

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

THESE

**Présentée au Département de Génie des Procédés
Pour l'obtention du diplôme de**

DOCTORAT

Filière: Génie des Procédés Option: Génie Chimique

Par

RACHEDI Nesrine

THEME

**Etude numérique de la convection naturelle couplée
au rayonnement volumique dans l'approximation
faible nombre de Mach**

Soutenue le 26/12/2018 devant le Jury:

BENCHEIKH Lahcène	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
GUELLAL Messaoud	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
BOUAFIA Madiha	M.C.A.	Univ. Evry Val d'Essonne France	Co-Directeur
NACEF Saci	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur
BENCHABANE Adel	Professeur	Univ. Mohamed Khider Biskra	Examineur

Dédicaces

A ceux que j'aime profondément :

A mes chers parents

Et à mes frères.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie 'Allah' de m'avoir donné la patience pour réaliser ce modeste travail.

Ce travail de recherche a été réalisé au Laboratoire de Génie des Procédés Chimiques (LGPC) de l'Université Ferhat Abbas Sétif 1 et au Laboratoire de Mécanique et Energétique d'Evry (LMEE) de l'Université d'Evry Val d'Essonne (France).

Je remercie énormément mon directeur de thèse Monsieur **Messaoud GUELLAL**, Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, d'avoir partagé avec moi son expérience si vaste, ainsi que sa compétence technique dans le domaine. Il m'a conduit, en toute sérénité, à l'aboutissement de cette thèse à travers ses conseils et m'a assuré les meilleures conditions de travail. Merci pour sa grande disponibilité, sa gentillesse et ses encouragements permanents. Je lui suis très reconnaissante de m'avoir consacré tous ce temps.

Je tiens à adresser ma plus profonde reconnaissance à mon co-directeur Madame **Madiha BOUAFIA**, Maître de Conférences à l'Université Evry Val d'Essonne (France). Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude, pour son encadrement scientifique. Je la remercie pour sa disponibilité, ses précieux conseils dans les moments les plus difficiles et la connaissance qu'elle m'a portée tout au long de ce travail. Elle a été d'une patience exemplaire avec moi et d'une disponibilité hors du commun. Merci infiniment.

Je tiens à remercier Monsieur **Lahcène BENCHEIKH**, Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1 d'avoir accepté de présider le jury. Je tiens à remercier vivement le Professeur **Adel BENCHABANE**, de l'Université de Biskra et Monsieur **Saci NACEF**, Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, qui ont accepté d'examiner ce travail.

Mes pensées finales reviendront à ma famille qui m'a soutenue pendant toutes ces années.

SOMMAIRE

Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	xi
Nomenclature.....	xii
INTRODUCTION GENERALE.....	01

CHAPITRE 1

GENERALITES ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

	Pages
1. Introduction	03
2. Généralités	03
3. Revue bibliographique	04
3.1. Convection naturelle en cavité différentiellement chauffée	05
3.2. Rayonnement surfacique	08
3.3. Rayonnement volumique	11
3.3.1. Rayonnement volumique dans les gaz gris	11
3.3.2. Rayonnement volumique dans les gaz réels.....	14
3.3.3. Couplage convection naturelle-rayonnement volumique en approximation faible nombre de mach	15
4. Conclusion.....	17

CHAPITRE 2

MODELISATION MATHEMATIQUE ET RESOLUTION NUMERIQUE DU PROBLEME DE LA CONVECTION NATURELLE EN MILIEU SEMI-TRANSPARENT

	Pages
1. Introduction	18
2. Formulation mathématique.....	18
2.1. Écoulement compressible	18
2.1.1. Equations de conservation.....	18
2.1.2. Forme adimensionnelle des équations de conservation	20
2.2. Écoulement à faible nombre de Mach	21
2.2.1. Equations de conservation	22
2.2.2. Redimensionnement des équations de conservation	24
2.3. Écoulement incompressible	26
2.4. Écoulement dilatable (Approximation de Boussinesq)	27
2.4.1. Equations de conservation	28
2.5. Adimensionnement des équations du modèle de faible nombre de Mach	28
2.5.1 Convection naturelle pure	29

