PARTIE II ***CHAPITRE VI***

Résultats & Discussion

Dans ce chapitre, nous reproduisons les résultats les plus prometteurs sous forme de graphes et de tableaux avec les discussions nécessaires qui situent la dépendance des paramètres mis en évidence dans la modélisation précédente.

Pour ce faire, les équations du modèle mathématique ont été d'abord présentées sous forme d'un système d'équations différentielles couplées, ensuite un organigramme succinct a été élaboré afin de les résoudre via le code de calcul BVP de l'interface Matlab.
A cette fin, on a procédé à la validation, suivie de plusieurs aspects les plus pertinents afin de mettre en exergue la double dispersion pour la double diffusion dans un milieu poreux Darcéen ou non-Darcéen.

Il s'agit de considérer l'effet de la double dispersion dans le cas d'une plaque isotherme pour les cas d'un nano-fluide titrée comme faible en rapport de ces paramètres et pour le cas d'un nano-fluide à forts paramètres afin de couvrir l'effet pour plusieurs types de nano-fluides.

Il est à noter que la convection naturelle est traduite sous sa dynamique dite vigoureuse et une dynamique non-vigoureuse.

D'autres résultats ont été obtenus pour une condition de la plaque convective et échangeant de la chaleur avec un fluide supposé chaud par rapport à la paroi. Pour ne pas alourdir le document, des valeurs restrictives ont été choisies pour illustrer l'effet d'une telle condition.

Pour savoir si la révision de la condition à la paroi et relative à une condition dynamique non-passive des nanoparticules est d'importance ou non, son effet a été visualisé à travers de multiples graphes, tout en considérant un milieu dispersif.

Enfin, une analyse a été conduite pour déterminer l'influence des nombres de Lewis, le nombre régulier et celui du nano-fluide sur les profils de la couche limite hydrodynamique, thermique, de concentration et des nanoparticules, en cas aussi d'un milieu dispersif.

Une conclusion particulière résume les principaux résultats et la contribution à une connaissance plus détaillée particulièrement de la double dispersion dans un milieu poreux.

VI.1. Validation du code de calcul

L'ensemble des équations (5.17) - (5.20) est fortement non-linéaire et ne peut pas être résolu analytiquement. Considérant également les conditions aux limites éq. (5.21a – 5.21b), elles forment un problème de valeur aux limites en deux points, et qui peut être résolu numériquement au moyen d'une méthode des différences finies effective et itérative implémentant la formule de collocation dite du 3ème niveau de Lobatto.
Quand la différence relative entre l'itération précédente et l'itération courante atteint 10^{-7}, la solution est considérée convergée et le processus itératif est terminé.

Les régions d'écoulement sont contrôlées par neuf paramètres, à savoir F_0, Ra_d, N_c, N_r, N_b, N_t, L_e, L_n, et Bi. Pour vérifier la précision et par suite valider le code utilisé, deux cas spécifiques sont exécutés, correspondant
- au fluide mono-diffusive régulier ($N_c = N_r = N_b = N_t = 0$)
- et pour un nano-fluide mono-diffusive ($N_c = 0$ and $N_r = N_b = N_t = 0.2$).

Nield et Kuznetsov **[44]** ont rapporté quelques résultats pour les mêmes valeurs de ces paramètres en l'absence des effets de Dufour et de Soret et pour Le = Ln = 10. Par conséquent, le présent code a été employé et adapté à la condition non révisée telle que s = 1 à $\eta = 0$ pour se mettre en conformité avec le système utilisé dans **[44].**

Du **tableau VI.1**, les valeurs principales de $-\theta'(0)$ sont comparées à ceux rapportées par **[44]** et sont trouvées dans une bonne concordance.

Des calculs numériques ont été effectués pour la vitesse, la température, de concentration des espèces et la fraction de volume des profils de nanoparticules.

Pour mesurer la double dispersion sur les couches limites de double diffusion, des figures d'illustration sont montrées. Elles sont établies avec l'écoulement de Darcy, $F_0 = 0$ et avec l'écoulement de non-Darcy, $F_0 = 0.5$ pour le milieu poreux.
La double dispersion est incluse par le couple $\delta = \xi = 0.5$, alors que l'absence de la dispersion est calculée en plaçant $\delta = \xi = 0$.
La convection naturelle vigoureuse est représentée près $Ra_d = 2.0$ et la convection naturelle moins forte est caractérisée par $Ra_d = 0.5$

Tableau VI.1. Comparaison des valeurs de– $\theta'(0)$ pour un fluide mono-diffusif régulier et pour le cas du nano-fluide. L_e=10.0, L_n=10.0

	$-\theta'(0)$	
	Nield et Kusnetsov [44]	Présent résultats
fluide mono-diffusif régulier (N_b=0.,N_t =0., N_c=0., N_r=0.)	0.4439	0.44377568
Nano-fluide Mono-diffusif (N_b=0.2, N_t =0.2, N_c=0., N_r=0.2)	0.3343	0.33417924

VI.2 Cas 1: plaque isotherme

Pour un milieu poreux de non-Darcy et à partir de la **Figure VI.1**, la vitesse près de la paroi est réduite. Cette réduction est plus importante près de la paroi, parce que le terme d'inertie représente une force résistante ou de frottement. On peut aussi observer que la double dispersion affecte sensiblement les profils de vitesse, pour un milieu poreux Darcéen ou non-Darcéen. Cet effet est trouvé plus prononcé pour une convection naturelle forte que pour une convection faible. Il est intéressant de noter que les mêmes tendances sont trouvées dans la **Figure VI.2**

Cette dernière courbe est préparée pour tenir compte de la double dispersion quand la diffusion Brownienne, l'effet de thermophorèse, le double rapport diffusif régulier de flottabilité et le rapport de flottabilité du nano-fluide sont plus grands que ceux utilisés dans la **Figure VI.1.** Ici, la vitesse est davantage effectuée par l'effet de la double dispersion. Dans tous les cas, elle peut préciser qu'à proximité de la paroi, la vitesse est augmentée avec le groupe $[N_c, N_r, N_b, N_t]$.

Figure VI.3 et **Figure VI.4** montrent les profils de température avec le groupe à caractéristique faible du nano-fluide $[N_c, N_r, N_b, N_t]$ et avec un groupe plus puissant du nano-fluide. Ces figures indiquent que les augmentations de nombre de Rayleigh s'accompagnent des augmentations des distributions de la température. Ici encore, cela vaut la peine de mentionner que le double effet de dispersion sur les profils de température est faible, quand la convection naturelle est faible.

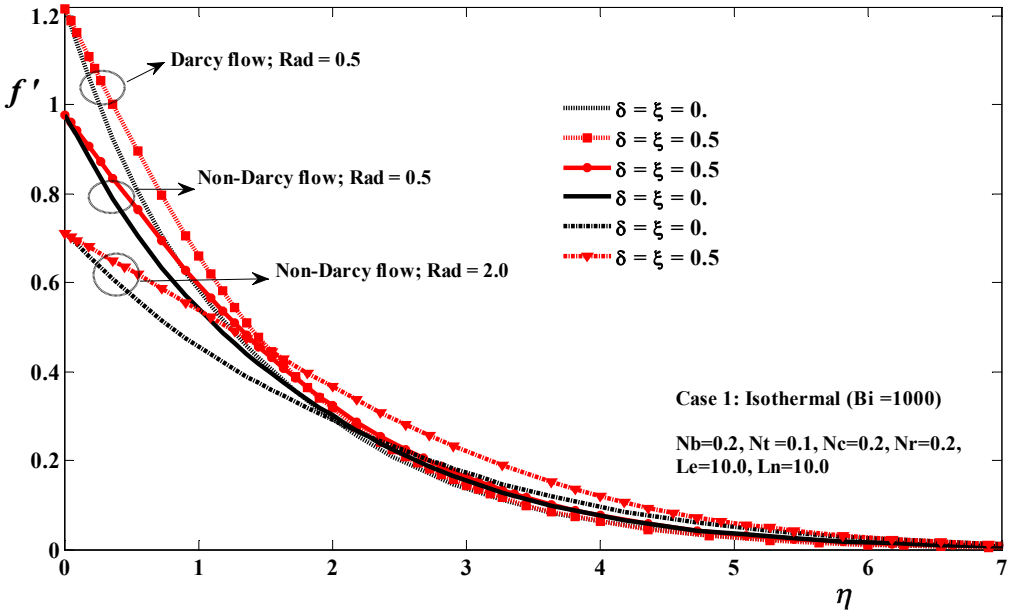


Figure VI.1 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de vitesses. Bi = 1000 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

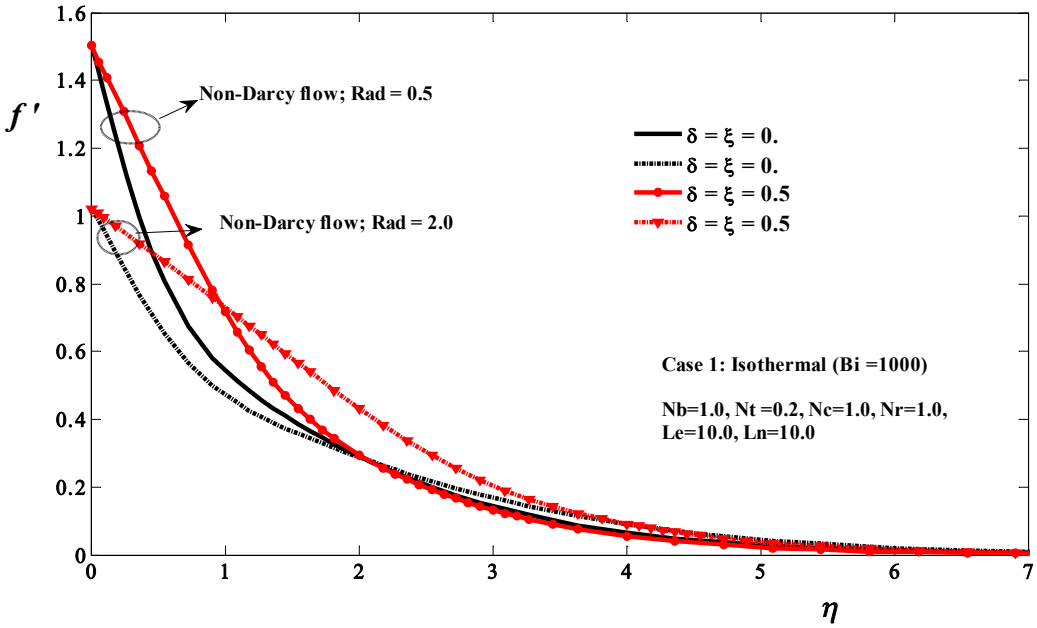


Figure VI.2 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de vitesses. Bi = 1000 et fortes valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

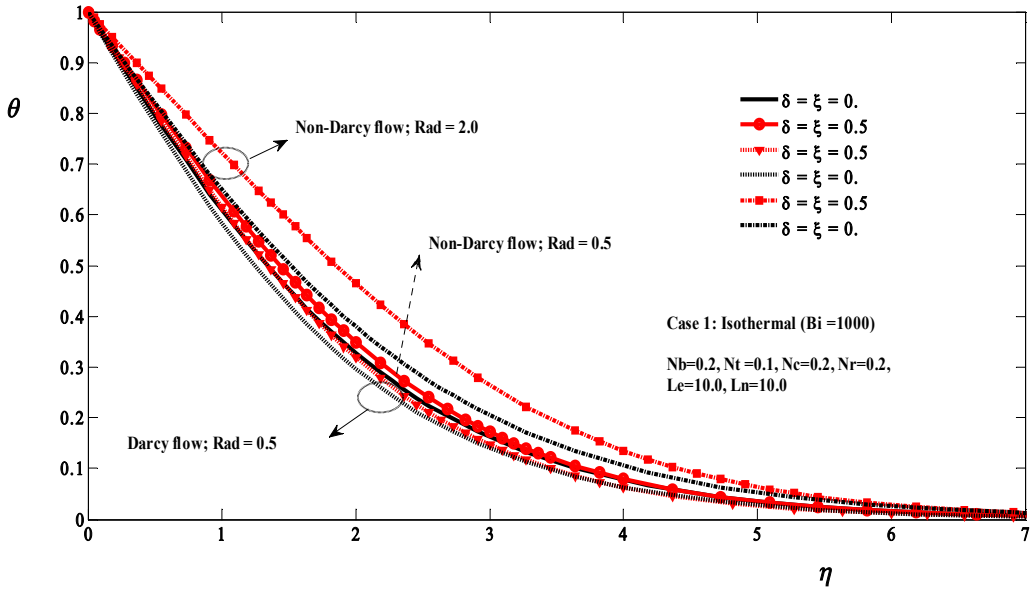


Figure VI.3 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de températures. Bi = 1000 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

