



N° d'ordre : 05/2015

## THÈSE

Présentée à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès  
En vue de l'obtention du titre de :

**Docteur de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdallah**

**Discipline : Génie Mécanique**

**Spécialité : Simulation Numérique en Mécanique - Énergétique**

Par :

**DRISS ACHEMLAL**

---

### MODÉLISATION ET ANALYSE DE LA CONVECTION THERMIQUE DANS UN MILIEU POREUX SATURÉ DE FLUIDE NEWTONIEN ET NON-NEWTONIEN

---

*Soutenue le 28 Février 2015 devant le jury composé de :*

<b>A. SEFOUANE</b>	<b>PES</b>	<b>Université Euro-Méditerranéenne de Fès</b>	<b>Président</b>
<b>M. HASNAOUI</b>	<b>PES</b>	<b>Faculté des Sciences Semlalia à Marrakech</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>A. AL MERS</b>	<b>PH</b>	<b>École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Meknès</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>A. EL BIYAALI</b>	<b>PES</b>	<b>Faculté des Sciences et Techniques de Fès</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>A. JAMIL</b>	<b>PH</b>	<b>École Supérieure de Technologies de Fès</b>	<b>Examineur</b>
<b>S. A. KAMOURI</b>	<b>PH</b>	<b>Faculté Polydisciplinaire de Taza</b>	<b>Examineur</b>
<b>M. SRITI</b>	<b>PES</b>	<b>Faculté Polydisciplinaire de Taza</b>	<b>Directeur de Thèse</b>





**Auteur : Driss ACHEMLAL**

**Directeur de thèse : Professeur Mohammed SRITI**

**Titre : *Modélisation et Analyse de la Convection Thermique dans un Milieu Poreux Saturé de Fluide Newtonien et Non-Newtonien***

**Résumé :**

L'étude de la convection thermique et de l'écoulement dans les milieux poreux a beaucoup suscité d'importance pendant ces dernières années grâce à de nombreuses applications pratiques aussi bien dans le domaine naturel qu'industriel. A titre d'exemples, on peut citer l'infiltration de l'eau dans les nappes phréatiques, l'utilisation de l'énergie géothermique, l'extraction du pétrole et du gaz à travers le sol, le séchage des produits agroalimentaires, le stockage des déchets radioactifs, les systèmes biologiques, etc.

Dans ce travail, nous nous intéressons à la modélisation théorique et numérique du phénomène de la convection naturelle ou mixte, dans un milieu poreux saturé de fluide incompressible newtonien ou non-newtonien en régime laminaire autour d'une plaque plane verticale soumise à une température non uniforme et à une vitesse d'aspiration/injection en absence ou en présence d'une génération interne de chaleur. En premier lieu, le problème a été modélisé en adoptant une méthode de similarité qui se ramène à une équation différentielle non-linéaire de troisième ordre. Cette dernière a été résolue, numériquement, en utilisant la méthode de Runge-Kutta-Fehlberg couplée avec une technique itérative de Tir. Les effets des paramètres physiques contrôlant le phénomène sur les solutions de similarité sont étudiés et analysés en détail.

En second lieu, nous avons procédé à la résolution des équations de Navier-Stokes couplées avec la loi de Darcy en milieu poreux saturé pour la convection naturelle dans le cas d'un fluide newtonien dans une configuration bidimensionnelle. Pour la résolution du problème, nous avons utilisé la méthode de différences finies avec un maillage raffiné. Après le développement, nous avons validé notre code de calcul en comparant les résultats obtenus avec ceux de l'approche de similarité. Ensuite, nous avons étudié les effets des paramètres impliqués dans le problème du transfert thermique et de l'écoulement. Cette étude a été accompagnée par des représentations graphiques et des analyses détaillées à caractère physique.

Finalement, le travail se termine par une conclusion générale qui dégage les enseignements principaux sur les phénomènes de transfert thermique et de l'écoulement moyen dans un milieu poreux saturé autour d'une plaque plane perméable en présence des flux thermiques variables.

**Mots clés :**

Convection naturelle, milieu poreux, plaque plane perméable, fluide newtonien et non-newtonien, aspiration/injection, solutions de similarité, Runge-Kutta-Fehlberg, différences finies.