2.5.2	Convection naturelle couplée au rayonnement volumique	29
2.6.	Adimensionnement des équations du modèle de Boussinesq.....	29
3.	Résolution numérique	31
3.1	Forme Générale des équations de conservation dans l'approximation LMN ...	31
3.2	Méthode des volumes finis	32
3.2.1	Principe.....	32
3.2.2	Maillage décalé.....	33
3.2.3	Discrétisation des équations de conservation.....	34
3.2.4	Équation de continuité.....	37
3.2.5	Couplage pression-vitesse	39
3.3	Discrétisation des équations de conservation du modèle compressible (faible nombre de Mach).....	40
3.3.1	Discrétisation De l'équation De Quantité De Mouvement	40
3.3.2	Procédure de résolution.....	44
3.3.3	Résolution du système d'équations discrétisées-Algorithme SIMPLER.	47
3.3.4	Algorithme SIMPLER transitoire.....	49
3.3.5	Relaxation.....	49
3.3.6	Résolution des systèmes d'équations linéaires.....	50
3.3.7	Critère de convergence.....	51
3.4	Discrétisation des équations de conservation du modèle incompressible (Boussinesq).....	52
3.4.1	Discrétisation temporelle.....	52
3.4.2	Application aux équations dans le cas Boussinesq	53
4.	Conclusion.....	55

CHAPITRE 3

MODELISATION DU TRANSFERT RADIATIF

	Pages
1. Introduction.....	56
2. Quelques définitions et concepts en rayonnement.....	56
2.1. Equilibre thermodynamique local (ETL).....	56
2.2. Luminance.....	57
2.3. Luminance du corps noir.....	57
2.4. Absorption et émission.....	58
2.5. Diffusion.....	58
2.6. Bilan radiatif général.....	59
3. Conditions aux limites.....	60
4. Grandeurs radiatives intégrales.....	60
5. Méthodes numériques de résolution de l'équation de transfert radiatif (ETR)	61
5.1. Méthode multi-flux.....	61
5.2. Méthode des harmoniques sphériques (PN).....	62
5.3. Méthode des ordonnées discrètes (MOD).....	62

5.4.	Méthode des volumes finis (MVF).....	62
5.5.	Méthode de Monte Carlo.....	63
5.6.	Méthode des zones.....	63
6.	Méthode des ordonnées discrètes (MOD).....	64
6.1.	Discrétisation angulaire.....	64
6.1.1.	Principe de la discrétisation	64
6.1.2.	Quadratures S_N	65
6.2.	Discrétisation spatiale de l'équation radiative	67
7.	Transfert radiatif en présence d'un milieu semi transparent.....	70
7.1.	Problèmes bidimensionnel, cas d'une cavité carrée.....	70
7.2.	Résultats numériques.....	71
7.2.1.	Validation.....	71
7.2.2.	Effet du maillage.....	73
7.2.3.	Effet du coefficient d'absorption.....	74
7.2.4.	Effet de quadrature.....	75
8.	Conclusion.....	76

CHAPITRE 4

COUPLAGE CONVECTION NATURELLE-RAYONNEMENT VOLUMIQUE SOUS L'APPROXIMATION BOUSSINESQ

	Pages
1. Introduction.....	77
2. Modèle physique et hypothèses.....	77
3. Equations gouvernantes.....	77
4. Résultats et discussions.....	81
4.1. Validation du code de calcul.....	81
4.1.1. Effet de sensibilité sur le maillage.....	81
4.1.2. Convection pure.....	81
4.1.3. Couplage de la convection naturelle avec le rayonnement	81
4.2. Effet du nombre de Planck	82
4.3. Effet de l'épaisseur optique.....	86
4.4. Effet du nombre de Rayleigh	90
5. Conclusion	94

CHAPITRE 5

COUPLAGE CONVECTION NATURELLE-RAYONNEMENT VOLUMIQUE SOUS L'APPROXIMATION FAIBLE NOMBRE DE MACH

	Pages
1. Introduction.....	95
2. Modèle physique et équations gouvernantes.....	95

3. Résultats et discussions.....	97
3.1. Validation du code de calcul.....	97
3.1.1. Validation du modèle hors Boussinesq	98
3.1.2. Validation du couplage de la convection naturelle avec le rayonnement volumique.....	98
3.2. Effet du nombre de Planck	98
3.3. Effet du nombre de Rayleigh	103
3.4. Effet du paramètre de Boussinesq.....	109
3.5. Effet de l'épaisseur optique.....	113
4. Limite du modèle de Boussinesq	117
5. Conclusion.....	129

CHAPITRE 6

ETUDE DE L'EFFET DU RAYONNEMENT SURFACIQUE SUR LA CONVECTION NATURELLE DANS UN MILIEU PARTICIPANT EN ECOULEMENT HORS BOUSSINESQ