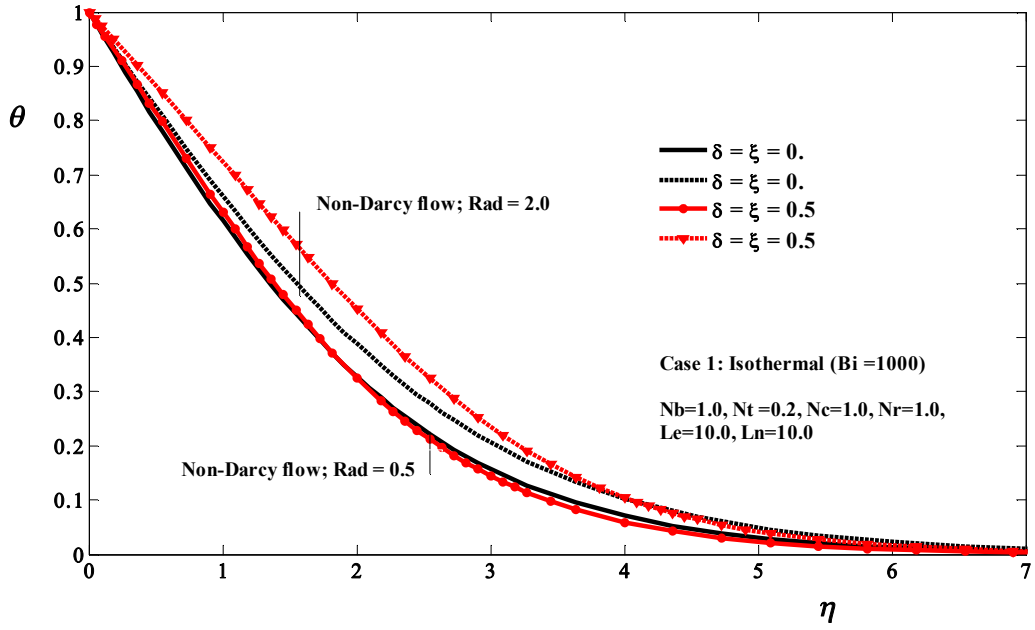


Figure VI.4 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de températures. Bi = 1000 et fortes valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

Figure VI.5 et **Figure VI.6** sont montrées pour saisir le comportement des profils de la concentration des espèces. Comme prévu, ces graphiques montrent plus de changement avec le double effet de dispersion. En raison de la dispersion, on observe que les valeurs du gradient de concentration sont tout à fait différentes. La seule différence entre les courbes dans les présentes figures est l'épaisseur réduite de la concentration de la couche limite quand le nano-fluide est à groupe élevé$[N_c, N_r, N_b, N_t]$.

Nous avons établi dans les **Figure VI.7** et **Figure VI.8**, les profils de la fraction de volume de nanoparticules. On peut remarquer le léger effet quand la valeur maximum est atteinte. Comme rapporté dans **[123],** la valeur de *s* sur la paroi est négative, pour remplir la condition limite passive.

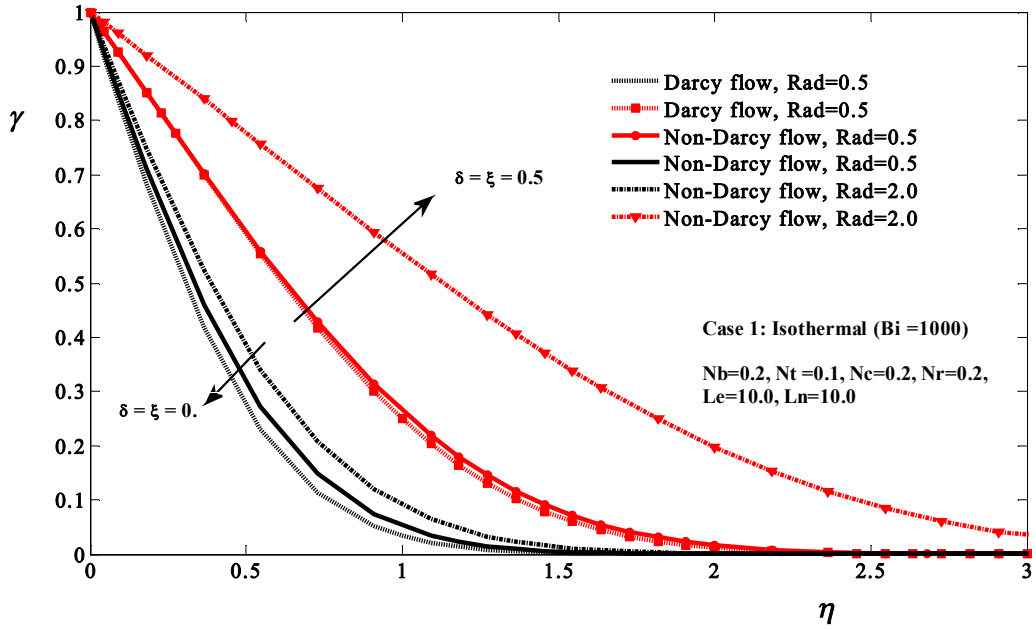


Figure VI.5 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de concentration des espèces. Bi = 1000 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

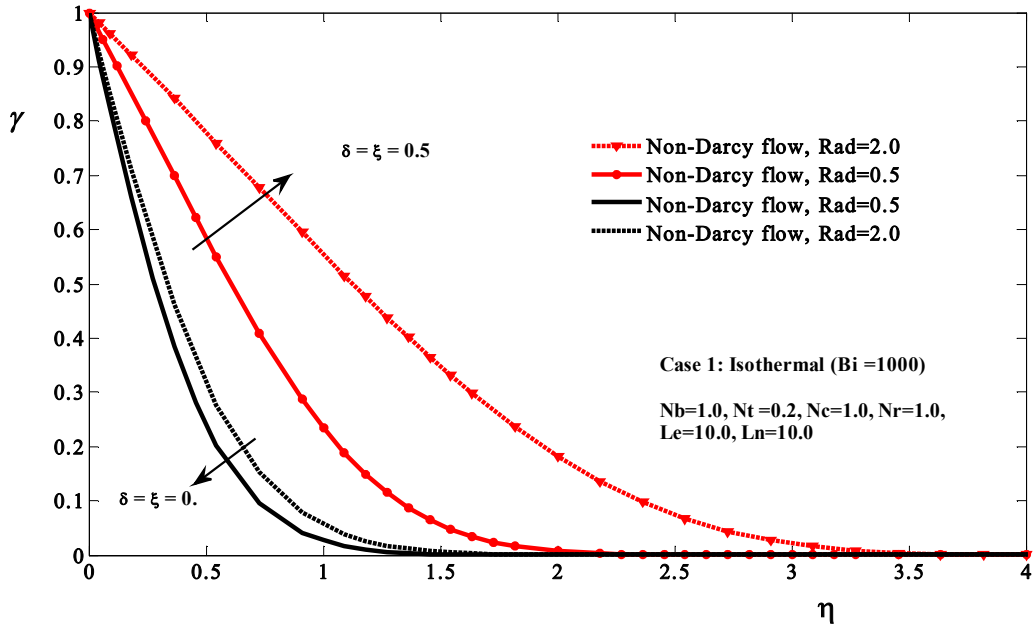


Figure VI.6 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de concentration des espèces. Bi = 1000 et fortes valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

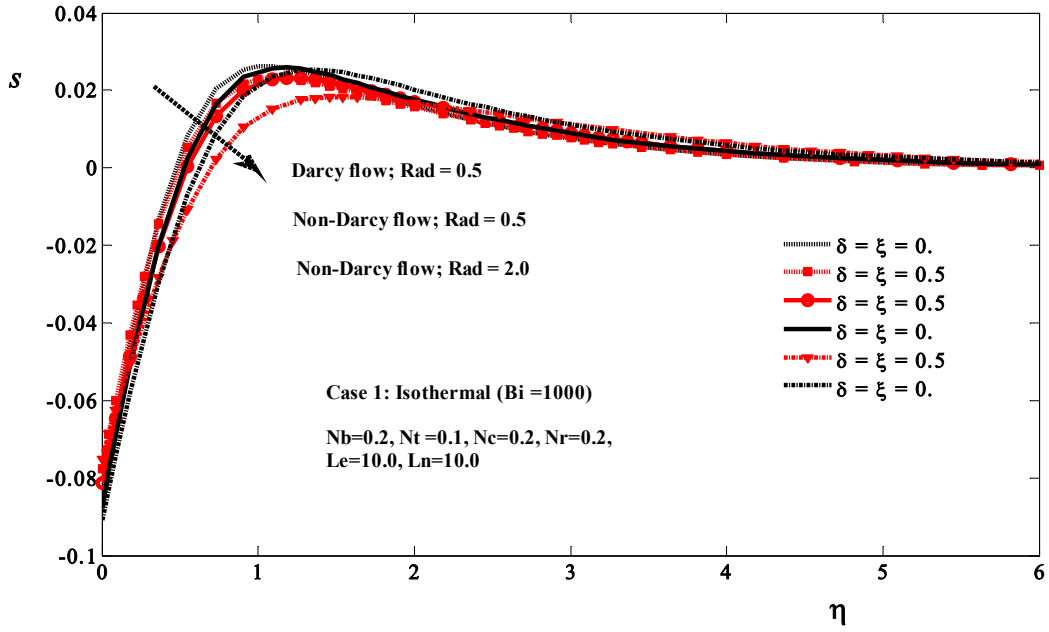


Figure VI.7 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de la fraction des nanoparticules. Bi = 1000 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

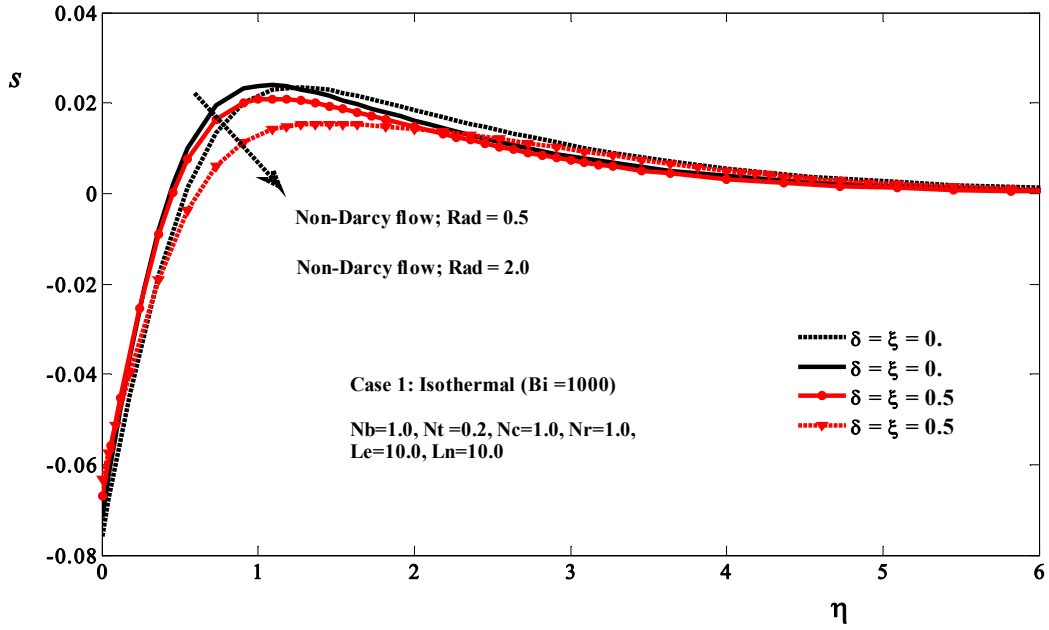


Figure VI.8 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de la fraction des nanoparticules. Bi = 1000 et fortes valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

.