# Sommaire

<b>Liste des symboles utilisés</b>	<b>1</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>3</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>8</b>
<b>CHAPITRE I GENERALITES ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>10</b>
I Introduction . . . . .	10
II Transfert de chaleur par convection . . . . .	10
II.1 Convection naturelle . . . . .	10
II.2 Convection forcée . . . . .	11
II.3 Convection mixte . . . . .	11
III Notions sur le milieu poreux . . . . .	11
III.1 Définition d'un milieu poreux . . . . .	11
III.2 Porosité . . . . .	12
III.3 Perméabilité . . . . .	13
IV Fluides newtoniens . . . . .	14
V Fluides non-newtoniens . . . . .	16
V.1 Classification des fluides non-newtoniens . . . . .	17
V.2 Fluides non-newtoniens indépendants du temps . . . . .	17
V.3 Fluides non-newtoniens dépendants du temps . . . . .	20
V.4 Fluides viscoélastiques . . . . .	21
VI Revue bibliographique . . . . .	21
VI.1 Fluides newtoniens . . . . .	21

VI.2	Convection naturelle pour fluides non-newtoniens . . . . .	27
VII	Situation du problème . . . . .	30
<b>CHAPITRE II FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME</b>		<b>32</b>
I	Introduction . . . . .	32
II	Equations de conservation . . . . .	32
II.1	Théorèmes fondamentaux . . . . .	32
II.2	Equation de conservation de la masse . . . . .	33
II.3	Equation de conservation de la quantité de mouvement . . . . .	34
II.4	Equation de conservation de l'énergie . . . . .	35
II.5	Approximation de Boussinesq . . . . .	37
III	Modélisation Thermoconvective en milieu poreux saturé . . . . .	37
III.1	Echelles microscopique et macroscopique . . . . .	37
III.2	Changement d'échelle . . . . .	38
III.3	Modèles d'écoulement en milieux poreux . . . . .	40
III.4	Transfert de chaleur en milieu poreux . . . . .	44
IV	Conclusion . . . . .	49
<b>CHAPITRE III APPROCHE DE SIMILARITE POUR UN FLUIDE NEWTONIEN</b>		<b>50</b>
I	Introduction . . . . .	50
II	Convection naturelle en présence d'une génération interne de chaleur . . . . .	51
II.1	Position du problème physique . . . . .	51
II.2	Hypothèses adoptées . . . . .	52
II.3	Analyse dimensionnelle de la couche limite . . . . .	52
II.4	Système des équations retenu . . . . .	54
II.5	Procédure de résolution numérique. . . . .	60
II.6	Résultats numériques et analyse . . . . .	61
III	Effet de la radiation thermique sur la convection naturelle . . . . .	71
III.1	Position du problème . . . . .	71
III.2	Hypothèses du travail . . . . .	71
III.3	Modèle mathématique et analyse de similarité . . . . .	72
III.4	Technique de résolution numérique. . . . .	74

III.5	Analyse et discussion des résultats	74
IV	Effets de la perméabilité et de l'aspiration/injection sur la convection mixte	87
IV.1	Position du problème	87
IV.2	Hypothèses du travail	87
IV.3	Modèle mathématique et analyse de similarité	87
IV.4	Discussion des résultats numériques	91
V	Conclusion	105

#### CHAPITRE IV APPROCHE DE SIMILARITE POUR UN FLUIDE NON-NEWTONIEN 107

I	Introduction	107
II	Description et modélisation mathématique du problème	107
II.1	Hypothèses simplificatrices	108
II.2	Modèle mathématique dimensionnel	108
II.3	Normalisation des paramètres du problème	109
III	Procédure numérique de résolution	111
IV	Validation et analyse des résultats	112
IV.1	Validation des résultats	112
IV.2	Profils de vitesse	113
IV.3	Profils thermiques	114
IV.4	Profils du nombre de Nusselt	115
IV.5	Effet de $\sigma$ sur le profil du coefficient de frottement	115
V	Conclusion	129

#### CHAPITRE V APPROCHE NUMERIQUE PAR LA METHODE DES DIFFERENCES FINIES POUR UN FLUIDE NEWTONIEN 130

I	Introduction	130
II	Modélisation mathématique du problème	131
II.1	Description du problème	131
II.2	Hypothèses simplificatrices	131
II.3	Equations de conservation	132

---

II.4	Equations de conservation en forme adimensionnelle. . . . .	133
II.5	Méthode des différences finies . . . . .	134
III	Résultats et analyse . . . . .	140
III.1	Validation et comparaison . . . . .	141
III.2	Champ dynamique . . . . .	141
III.3	Champ thermique . . . . .	142
III.4	Profil du nombre de Nusselt local . . . . .	144
IV	Conclusion . . . . .	159
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		<b>160</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>163</b>
<b>Annexe 1 : Méthode de Runge-Kutta-Fehlberg</b>		<b>170</b>
<b>Annexe 2 : Organigramme de calcul - MDF</b>		<b>171</b>