	Pages
1. Introduction.....	131
2. Effet de l'émissivité des parois de la cavité	131
2.1. Cas d'un milieu transparent.....	131
2.2. Cas d'un milieu semi-transparent ($\tau = 1$).....	134
3. Cas d'une cavité aux parois réfléchissantes ($\varepsilon_{1234} = 0$)	136
4. Cas d'une cavité aux parois noires ($\varepsilon_{1234} = 1$).....	138
5. Conclusion	143
 CONCLUSION GENERALE.....	 144
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	146
ANNEXE 1	A1
ANNEXE 2	A7

LISTE DES FIGURES

Chapitre 2

Figures	Titre	Pages
Figure 1	Volume de contrôle dans le cas de 2D	33
Figure 2	Maillage de la formulation vitesse-pressure : (a) maillage collocatif ; (b) maillage décalé.	33
Figure 3	Volumes de contrôle pour les scalaires et les vitesses.....	34
Figure 4	Interpolation pour le gradient de ϕ	36
Figure 5	Diffusivité pour un matériau composite.....	36
Figure 6	Volume de contrôle pour les quantités scalaires (P, ϕ) et l'équation de continuité.	41
Figure 7	Volume de contrôle pour la composante u et ses voisines.....	42
Figure 8	Volume de contrôle pour la composante v et ses voisines	42
Figure 9	Algorithme SIMPLER.	48
Figure 10	Algorithme SIMPLER transitoire.....	49
Figure 11	Domaine de calcul.....	50
Figure 12	Algorithme simplifié pour le couplage convection-rayonnement	55

Chapitre 3

Figures	Titre	Pages
Figure 1	Schéma représentant la luminance radiative monochromatique	57
Figure 2	Différentes contributions du phénomène radiatif local [89].....	58
Figure 3	Volume de contrôle d'un milieu semi-transparent.	59
Figure 4	Quadrature angulaire S_4 [106].....	66
Figure 5	Volume de contrôle pour l'intégration de l'ETR [106].....	68
Figure 6	Orientation des volumes de contrôle suivant une direction $\vec{s}_m$ [106].....	68
Figure 7	Modèle physique.....	70
Figure 8	Flux radiatif adimensionnel sur la paroi chaude pour les quadratures S_4 et S_6 . $\tau = 0.25$ et $\omega = 0$. (a) Résultats de simulation (b) Solution exacte de Crosbie et Schrenker [115] et Résultats de El Kasmi [114]	72
Figure 9	Flux radiatif adimensionnel sur la paroi froide pour les quadratures S_4 et S_6 . $\tau = 0.25$ et $\omega = 0$. (a) Résultats de simulation (b) Solution exacte de Crosbie et Schrenker [115] et Résultats de El Kasmi [114].....	72
Figure 10	Flux radiatif adimensionnel sur la paroi chaude pour les quadratures S_4 et S_6 . $\tau = 1$ et $\omega = 0$. (a) Résultats de simulation (b) Solution exacte de Razzaque [115] et résultats de El Kasmi [114].....	72
Figure 11	Flux radiatif adimensionnel sur la paroi froide (inférieure) pour les quadratures S_4 et S_6 . $\tau = 1$ et $\omega = 0$. (a) Résultats de simulation (b) Solution exacte de Razzaque [116] et résultats de El Kasmi [114]... ..	73
Figure 12	Flux radiatif net ($Q_{net} = \sigma T_p^4 - q_{R,y}$) adimensionnel sur la paroi chaude pour trois maillages différents et pour $k = 1$	73
Figure 13	Flux radiatif adimensionnel reçu par la paroi froide inférieure opposée à la paroi chaude de $T=T_p$ en fonction du coefficient d'absorption k pour	

	Sn=6.....	74
Figure 14	Flux radiatif net ($Q_{net} = \sigma T_p^4 - q_{R,y}$) adimensionnel à la paroi chaude ($T=T_p$) en fonction du coefficient d'absorption k pour Sn=6	74
Figure 15	Champ de température en fonction du coefficient d'absorption pour les quadratures Sn=4 et 6	75
Figure 16	Flux radiatif net ($Q_{net} = \sigma T_p^4 - q_{R,y}$) adimensionnel sur la paroi chaude	76
Figure 17	Flux radiatif adimensionnel sur la paroi froide (inférieure)	76