VI.3. Cas 2: plaque non-isotherme

Figure VI.9 montre les profils de vitesse pour différentes valeurs *de Bi*. Un plus faible taux d'échange entre le fluide chaud et la plaque vers le nano-fluide cause une diminution de la vitesse. Dans toutes les courbes, on observe le faible effet de la double dispersion. Selon une juste compréhension de la physique, il est évident que l'énergie du nano-fluide est assurée totalement à partir de la paroi et un faible échange est synonyme d'une vitesse réduite.

De la **Figure VI.10**, la même explication peut être plaidée pour les profils de température. Ici encore, la double dispersion tend à augmenter la température dans la couche limite, due à l'effet intense de mouvement Brownien et de la thermophorèse. Le niveau de la température est en dépendance avec la valeur de *Bi*.

Le comportement du profil de la concentration des espèces est identique au profil de la température, **Figure VI.11,** Il semble que le double effet de la dispersion tend à

homogénéiser le corps dissous, pour n'importe quelle valeur du flux thermique incident à la plaque.

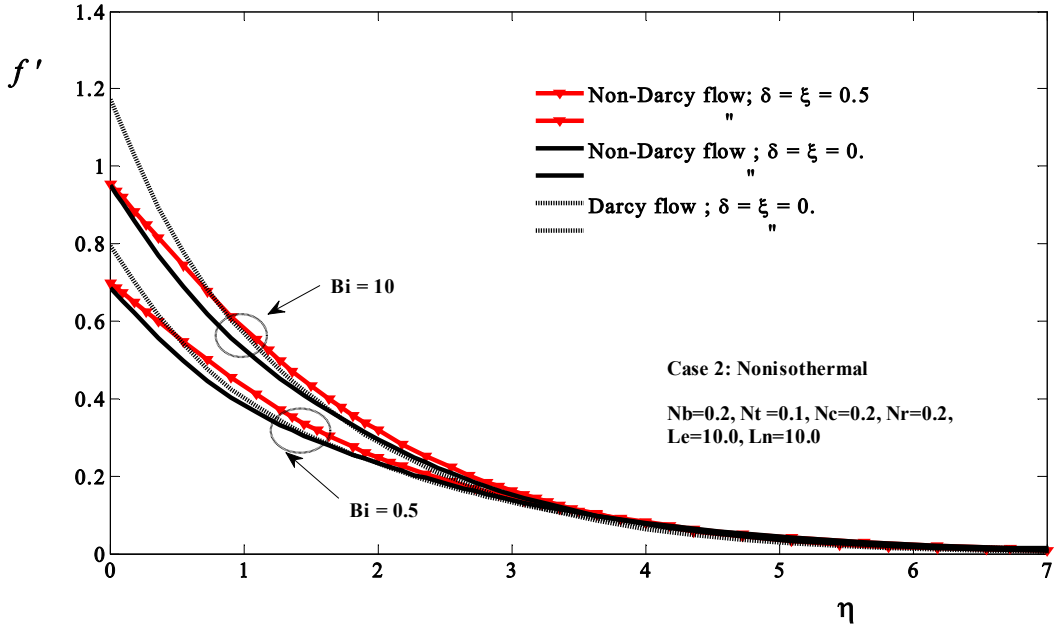


Figure VI.9 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de vitesses. Bi = 0.5 ; 10 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

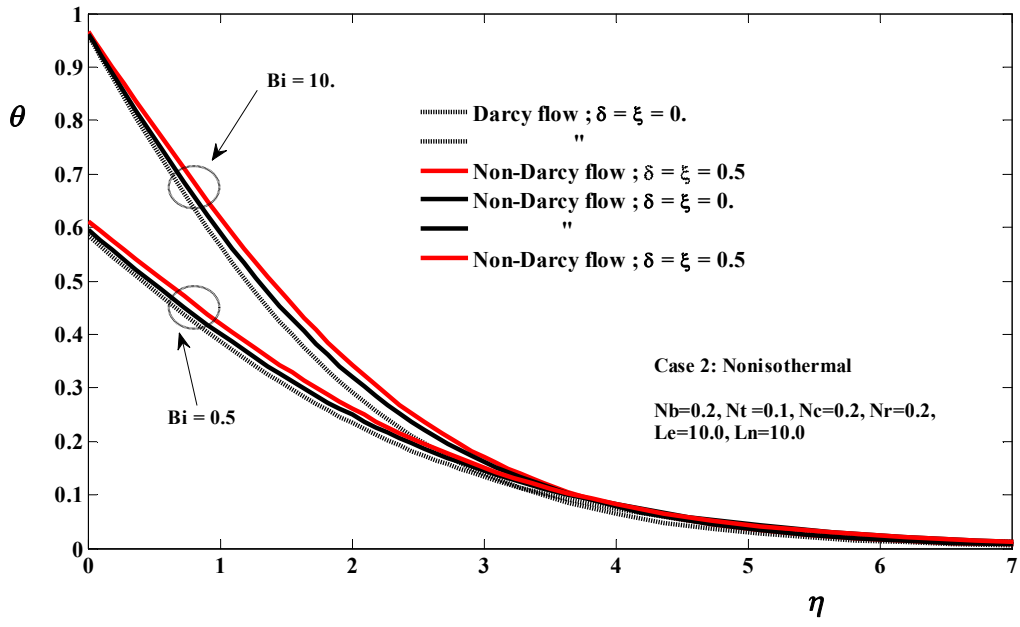


Figure VI.10 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils des températures. Bi = 0.5 ; 10 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

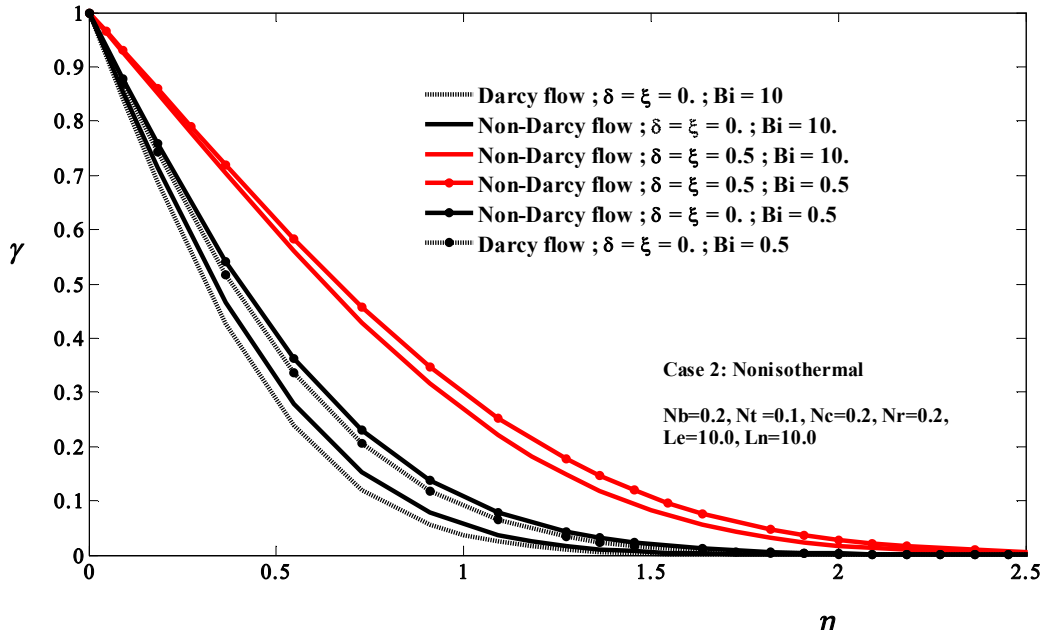


Figure VI.11 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de concentration des espèces. Bi = 0.5 ; 10 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

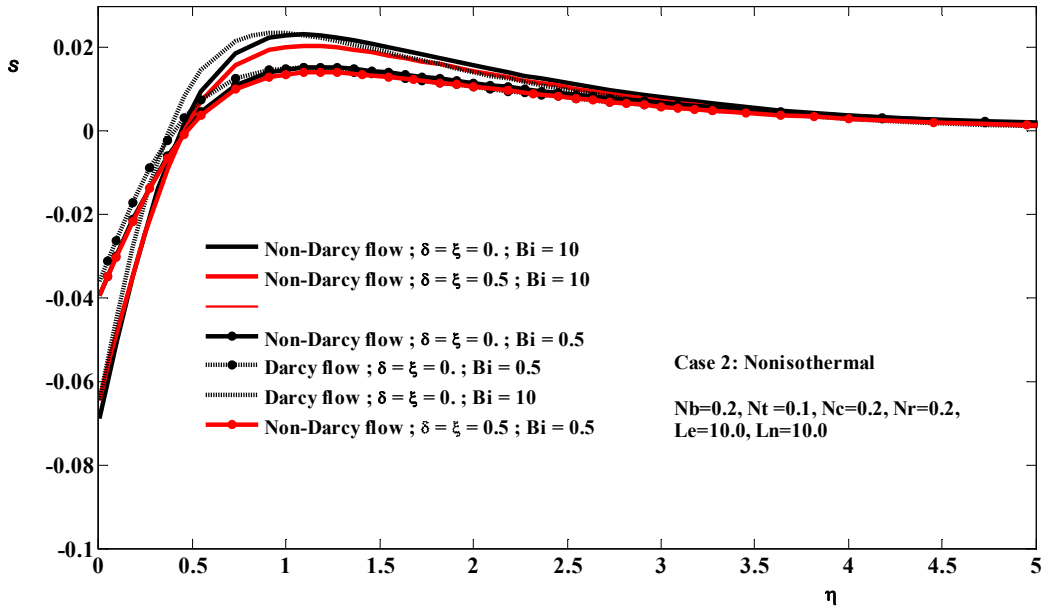


Figure VI.12 Effet de la double dispersion et de l'écoulement non-Darcéen sur les profils de la fraction des nanoparticules. Bi = 0.5 ; 10 et faibles valeurs [N_b; N_t; N_c; N_r] pour le nano-fluide.

Dans la **Figure VI.12** on observe encore le léger effet rapporté ci-dessus avec différentes valeurs *de Bi*. La fraction de volume des nanoparticules à la paroi est plus négative avec l'augmentation *de Bi*. La valeur moyenne maximum est autour de 0.02. Il est logique qu'un gradient plus fort de la fraction de volume soit nécessaire pour répondre au gradient plus grand de la température à la paroi.

VI.4. Variations des nombres locaux de Nusselt et de Sherwood

Les nombres locaux de Nusselt et de Sherwood pour différentes valeurs *de Bi*, Ra_d et F_0 sont présentés dans les **Tableaux VI.2** et **VI.3.** Afin de comparaison, les valeurs obtenues sont énumérées sous une forme qui met en évidence l'effet de dispersion.

Comme exposé ci-dessus, la vitesse à la paroi quand la dispersion est présente complémentaire avec le gradient de la température au niveau de la plaque jouent un rôle principal concernant le transfert de chaleur par convection.

Le gradient de la concentration des espèces à la paroi est équivalent au gradient de la température pour le transfert de masse de convection. On peut voir au **Tableau VI.2** que le nombre de Nusselt est augmenté quand une double dispersion se produit.

D'un point de vue quantitatif, ce perfectionnement est plus grand pour une convection naturelle forte que pour une convection faible.

Pour le milieu poreux avec effet d'inertie, le perfectionnement de *Nu* est moins important que dans le cas d'écoulement de Darcy. La plus grande valeur obtenue selon le **Tableaux VI.3** pour $Nu_x Ra_x^{-1/2}$ est trouvé dans le cas isotherme et avec un milieu poreux dispersif.

Comparativement entre les **Tableaux VI.2** et **VI.3**, on pourra noter que le groupe puissant du nano-fluide $[N_c, N_r, N_b, N_t]$ servira à augmenter le nombre de Nusselt. D'autre part, le transfert de masse par l'intermédiaire *de* $Sh_x Ra_x^{-1/2}$ est plus sensible au double effet de dispersion, mais dans un sens opposé.

Des **Tableaux VI.2** et **VI.3**, le transfert convectif de la masse diminue continuellement avec la diminution de *Bi* et l'augmentation de Ra_d , F_0 et avec la double dispersion. Cependant, le **tableau VI.3** prouve que le transfert de masse demeure plus grand pour le groupe puissant $[N_c, N_r, N_b, N_t]$ du nano-fluide.

Tableau VI.2 Valeurs de $Nu_xRa_x^{-1/2}$ et $Sh_xRa_x^{-1/2}$ pour les valeurs sélectionnées de Bi, Ra_d and Fo avec (N_b=0.2, N_t =0.1, N_c=0.2, N_r=0.2, L_e=10.0, L_n=10.0)

			$Nu_xRa_x^{-1/2}$		$Sh_xRa_x^{-1/2}$	
Bi	Ra_d	*Fo*	$\delta=\xi=0$	$\delta=\xi=0.5$	$\delta=\xi=0$	$\delta=\xi=0.5$
1000	0.5	0	0.449349	0.505409	1.807402	1.037322
		0.5	0.415790	0.458507	1.639095	0.996556
	2.0	0.5	0.366276	0.466187	1.412026	0.734345
10	0.5	0	0.422574	0.477807	1.773886	1.026995
		0.5	0.393567	0.435794	1.614950	0.988311
	2.0	0.5	0.349568	0.448903	1.396348	0.728904
0.5	0.5	0	0.208014	0.238420	1.440364	0.912315
		0.5	0.202536	0.227766	1.354286	0.890690
	2.0	0.5	0.192096	0.261444	1.212595	0.658596

Tableau VI.3. Valeurs de $Nu_xRa_x^{-1/2}$ et $Sh_xRa_x^{-1/2}$ pour les valeurs sélectionnées de Bi, Ra_d and Fo avec (N_b=1.0, N_t =0.2, N_c=1.0, N_r=1.0, L_e=10.0, L_n=10.0)

			$Nu_xRa_x^{-1/2}$		$Sh_xRa_x^{-1/2}$	
Bi	Ra_d	*Fo*	$\delta=\xi=0$	$\delta=\xi=0.5$	$\delta=\xi=0$	$\delta=\xi=0.5$
1000	0.5	0	0.451253	0.581987	2.234237	1.166484
		0.5	0.409325	0.498100	1.952215	1.089621
	2.0	0.5	0.355067	0.534220	1.636827	0.847836
10	0.5	0	0.427590	0.477807	2.205241	1.156426
		0.5	0.390453	0.477121	1.933264	1.088500
	2.0	0.5	0.341270	0.517677	1.625027	0.843166
0.5	0.5	0	0.219472	0.282625	1.913743	1.046890
		0.5	0.211038	0.264826	1.726015	0.999676
	2.0	0.5	0.197463	0.323072	1.485511	0.782244

VI.5 Effet de la condition passive

La condition à la paroi a été prise dans le sens active, autrement dit il y a un bilan raisonnable à effectuer. Il s'agissait de l'équivalence entre le phénomène due à la diffusion brownienne et la thermophorèse pour les nanoparticules. Cette condition révisée est dans un sens correcte mais, il est peut être utile de voir dans quelles mesures cette condition a un effet en rapport d'une condition dite passive, ou la fraction volumique des nanoparticules prend une valeur finie ($s=1$) à la paroi.

Pour un nano-fluide à $[N_c, N_r, N_b, N_t]$ faible, et **dans les Figure VI.13** et **Figure VI.14,** il est constaté que les profils des vitesses sont affectés par cet effet uniquement dans une sous-couche très proche de la paroi, dans l'ordre du dixième de la couche limite mécanique, et ceci quel que soit le type d'écoulement dans le milieu poreux et dans le cas d'une paroi isotherme ou convective. Cet effet est encore très peu important pour les distributions des températures, mais de manière uniforme.

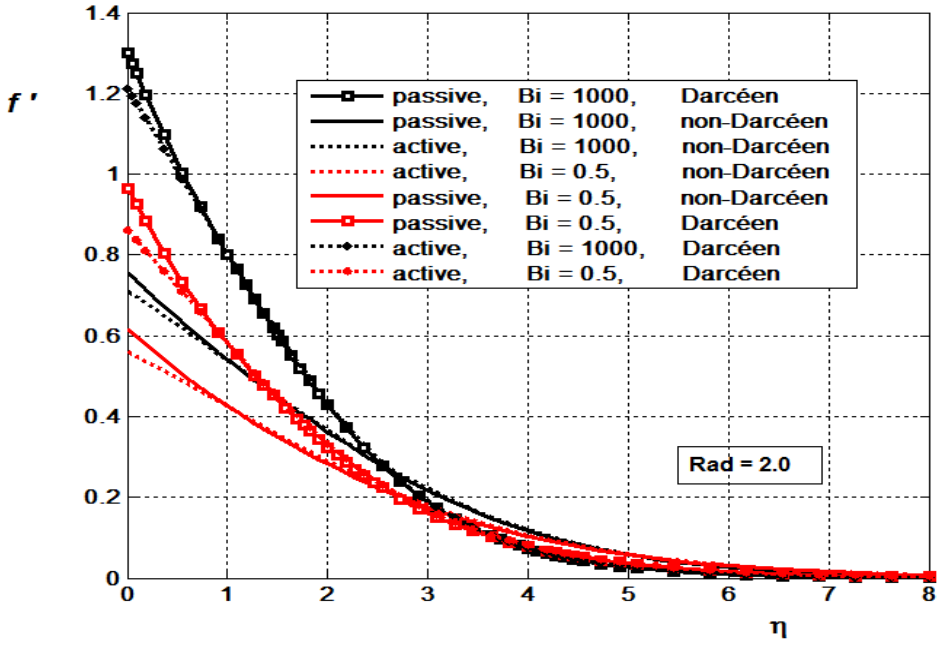


Figure VI.13 Effet de la condition passive/active sur les profils de vitesse.

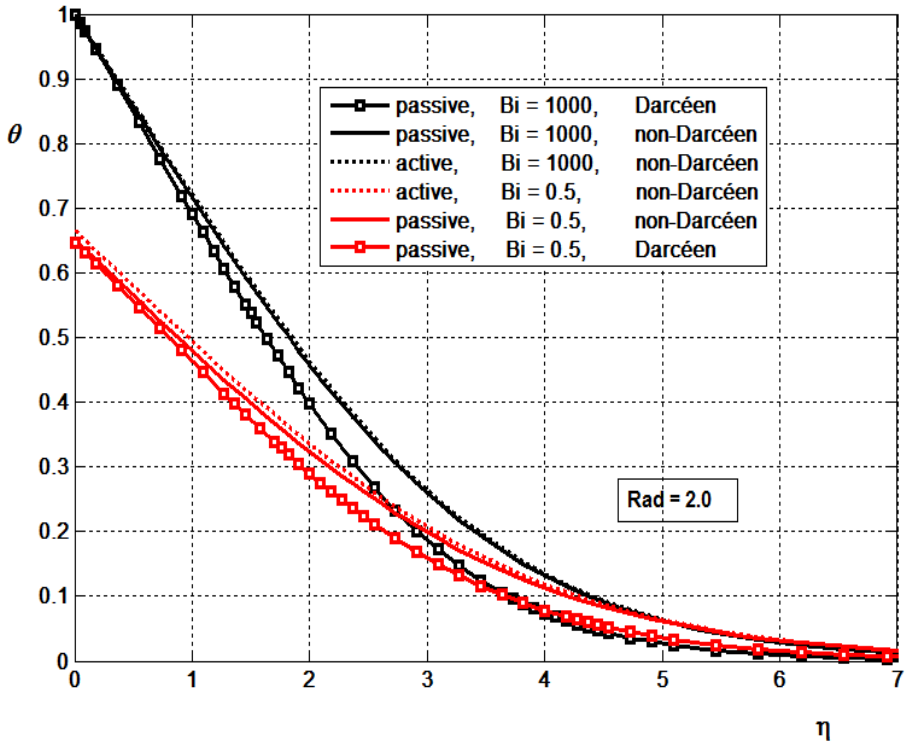


Figure VI.14 Effet de la condition passive/active sur les profils de température.

Dans les Figure VI.15 et **Figure VI.16**, et malgré les différences entre les deux conditions au niveau du profil de la fraction volumique des nanoparticules, l'effet n'est pas transmissible au profil de la concentration des espèces. Ceci est du au découplage total entre ces variables.

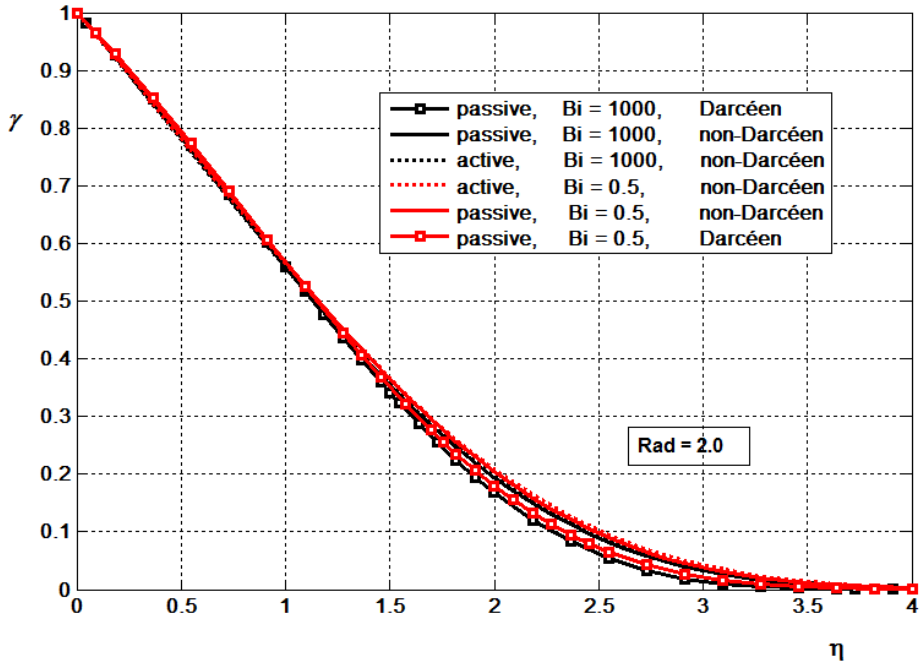


Figure VI.15 Effet de la condition passive/active sur les profils de concentration des espèces.