Chapitre 4

Figures	Titre	Pages
Figure 1	Configuration étudiée.....	77
Figure 2	Lignes de courant (haut) et isothermes (bas) pour différentes valeurs du nombre de Planck pour $Ra = 5 \cdot 10^6$, $\tau = 1$ et $\theta_0 = 1.5$	83
Figure 3	Effet du nombre de Planck sur les nombres de Nusselt moyens radiatif et total pour $Ra = 5 \cdot 10^6$ et $\tau = 1$	84
Figure 4	Profils de température dans le plan médian vertical en fonction de Pl pour $Ra = 5 \cdot 10^6$ et $\tau = 1$	84
Figure 5	Profils de température dans le plan médian horizontal en fonction de Pl pour $Ra = 5 \cdot 10^6$ et $\tau = 1$	85
Figure 6	Profils de la composante verticale de vitesse dans le plan médian horizontal en fonction de Pl pour $Ra = 5 \cdot 10^6$ et $\tau = 1$	85
Figure 7	Profils de la composante horizontale de vitesse dans le plan médian vertical en fonction de Pl pour $Ra = 5 \cdot 10^6$ et $\tau = 1$	86
Figure 8	Isothermes (haut) et lignes de courant (bas) en fonction de l'épaisseur optique pour $Ra = 5 \cdot 10^5$ et Pl=0.02	87
Figure 9	Profils de température dans le plan médian vertical en fonction de τ pour $Ra = 5 \cdot 10^5$ et Pl=0.02	88
Figure 10	Profils de température dans le plan médian horizontal en fonction de τ pour $Ra = 5 \cdot 10^5$ et Pl=0.02	88
Figure 11	Profils de la composante horizontale de vitesse dans le plans médian vertical pour différentes valeurs de τ , $Ra = 5 \cdot 10^5$ et Pl=0.02	89
Figure 12	Profils de la composante verticale de vitesse dans le plan médian horizontal pour différentes valeurs de τ , $Ra = 5 \cdot 10^5$ et Pl=0.02.....	89
Figure 13	Variation du nombre de Nusselt moyen du côté chaud en fonction de τ pour $Ra = 5 \cdot 10^5$ et Pl=0.02	90
Figure 14	Lignes de courant pour Pl =0.02, $Ra = 10^3$ à 10^6 et $\tau = 0 ; 1$	91
Figure 15	Isothermes pour Pl =0.02, $Ra = 10^3$ à 10^6 et $\tau = 0 ; 1$	91
Figure 16	Profils de vitesse verticale à Y=0.5 en fonction du nombre de Rayleigh pour Pl=0.02 (a) avec rayonnement $\tau = 1$, (b) sans rayonnement $\tau = 0$...	92
Figure 17	Profils de vitesse horizontale à X=0.5 en fonction du nombre de Rayleigh pour Pl=0.02 (a) avec rayonnement $\tau = 1$, (b) sans rayonnement $\tau = 0$	92

Figure 18	Profils de température dans le plan médian horizontal en fonction du nombre de Rayleigh pour $Pl=0.02$ (a) avec rayonnement $\tau = 1$, (b) sans rayonnement $\tau = 0$	93
Figure 19	Profils de température dans le plan médian vertical en fonction du nombre de Rayleigh pour $Pl=0.02$ (a) avec rayonnement $\tau = 1$, (b) sans rayonnement $\tau = 0$	93
Figure 20	Variation du nombre de Nusselt moyen total du côté chaud en fonction de Ra pour $\tau = 0$ et $\tau = 1$	94

Chapitre 5

Figures	Titre	Pages
Figure 1	Configuration physique du problème.....	95
Figure 2	Lignes de courant pour différentes valeurs du nombre de Planck, pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	100
Figure 3	Isothermes pour différentes valeurs du nombre de Planck, pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	100
Figure 4	Profils de la composante horizontale de vitesse dans le plan médian vertical en fonction du nombre de Planck, pour $Ra=5.10^6$ et $\tau = 1$	101
Figure 5	Profils de la composante verticale de vitesse dans le plan médian horizontal en fonction du nombre de Planck, pour $Ra=5.10^6$ et $\tau = 1$...	101
Figure 6	Profils de température dans le plan médian horizontal en fonction du nombre de Planck, pour $Ra=5.10^6$ et $\tau = 1$	101
Figure 7	Effet du nombre de Planck sur le nombre de Nusselt local convectif pour $Ra=5.10^6$ et $\tau = 1$	102
Figure 8	Effet du nombre de Planck sur le nombre de Nusselt local radiatif pour $Ra=5.10^6$ et $\tau = 1$	102
Figure 9	Effet du nombre de Planck sur le nombre de Nusselt local total pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	102
Figure 10	Effet du nombre de Planck sur les nombres de Nusselt moyens convectif et radiatif pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	103
Figure 11	Effet du nombre de Planck sur le nombre de Nusselt moyen total pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	103
Figure 12	Lignes de courant (haut) et isothermes (bas) en fonction du nombre de Ra pour $Pl=0.02$ et $\varepsilon_b = 0.017$	104
Figure 13	Lignes de courant (haut) et isothermes (bas) en fonction du nombre de Ra pour $Pl=0.02$ et $\varepsilon_b = 0.6$	105
Figure 14	Profils de température dans le plan médian horizontal pour différentes valeurs de τ et $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$ et 10^6	105
Figure 15	Profils de la composante horizontale de vitesse dans le plan médian vertical pour différentes valeurs de τ et $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$ et 10^6	106
Figure 16	Profils de la composante verticale de vitesse dans le plan médian horizontal pour différentes valeurs de τ et $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$ et 10^6 ...	106
Figure 17	Profils du nombre Nusselt local convectif pour différentes valeurs de τ et $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$ et 10^6	107