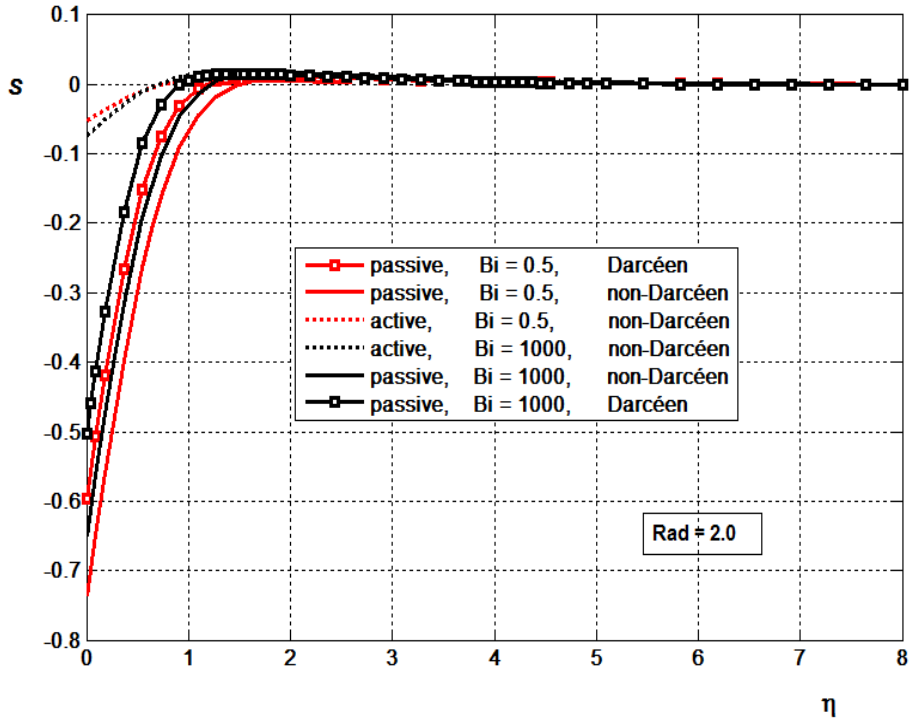


Figure VI.16 Effet de la condition passive/active sur les profils de la fraction volumique des nanoparticules.

VI.6 Effet des nombres de Lewis

Pour un nano-fluide à $[N_c, N_r, N_b, N_t]$ puissant, et **dans les Figure VI.17** à **Figure VI.20,** il est reporté l'effet des nombres de Lewis sur les différents profils, pour le cas iso-therme.

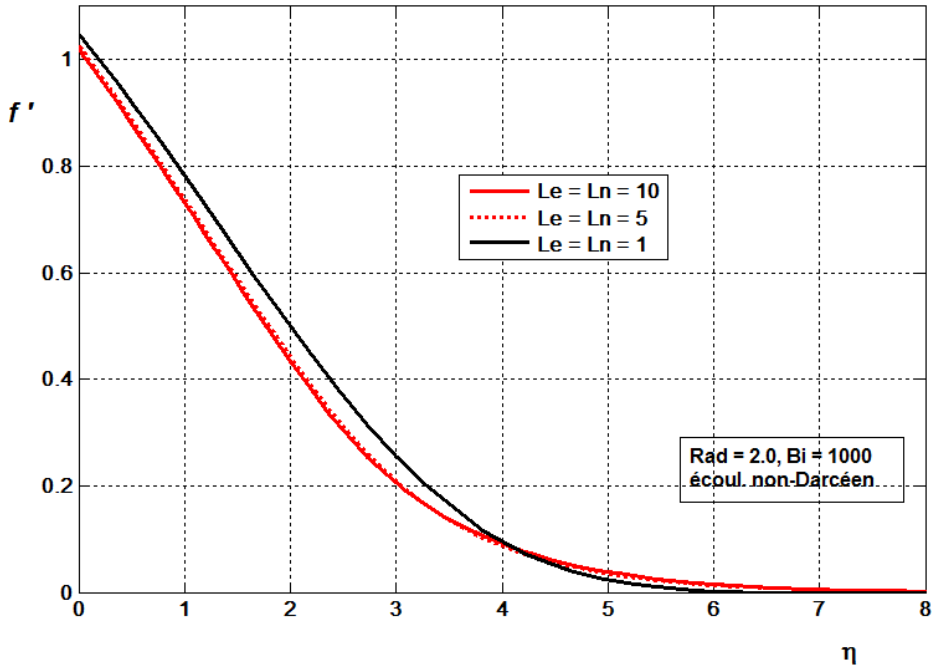


Figure VI.17 Effet des nombres de Lewis sur les profils de vitesse.

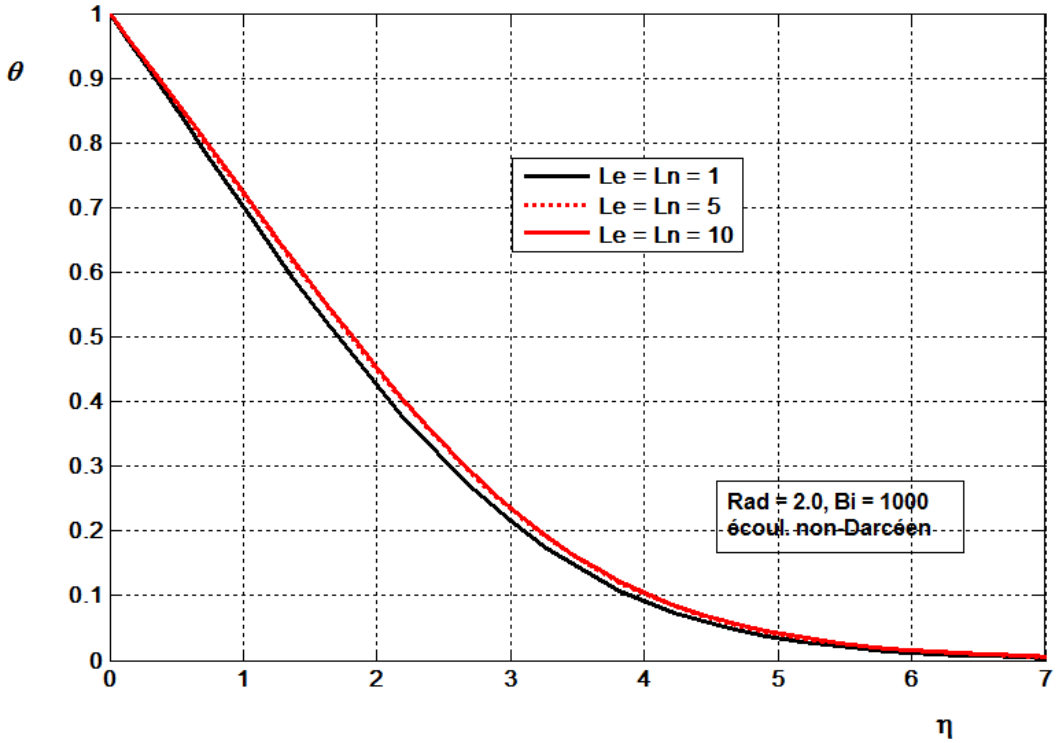


Figure VI.18 Effet des nombres de Lewis sur les profils des températures.

Si les variations de ces nombres n'ont pas d'effet sur la vitesse, avec les profils des températures et surtout de la concentration l'influence est substantielle. Avec une diffusion des espèces plus grande, Le = 10 et 5, il est évident qu'une amélioration de la diffusion en soit le résultat.

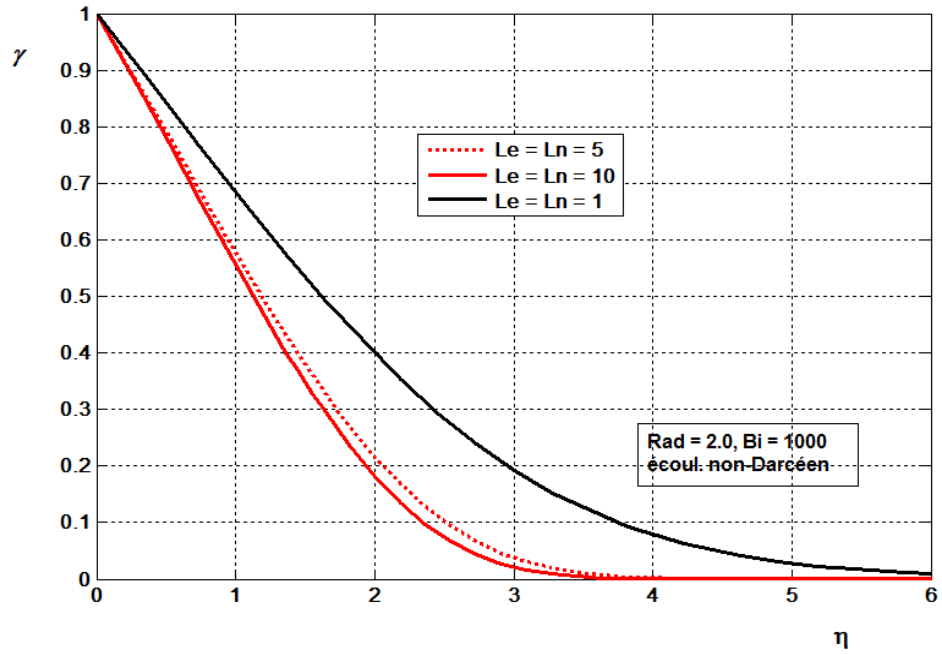


Figure VI.19 Effet des nombres de Lewis sur les profils de concentration des espèces.

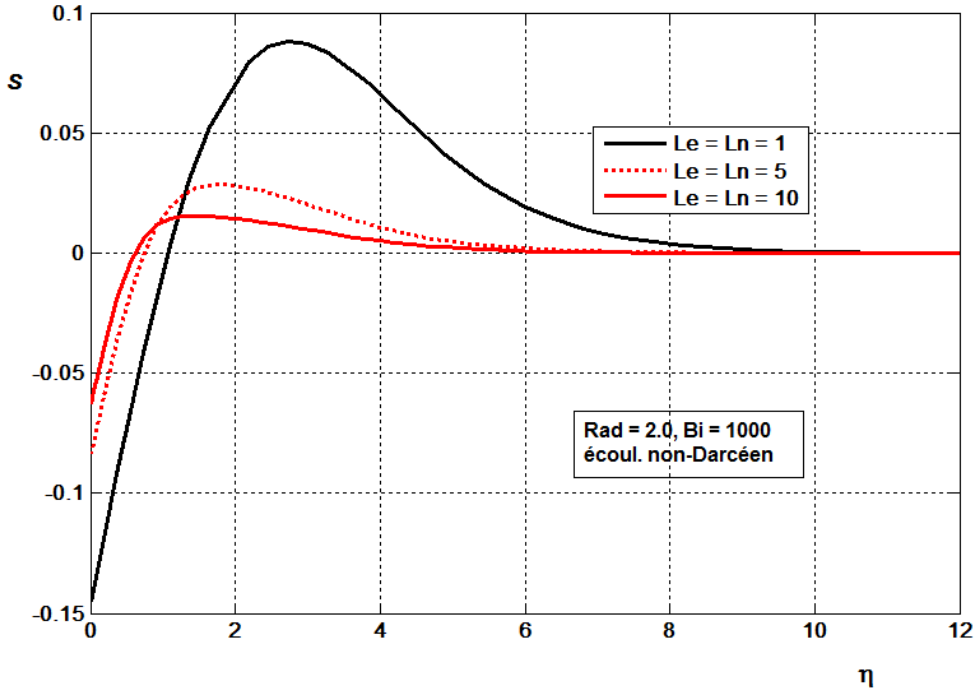


Figure VI.20 Effet des nombres de Lewis sur les profils de la fraction volumique des nanoparticules.

Pour le profil des nanoparticules, et pour un écoulement non-Darcéen, on a une zone près de la paroi et une zone plus lointaine dans la couche limite où l'ordre du profil s'inverse. On constate aussi qu'à mesure que la diffusion massique diminue, un profil des nanoparticules plus étalé est observé.

VI.7. Conclusion

La double couche limite convective et diffusive développée entre une plaque verticale, immergé dans un milieu poreux saturé Darcéen ou non-Darcéen par un nano-fluide, est examinée avec la prise en compte fondamentale de la dispersion hydrodynamique.

Deux cas sont d'abord traités, il s'agit de la condition isotherme de la paroi et selon un deuxième cas plus général avec une condition convective. Ce travail est effectué pour un nano-fluide à faible caractéristique et à fort caractéristique. Dans cette partie, on a considéré un modèle révisé pour une condition active des nanoparticules à la paroi.

Dans une seconde partie, il a été examiné l'effet justement de cette condition active/passive sur les profils et uniquement avec une double dispersion.

Enfin, les profils sont dépendants des types de fluides en présence pour la concentration des espèces et des nanoparticules, lors du transfert de matière principalement, ou autrement dit des nombres de Lewis. Les résultats reportés concernent cet aspect.

Les transformations affines ou de similarités sont impliquées et le système régissant des équations aux dérivées partielles fortement non-linéaires est converti en un ensemble d'équations différentielles ordinaires non-linéaires.

Des résultats numériques sont présentés et nous pouvons conclure à la suite de nos investigations :

- La double dispersion a un effet important sur les transferts convectifs de chaleur et de masse. Cet effet est plus prononcé pour un nano-fluide que pour un fluide dit clair. Cela vaut également pour le flux de transfert de masse que pour le flux de transfert thermique, dans le cas $L_e = L_n = 10$.

- Travailler avec un nano-fluide à l'intérieur d'un milieu poreux non-Darcéen mène à modifier les profils de vitesse, de la température et de la concentration des espèces, qui affectent à leur tour les taux de chaleur et de masse, quand la double dispersion y est présente, comme c'est le cas des milieux poreux réels.

- Le taux de transfert thermique augmente et le transfert de masse diminue fortement avec la double dispersion.

- A l'exception d'une sous couche du profil des vitesses, la prise en compte d'une condition passive ou active n'a que peu d'effet sur les différentes couches limites.

- Dans les conditions d'expérimentation numériques, un nano-fluide plus ou moins diffusif en termes massiques n'affecte pas les profils.

[1] Zoubida Haddad, Hakan F.Oztop, Eiyad Abu-Nada, Amina Mataoui, A review on natural convective heat transfer of nanofluids Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 5363–5378

[2] XuanY, Roetzel W. Conceptions for heat transfer correlations of nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer 2000; 43:3701–7.

[3] BiancoV, MancaO, NardiniS. Numerical investigation on nanofluids turbulent convection heat transfer inside a circular tube. International Journal of Thermal Sciences 2009;29:3632–42.

[4] Mirmasoumi S, Behzadmehr A, Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model. Applied Thermal Engineering 2008;28:717–27.

[5] Akbarinia A, Laur R. Investigation the diameter of solid particles affects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach. International Journal of Heat and Fluid Flow 2009; 30:706–14.

[6] S. Kakaç, A. Pramuanjaroenkij, Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, Int. J. Heat Mass Transfer 52 (2009) 3187e3196.

[7] L.S. Sundar, M.K. Singh, Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 20 (2013) 23e35.

[8] Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, S. Xi, A review on development of nanofluid preparation and characterization, Powder Technol. 196 (2009) 89-101.

[9] A. Ghadimi, R. Saidur, H.S.C. Metselaar, A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions, Int. J. Heat Mass Transfer 54 (2011) 4051-4068.

[10] L.S. Sundar, K.V. Sharma, M.T. Naik, M.K. Singh, Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 25 (2013) 670-686.

[11] L. Godson, B. Raja, D.M. Lal, S. Wongwises, Enhancement of heat transfer using nanofluids an overview, Renew. Sustain. Energy Rev. 14 (2010) 629-641.

[12] J.M. Wu, Jiyun Zhao, A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement research gap to engineering application, Prog. Nucl. Energy 66 (2013) 13-24.

[13] A.M. Hussein, K.V. Sharma, R.A. Bakar, K. Kadirgama, A review of forced convection heat transfer enhancement and hydrodynamic characteristics of a nanofluid, Renew. Sustain. Energy Rev. 29 (2014) 734-743.

[14] W. Yu, D.M. France, E.V. Timofeeva, D. Singh, J.L. Routbort, Comparative review of turbulent heat transfer of nanofluids, Int. J. Heat Mass Transfer 55 (2012) 5380-5396.

[15] S.M.S. Murshed, C.A. Nieto de Castro, M.J.V. Lourenc, M.L.M. Lopes, F.J.V. Santos, A review of boiling and convective heat transfer with nano-fluids, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 2342-2354.

[16] J. Sarkar, A critical review on convective heat transfer correlations of nano- fluids, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 3271-3277.

[17] M. Molana, S. Banooni, Investigation of heat transfer processes involved liquid impingement jets: a review, Braz. J. Chem. Eng. 30 (3) (2013) 413-435.

[18] H.A. Mohammed, G. Bhaskaran, N.H. Shuaib, R. Saidur, Heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels heat exchanger using nanofluids: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 1502-1512.

[19] H.A. Mohammed, A.A. Al-aswadi, N.H. Shuaib, R. Saidur, Convective heat transfer and fluid flow study over a step using nanofluids: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 2921-2939.

[20] O. Mahian, A. Kianifar, S.A. Kalogirou, I. Pop, S. Wongwises, A review of the applications of nanofluids in solar energy, Int. J. Heat Mass Transfer 57 (2013) 582-594.

[21] M.N.E. Ashrafmansouri, Mass transfer in nanofluids: a review, Int. J. Therm. Sci. 82 (2014) 84-99.

[22] X.Q. Wang, A.S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, Int. J. Therm. Sci. 46 (2006) 1-19.

[23] M. Rebay, S. Kakaç, R. Cotta (Eds.), Microscale and Nanoscale Heat Transfer: Concepts, Analysis, and Applications, Taylor & Francis Group, 2015.
[24] Sadık Kakaç, Anchasa Pramuanjaroenkij, Single-phase and two-phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids : A state-of-the-art review International Journal of Thermal Sciences 100 (2016) 75-97
[25] Buongiorno, J., Convective Transport in Nanofluids, Journal of Heat Transfer, 128, pp.240-250 (2006).
[26] Ozerinç S., Yazıcıoglu A.G., Kakaç S., Numerical analysis of laminar forced convection with temperature-dependent thermal conductivity of nanofluids and thermal dispersion, Int. J. Therm. Sci. 62 (2012) 138-148.
[27] Bianco V., Chiacchio F., Manca O., Nardini S., Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes, Appl. Therm. Eng. 29 (2009) 3632-3642.
[28] Tongkratoke A., Pramuanjaroenkij A., Chaengbamrung A., Kakaç S., Numerical study of nanofluid heat transfer enhancement with mixing thermal conductivity models, Comput. Therm. Sci. 6 (1) (2014) 1-12.
[29] Tongkratoke A., Pramuanjaroenkij A., Chaengbamrung A., Kakaç S., Numerical study of turbulence nanofluid flow to distinguish models for in-house programming, AIP Conf. Proc. 1569 (2013) 384
[30] Behzadmehr A., Saffar-Avval M., Galanis N., Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach, Int. J. Heat Fluid Flow 28 (2007) 211-219.
[31] Fard M.H., Esfahany M.N., Talaie M.R., Numerical study of convective heat transfer of nanofluids in a circular tube two-phase model versus single phase model, Int. Commun. Heat Mass Transfer 37 (2010) 91-97.
[32] Kalteh M., Abbassi A., Saffar-Avval M., Harting J., Eulerian-Eulerian two phase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel, Int. J. Heat Fluid Flow 32 (2011) 107-116.
[33] Akbari M., Galanis N., Behzamehr A., Comparative analysis of single and two phase models for CFD studies of nanofluid heat transfer, Int. J. Therm. Sci. 50 (2011) 1343-1354.
[34] Magyari, E. Comment on the homogeneous nanofluid models applied to convective heat transfer problems. Acta Mechanica 222,(2011). 381–385.
[35] Tiwari, R. and M. Das Heat transfer augmentation in a two-sided liddriven differentially heated square cavity utilizing nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer 50, (2007). 2002–2018.
[36] Vafai, K. and E. Tien Boundary and inertia effects on convective mass transfer in porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer 25, (1982). 1183–1190.
[37] Hsu, C. and P. Cheng Thermal dispersion in a porous medium. International Journal of Heat and Mass Transfer 33, (1990). 1587–1597.
[38] Choi, S.K., Kim, S.O., Lee, T.H., and Dohee-Hahn, Computation of the natural convection of nanofluid in a square cavity with homogeneous and nonhomogeneous models. Numer. Heat Tr. A 65, 287–301, 2014.
[39] Nield, D.A., and Kuznetsov, A.V., The onset of convection in a layer of a porous medium saturated by a nanofluid: Effects of conductivity and viscosity variation and cross-diffusion. Transport Porous Med. 92, 837–846, 2012.
[40] Nield, D.A., and Kuznetsov, A.V., The Cheng-Minkowycz problem for natural convective boundary layer flow in a porous medium saturated by a nano- fluid. Int. J. Heat Mass Transf. 52, 5792–5795, 2009.
[41] Kuznetsov, A.V., and Nield, D.A., Natural convective boundary-layer flow of a nanofluid past a vertical plate. Int. J. Therm. Sci. 49, 243–247, 2010.
[42] Kuznetsov, A.V., and Nield, D.A., Natural convective boundary-layer flow of a nanofluid past a vertical plate. Int. J. Therm. Sci. 50, 712–717, 2011.

[43] Kuznetsov, A.V., and Nield, D.A., The Cheng-Minkowycz problem for natural convective boundary layer flow in a porous medium saturated by a nano- fluid: A revised model. Int. J. Heat Mass Transf. 65, 682–685, 2013.
[44] Nield, D.A., and Kuznetsov, A.V., The Cheng-Minkowycz problem for the doublediffusive natural convection boundary layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid. Int. J. Heat Mass Transf. 54, 374–378, 2011.
[45] Nield, D.A., and Bejan, A., Convection in Porous Media, 4th edn., Springer, New York, 2013.
[46] Gorla, R., A. Chamkha, and A. Rashad Mixed convective boundary layer flow over a vertical wedge embedded in a porous medium saturated with a nanofluid: Natural convection dominated regime. Nanoscale Research Letters 6, 207–215. (2011).
[47] Rana, P., R. Bhargava, and O. Bég Numerical solution for mixed convection boundary layer flow of a nanofluid along an inclined plate embedded in a porous medium. International Journal of Heat and Mass Transfer 64, 2816–2832, (2012).
[48] Ahmad, S. and I. Pop Mixed convection boundary layer flow from a vertical flat plate embedded in a porous medium filled with nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer 37, 987–991, (2010).

[49] Nazar, R., L. Tham, I. Pop, and D. Ingham, Mixed convection boundary layer flow from a horizontal circular cylinder embedded in a porous medium filled with a nanofluid. Transport in Porous Media 86, 517–536, (2011).
[50] Ali J. Chamkha, Mir Mujtaba A. Quadri Simultaneous heat and mass transfer by natural convection froma plate embedded in a porous medium with thermal dispersion effects, Heat and Mass Transfer 39 (2003) 561–569
[51] Mebrouk Ait Saada , Salah Chikh , Antonio Campo Analysis of hydrodynamic and thermal dispersion in porous media by means of a local approach Heat Mass Transfer (2006) 42: 995–1006
[52] Darcy H Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Dalmont, Paris, France (1856)
[53] Beaver GS, Sparrow EM, Rodenz DE Influence of bed size on the flow characteristics and porosity of randomly packed beds of spheres. J Appl Mech 40:655–660 (1973)
[54] Dybbs A, Edwards RV. A new look at porous media fluid mechanics-Darcy to turbulent. In: Bear, Corapcioglu (eds) Fundamentals of transport phenomena in porous media. Martinis Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp 199–254 (1984)
[55] Ergun S Fluid flow through a packed column. Chem Eng Prog 48:89–94 (1952)
[56] McDonald IF, El-Sayed MS, Mow K, Dullien FAL Flow through porous media-Ergun equation revisited. Ind Eng Chem Fund 18:199–208 (1979)
[57] Chikh S, Boumedien A, Bouhadef K, Lauriat G. Non-Darcian forced convection analysis in an annulus partially filled with a porous material. Num Heat Transf Part A 28:707–722 (1995)
[58] Coulaud O, Morel P, Caltagirone JP. Numerical modeling of non linear effects in laminar flow through a porous medium. J Fluid Mech 190:393–407 (1988)
[59] Sahraoui M, Kaviany M. Slip and no-slip boundary condition at the interface of porous plain media. Int J Heat Mass Transf 35:927–943 (1992)
[60] Ait saada M, Chikh S. Analyse des effets non linéaires dans un milieu poreux, Proc. 14eme Congrès Français de Mécanique, Toulouse, France, (1999)
[61] Telles R. S. and Trevisan O. V.. Dispersion in heat and mass transfer natural convection along vertical boundaries in porous media hr. J. /few Mar, Transfcr. Vol. 36. No. 5. pp. I357-1365. 1993
[62] Yang C., Nakayama A. Synthesis of tortuosity and dispersion in effective thermal conductivity of porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer 53 (2010) 3222–3230
[63] Pranitha J., Venkata Suman G., Srinivasacharya D. Effects of Double Dispersion on Mixed Convection in a Power-law Fluid Saturated Porous Medium with Variable Properties using Lie Scaling GroupTransformations Procedia Engineering 127 (2015) 362 – 369

[64] Murthy S. N. Effect of Double Dispersion Mixed Convection Heat and Transfer in Non-Darcy Porous Medium, J. Heat Transfer 122(3), 476-484 (Jan 18, 2000)

[65] Plautz D. A. and Johnstone H. F., Heat and mass transfer in packed beds, A.I.Ch.E. JI 1, 193 (1955).

[66] Whitaker S., Local thermal equilibrium: an application to packed bed catalytic reactor design, Chem. Engng Sci. 41, 2029-2039 (1986).

[67] Yagi S., Kunii D. and Endo K., Heat transfer in packed beds through which water is flowing, Int. J. Heat Mass Transfer I, 333-339 (1964).

[68] Fried J. J. and Combarnous M. A.; Dispersion in porous media, Adv. Hydrosci. 11, 1699282 (1976).

[69] Cheng P., Ali C.L., and Verma A.K., Letters in Heat Mass Transfer, 8, 261 (1981).

[70] Plumb O.A. and Huenefeld J.S., Int. J. Heat Mass Transfer, 24, 765 (1981).

[71] Cheng Ping, Thermal dispersion effects in non-Darcian convective flows in a saturated porous medium Letters in heat and mass transfer, Vol. 8, pp. 267-270, 1981

[72] Tien J.T. Analysis of thermal dispersion effect on vertical plate natural convection in porous media, International Journal of Heat and Mass Transfer; 30, pp. 143-150 (1987).

[73] Plumb A., The effect of thermal dispersion on heat transfer in packed bed boundary layers, Proceedings of 1st ASME JSME Thermal Engineering Joint Conference, Vol. 2, pp. 17-21 (1983).

[74] Lai, C., Kulacki F. A., Thermal dispersion effects on non-Darcy convection over horizontal surfaces in saturated porous media. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 32, No. 5, pp. 971-976, 1989

[75] Vafai, K., and Tien, C. L., Boundary and Inertia Effects on Flow and Heat Transfer in Porous Media, Int. J. Heat Mass Transf., 24, 1981, pp. 195–203.

[76] Vafai, K., and Tien, C. L., Boundary and Inertia Effects on Convective Mass Transfer in Porous Media, Int. J. Heat Mass Transf., 25, 1982, pp. 1183–1190.

[77] Whitaker, S., The Forchheimer Equation: A Theoretical Development, Transp. Porous Media, 25, 1997, pp. 27–61.

[78] Bear, J., Dynamics of Fluids in Porous Media, Elsevier, New York, 1972.

[79] Kvernvold, O., and Tyvand, P., Dispersion Effect on Thermal Convectionin Porous Media, J. Fluid Mech., 99, 1980, pp. 673–686.

[80] Cheng, P., and Vortmeyer, D., Transverse Thermal Dispersion and Wall Channeling in a Packed Bed With Forced Convection Flow, Chem. Eng. Sci., 43, 1988, pp. 2523–2532.

[81] Nield, D. A., and Bejan, A., Convection in Porous Media, Springer- Verlag, New York, 1992.

[82] Dagan, G., Some Aspects of Heat and Mass Transport in Porous Media, Developments in Soil Science: Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media, International Association for Hydraulic Research, Elsevier, London, 1972, pp. 55–63.

[83] Karimi-Fard, M., Charrier-Mojtabi, M. C., and Vafai, K., Non-Darcian Effects on Double-Diffusive Convection Within a Porous Medium, Numer. Heat Transfer, Part A, 31, pp. 1997, 837–852.

[84] Murthy, P. V. S. N., and Singh, P., Heat and Mass Transfer by Natural Convection in a Non-Darcy Porous Medium, Acta Mech., September 1999, Volume 138, Issue 3, pp 243-254

[85] Hsu C.T., Cheng P., Thermal dispersion in a porous medium, Int. J. Heat Mass Transfer 33 (1990) 1587–1597.

[86] Kaviany M., Principles of Heat Transfer in Porous Media, second ed., Springer, New York, 1995.

[87] Ochoa-Tapia J.A., Whitaker S., Heat transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid, Int. J. Heat Mass Transfer 40 (11) (1997) 2691–2707.

[88] Moyne C., Two-equation model for a diffusive process in porous media using the volume averaging method with an unsteady-state closure, Adv. Water Resour. 20 (2–3) (1997) 63–76.

[89] Kuznetsov A.V., Chena L., Xionq M., Effects of thermal dispersion and turbulence in forced convection in a composite parallel- plate channel: Investigation of constant wall heat flux and constant wall temperature cases, Numer. Heat Transfer; Part A: Appl. 42 (4) (2002) 365–383.

[90] Jiana P.-X., Ren Z.-P., Wans B.-X, Numerical simulation of forced convection heat transfer in porous plate channels using thermal equilibrium and non-thermal equilibrium models, Numer. Heat Transfer; Part A: Appl. 35 (1) (1999) 99–113.

[91]. Jiang P.-X, Wanq B.-X., Luo D.-A., Ren Z.-P., Fluid flow and convective heat transfer in a vertical porous annulus, Numer. Heat Transfer; Part A: Appl. 30 (3) (1996) 305–320.

[92] Chen C.-H., Technical note: Non-Darcy mixed convection from a horizontal surface with variable surface heat flux in a porous medium, Numer. Heat Transfer; Part A: Appl. 30 (8) (1996) 859–869.

[93] Quintard M., Kaviany M., Whitaker S., Two-medium treatment of heat transfer in porous media: numerical results for effective proprieties, Adv. Water Resour. 20 (2–3) (1997) 77–94.

[94] Kuwahara F., Nakayama A., Numerical modeling of non-Darcy convective flow in porous medium, in: Proceedings of 11th IHTC, vol. 4, Kyongju, Korea, 1998, pp. 411–416.

[95] Nakayama A., Kuwahara F., A macroscopic turbulence model for flow in a porous medium, ASME J. Fluids Eng. 121 (1999) 427–433.

[96] Rocamora F.D., Heat Transport Modeling for Laminar and Turbulent Flows in Porous Media, Ph.D. Thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brazil, 2001.

[97] Pedras Marcos H.J., De Lemos Marcelo J.S., Thermal dispersion in porous media as a function of the solid–fluid conductivity ratio, International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008) 5359– 5367

[98] Pedras M.H.J., Rocamora F.D. Jr., de Lemos M.J.S., Turbulent dispersion in a porous media modeled as an infinite array of longitudinally-displaced elliptic rods, in: Proceedings of the COBEM 2003 17th International Congress of Mechanical Engineering, November 10–14, São Paulo, Brazil, 2003.

[99] Das, S. K., Choi, S. U. S., Patel, H. E., Heat transfer in nanofluids-A review, Heat Transfer Engineering, 27, pp. 3-19 (2006).

[100] Chen, H., Ding, S.Y., Heat transfer and rheological behavior of nanofluids -A review, Advances in Transport Phenomena, ADV TRANS1, pp. 135-177 (2009).

[101] Wen D., Lin G., Vafaei S., Zhang K., Review of nanofluids for heat transfer applications, Particuology, 7, pp. 141-150 (2009).

[102] Saidur R., Leong K.Y., Mohammad H.A., A review on applications and challenges of nanofluids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, pp. 1646-1668 (2011).

[103] Kleinstreur C., Feng Y., Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review, Nanoscale Research Letters, 6, pp. 229-241 (2011).

[104] Chandrasekar M., Suresh S., Senthilkumar T., Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids – A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, pp. 3917-3938 (2012).

[105] Huminic G., Huminic A., Application of nanofluids in heat exchangers: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, pp. 5625-5638 (2012).

[106] Pang C., Won Lee J., Kang Y.T, Review on combined heat and mass transfer characteristics in nanofluids, International Journal of Thermal Sciences, 87, pp. 49-67 (2015).

[107] Mahdi R.A., Mohammed H.A., Munisamy K.M., Saeid N.H, Review of convection heat transfer and fluid flow in porous media with nanofluid , Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, pp. 715-734 (2015).

[108] Keblinski P., A., Phillipot S.R., Choi S. U. S., Eastman, J.A., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluid) , International Journal of Heat and Mass Transfer, 45, pp.855-863 (2002).
[109] Vafai K., Handbook of porous media, 2nd Edition, Taylor & Francis, CRC Press, Boca Raton, U.S.A, pp. 81-140 (2005).

[110] Kumar S., Prasad S.K., Banerjee J., Analysis of flow and thermal field in nanofluid using a single phase thermal dispersion model", Applied Mathematical Modelling, 34, pp. 573-592 (2010).
[111] Michaelides E.E., Nanofluidics, Thermodynamics and Transport Properties, Springer International Publishing AG, SpringerLink, pp. 54-76 (2014).
[112] Cheng P., Thermal dispersion effects on non-Darcy convection flows in a saturated porous medium, Letters in Heat and Mass Transfer, 8, pp.267-270 (1981).
[113] Mokmeli A., Saffar-Avval M., Prediction of nanofluid convective heat transfer using the dispersion model, International Journal of Thermal Sciences, 49, pp. 471-478 (2010).
[114] Wang C., Liao J.., Zhu M., An explicit analytic solution for non-Darcy natural convection over horizontal plate with surface mass flux and thermal dispersion effects, Acta Mechanica, 165, pp. 139 -150 (2003).
[115] El-Amin M.F., Double dispersion effects on natural convection heat and mass transfer in non-Darcy porous medium , Applied Mathematics and Computation, 156, pp. 1-17 (2004).
[116] Gorla R. S. R., Chamkha A. J., Natural convective boundary layer flow over a nonisothermal vertical plate embedded in a porous medium saturated with a nanofluid, Nanoscale and MicroscaleThermophysical Engineering, 15, pp. 81-94 (2011).
[117] Pal D., Mondal H., Hydromagnetic convective diffusion of species in Darcy- Forchheimer porous medium with non-uniform heat source/sink and variable viscosity, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39, pp. 913-917 (2012).
[118] Hamad M.A.A, Ferdows M., Similarity solution of boundary layer stagnation-point flow towards a heated porous stretching sheet saturated with a nanofluid with heat absorption/generation and suction/blowing: A lie group analysis, Communications in Nonlinear Science and Numerical simulation, 17, pp. 132-140 (2012).
[119] Rashad A.M., Chamkha A. J.,Modather M., Mixed convection boundary-layer flow past a horizontal circular cylinder embedded in a porous medium filled with a nanofluid under convective boundary condition, Computers & Fluids, 86, pp. 380-388 (2013).
[120] Rana P., Bhargava R., Bég O.A., Numerical solution for mixed convection boundary layer flow of a nanofluid along an inclined plate embedded in a porous medium Computers and Mathematics with Applications, 64, pp. 2816-2832 (2012).
[121] Murthy P. V. S. N., Sutradhar A., RamReddy Ch., Double diffusive free convection flow past an inclined plate embedded in a non-Darcy porous medium saturated with a nanofluid, Transport porous Media; 98, pp. 553–564 (2013).
[122] Srinivasacharya D., Surender O., Non-similar solution for natural convective boundary layer flow of a nanofluid past a vertical plate embedded in a doubly stratified porous medium, International Journal of Heat and Mass Transfer, 71, pp. 431-438 (2014).
[123] Kuznetsov A.V., Nield D. A., Natural convective boundary-layer flow of a nanofluid past a vertical plate: A revised model, International Journal of Thermal Sciences, 77, pp.126-129 (2014).
[124] Nield D. A., Kuznetsov A. V., Thermal instability in a porous medium layer saturatedby a nanofluid: A revised model, International Journal of Heat and Mass Transfer, 68, pp. 211–214 (2014).
[125] Makinde O.D., Aziz A., MHD mixed convection from a vertical plate embedded in porous medium with a convective boundary condition, International Journal of Thermal Sciences, 49, pp.1813-1820 (2010).
[126] Jaluri, Y., Design and optimization of thermal systems, CRC press, Taylor & Francis group, Boca Raton, pp.104-112 (2008).

[127] Rubinstein J., Effective equations for flow in random porous media with a large number of scales, Journal of Fluid Mechanics, 170, pp. 379-383 (1986).
[128] Kaviany M., Principles of heat transfer in porous media, Springer-Verlag, New York, pp. 66 (1991).
[129] Leont'ev N.E., Flow past a cylinder and a sphere in a porous medium within the framework of the Brinkman equation with the Navier boundary condition, Fluid Dynamics, 49, pp.232-237 (2014).

CONCLUSIONS

1. Conclusions de la thèse

Cette partie de la thèse débute par un rappel des buts poursuivis par l'auteur et enchaîne avec une rétrospective des grandes lignes et des étapes marquantes de la recherche. Cela est suivi par la réponse à la question générale de la recherche et par un retour sur les autres principales conclusions, observations et propositions qui émergent de cette étude. Le tout se termine par la présentation de quelques pistes de réflexion sur le développement économique communautaire.

D'abord, le domaine d'étude se situe dans l'aire de la nanotechnologie qui traite de la production, l'application des matériaux à l'échelle nanométrique puis à l'intégration des nanostructures résultants dans de plus grands systèmes. Les tendances indiquent qu'elle est susceptible d'affecter notre vie quotidienne de façon considérable dans les prochaines décennies. Dans la branche de la thermique des fluides, la recherche pour les matériaux de refroidissement efficaces a mené à l'apparition d'un nouveau type de fluide appelé nano-fluide (fluide de base + nanomatériau). Ces nouveau fluides sont tout à fait différents des dispersions de l'ordre du mm ou micromètre. Comparés aux liquides de refroidissement conventionnels tels que l'eau, le kérosène, l'éthylène-glycol et les micro-fluides, les conductivités thermiques relevées sont plus élevées. Ceci leur a conféré une place et une assiduité de recherche dans les deux décennies, seulement, très soutenues.

L'examen de la littérature a montré que l'extension de ces nano-fluides à l'écoulement au sein des milieux poreux est encore à ses débuts, particulièrement pour la convection naturelle. En effet, la connaissance du comportement de tels fluides n'est pas suffisamment renseignée.

Après identification de la contribution, cette thèse s'est proposée de mettre en premier lieu en évidence les phénomènes de dispersion hydrodynamique, liées ou non à l'écoulement des nano-fluides. En conséquence, cette dispersion s'accompagne d'un transfert thermique et/ou massique s'additionnant aux diffusivités moléculaires, dans les milieux assez homogènes ou hétérogènes, et il s'agissait d'en tenir compte pour approcher plus correctement ces transferts.

Pour s'acquitter de cette tache, il a été évoqué les caractéristiques essentielles d'un nano-fluide, sa façon de le préparer ainsi que le comportement fondamental qu'est sa stabilité. Pour

une bonne modélisation, il a été présenté les paramètres de dépendance de sa conductivité thermique, prélude au bon choix et aux bonnes conditions d'utilisation. Pour compléter, il a été jugé nécessaire de montrer les grandes possibilités d'application. Sur un autre plan, il s'est avéré utile de présenter l'état de l'art des mécanismes responsables du comportement non-classique de ces fluides, passage obligé dans une modélisation adéquate.

Le défi de l'existence de la dispersion dans les milieux poreux a été relevé par une modélisation annexe, basée sur les connaissances préalables et synthétisées. Poursuivant l'analyse et le modèle particulier le plus apte à apporter des flux thermiques ignorés par ailleurs, connue sous « modèle de Buonogiorno », une extension a été établie dans le cadre du milieu complexe poreux muni de la dispersion pour un écoulement du nano-fluide.

Des résultats relevés par cette thèse sont brièvement rappelés :

- Il n'est pas possible d'ignorer la dispersion en cas d'utilisation d'un milieu poreux non-Darcéen et à priori lors de l'écoulement en son sein d'un nano-fluide. Cependant, dans des conditions très spécifiques, cette dispersion n'affecte pas les transferts dans un M.P Darcéen.

- l'interaction en double diffusion bien que complexe, est à rechercher surtout au niveau de la concentration des nanoparticules.

- La double dispersion a un effet plus prononcé pour un nano-fluide que pour un fluide dit clair. Cela vaut également pour le flux de transfert de masse que pour le flux de transfert thermique, dans le cas $L_e = L_n = 10$.

- Travailler avec un nano-fluide à l'intérieur d'un milieu poreux non-Darcéen mène à modifier les profils de vitesse, de la température et de la concentration des espèces, qui affectent à leur tour les taux de chaleur et de masse, quand la double dispersion y est présente, comme c'est le cas des milieux poreux réels.

- Le taux de transfert thermique augmente et le transfert de masse diminue fortement avec la double dispersion.

- A l'exception d'une sous couche du profil des vitesses, la prise en compte d'une condition

passive ou active n'a que peu d'effet sur les différentes couches limites.

- Dans les conditions d'expérimentation numériques, un nano-fluide plus ou moins diffusif en termes massiques n'affecte pas les profils.

2. Perspectives

Si les résultats montrent l'impact de la dispersion de l'écoulement hydrodynamique d'un nano-fluide en milieu poreux, il reste en perspective à déterminer en grandeurs réelles par la voie expérimentale ces effets, d'une part. Par conséquent, l'accès aux données devrait être confronté aux résultats de cette thèse, d'autre part, pour finalement en exploiter sur le plan applicatif.

Par ailleurs, la problématique posée dans cette thèse en appelle d'autres. A titre de réflexion, le modèle de Darcy-Forchheimeir-Brinkman n'est-il pas plus adéquat et dans quelles circonstances ? Il semble qu'une voie est aussi ouverte pour la convection mixte, dont la modélisation ardue, présentera un défi à surmonter.

Il apparait enfin, à la lumière de la procédure et des résultats, que la question de la modélisation est-elle suffisante à une phase, que la présente est-elle adéquate dans des situations extrêmes de convection, qui peuvent alors demander une modélisation à deux phases.

ملخص : **مساهمة لدراسة في الأوساط المسامية المشبعة بمائع نانونى. نماذج بسيطة و معقدة .**

درسنا التشتت في وسط مسامي من قبل جريان مائع نانوني ,لا- دارسي , بواسطة نمدجة مطابقة للمقاربة بيون جورنو ووفقا لآليات الأساسية للنقل. استعملت مقاربة اوبربيك - بوسينسك من أجل الانتشار المزدوج , توسيعه دارسي- فورشيهيمر و العلاقة الرابطة بين التشتت و حقل السرعة , ودالك لكتابة المعادلات الحافظة للكتلة , كمية الحركة , الطاقة الحرارية , تركيز الاصناف و النانو-جزئيات تحت حمل طبيعي. تفاعل المائع النانوني مع صفيحة عمودية هي ممثلة بشرطين للحرارة , أيسو-ثرم ثم حاملة , أيسو-صنف عند الجدار. منهجيه مبنية على الفرق المنتهية دقيقة و ملائمة أدت إلى حل النظام الرياضي ذا قيم عند النهايات. التشتت يؤثر تأثير قوي على التحويل الكتلة و بأقل درجة على التحويل الحراري, هدا و التأثير يكون سلبي للتحويل الأول و يخف بالنسبة للوسط مسامي لا- دارسي, مع جدار أكثر حمولة و حمل طبيعي قوي. بينما يكون ايجابي على التحويل الحراري لكن بدرجة صغيرة. مميزات المائع النانونى الأقوى تقدم تحويلات أعلى مقارنة مع مميزات السائل الأصلي.

الكلمات المفتاحية **تشتت , وسط مسامي , لا- دارسي , مائع نانوني , آليات , الانتشار المزدوج , حمل طبيعي, نمدجة.**

Résumé: **Contribution à l'étude des milieux poreux saturés par des nano-fluides. Modèles simples et complexes.**
La dispersion dans les milieux poreux dans lequel un écoulement non-Darcéen d'un nano-fluide a lieu, est étudiée par le biais d'une modélisation adéquate se basant sur l'approche de Buongiorno, en accord aux mécanismes prépondérants de transport. L'approximation d'Oberbeck Boussinesq pour une double diffusion, l'extension de Darcy-Forchheimer et une relation de dépendance de la dispersion avec le champ des vitesses, ont été adoptés pour l'écriture des équations de conservations de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie, de la concentration des espèces et des nanoparticules pour un régime de convection naturelle. L'interaction du nano-fluide avec une plaque verticale est matérialisée pour deux conditions thermiques, isotherme puis convective, et iso-concentration d'espèces, à la paroi. Une méthodologie de différences finies précises a été trouvée appropriée pour la résolution du système mathématique à valeurs aux limites adimensionné. La dispersion affecte fortement le transfert de masse et sensiblement moins le transfert thermique. Cet effet est négatif pour le premier transfert et s'atténue à mesure que le milieu est non-Darcéen, une paroi plus convective et la convection du nano-fluide plus vigoureuse. Il est par contre positif pour le transfert thermique mais dans des proportions moins grandes. Un nano-fluide avec des caractéristiques fortes présente des taux plus élevés par rapport à celui proche du fluide base.

Mots clés: **dispersion, milieu poreux non Darcéen, nano-fluide, mécanismes, double-diffusion, convection, modélisation.**

Abstract: **Contribution to the study of a porous medium saturated by a nanofluid. Simple and complex models.**
This study is concerned by the effect of the dispersion of a nanofluid in a non-Darcy flow within a saturated porous medium. A suitable modeling based on the Buongiorno's approach is developed according to the more representative mechanisms. The phenomenon of double diffusive natural convective problem is treated with the help of Oberbeck-Boussinesq's approximation, the Darcy-Forchheimer's model and the relationship between the dispersion and the velocity, for writing the conservative equations of masse, momentum, thermal energy, solutal concentration and the nanoparticles volume fraction. Two thermal boundary conditions cases, isothermal then convective, and iso-concentration at the wall of the plate neighboring the nanofluid are specified. An accurate finite difference method was found appropriate to solve the dimensionless boundary values mathematical system. Preliminary results show that the mass transfer rate is affected strongly by the dispersion and weakly for the thermal transfer rate. This effect influences negatively the first, but decreases as the porous medium obey of the non-Darcy concept, with more convective plate and with vigorous natural convection of the nanofluid. However, this tendency is inverted for the thermal transfer rate, but with the weak proportions. The dependency of the level of the transfer rates is strong with the characteristics of the nanofluid.

Keywords: **Dispersion, porous medium, non-Darcy, nanofluid, mechanisms, double-diffusion, convection, modeling.**