Figure 18	Profils du nombre Nusselt local radiatif pour différentes valeurs de τ et $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$ et 10^6	107
Figure 19	Profils du nombre de Nusselt local total pour différentes valeurs de τ et $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$ et 10^6	108
Figure 20	Effet du nombre de Ra sur les nombres de Nusselt moyens convectif, radiatif et total pour $Pl = 0.02$ et $\varepsilon_b = 0.017$	108
Figure 21	Effet du nombre de Ra sur les nombres de Nusselt moyens convectif, radiatif et total pour $Pl = 0.02$ et $\varepsilon_b = 0.6$	109
Figure 22	Lignes de courant en fonction du paramètre de Boussinesq ε_b pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$ (PC : propriétés constantes et PV : propriétés variables)	110
Figure 23	Isothermes en fonction du paramètre de Boussinesq ε_b pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$ (PC : propriétés constantes et PV : propriétés variables).	110
Figure 24	Profils de température au médian horizontal en fonction du paramètre de Boussinesq ε_b pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	111
Figure 25	Profils de la composante horizontale de vitesse au médian vertical en fonction du paramètre de Boussinesq ε_b pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	111
Figure 26	Profils de la composante verticale de vitesse au plan médian horizontal pour différentes valeurs de ε_b pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	111
Figure 27	Effet du paramètre de Boussinesq ε_b sur le nombre de Nusselt local convectif pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	112
Figure 28	Effet du paramètre de Boussinesq ε_b sur le nombre de Nusselt local radiatif pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	112
Figure 29	Effet du paramètre de Boussinesq ε_b sur le nombre de Nusselt local total pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	112
Figure 30	Effet du paramètre de Boussinesq sur les nombres de Nusselt moyen convectif, radiatif et total pour $Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$	113
Figure 31	Isothermes à $Ra = 5.10^6$ et $Pl=0.02$ et pour différentes valeurs de τ	114
Figure 32	Lignes de courant à $Ra = 5.10^6$ et $Pl=0.02$ pour différentes valeur de τ	114
Figure 33	Profils de température dans le plan médian horizontal à $Ra = 5.10^6$ et $Pl=0.02$ pour différentes valeurs de τ	114
Figure 34	Profils de la composante horizontale de vitesse dans le plans médian vertical pour différentes valeurs de τ , $Ra = 5.10^6$ et $Pl=0.02$	115
Figure 35	Profils de la composante verticale de vitesse dans le plans médian horizontal en fonction de τ pour $Ra = 5.10^6$ et $Pl=0.02$	115
Figure 36	Variation du nombre de Nusselt local convectif sur la paroi chaude en fonction de τ pour $Ra = 5.10^6$ et $Pl=0.02$	115
Figure 37	Variation du nombre de Nusselt local radiatif sur la paroi chaude en fonction de τ pour $Ra = 5.10^6$ et $Pl=0.02$	116
Figure 38	Variation du nombre de Nusselt local total sur la paroi chaude en fonction de τ pour $Ra = 5.10^6$ et $Pl=0.02$	116
Figure 39	Variation des nombres de Nusselt moyens convectif, radiatif et total sur la paroi chaude en fonction de τ pour $Ra = 5.10^6$ et $Pl=0.02$	116

Figure 40	Taux de variation de ρ^* , μ^* et k^* en fonction de ΔT pour $Ra=5.10^6$ et différentes épaisseurs optiques.....	119
Figure 41	Evolution des nombres de Nusselt moyens total (gauche) et radiatif (droite) sur la paroi chaude en fonction de ΔT pour $Ra=5.10^6$	120
Figure 42	Profils de la vitesse horizontale dans le plan médian vertical de la cavité en fonction de l'épaisseur optique pour $Ra = 5.10^6$	120
Figure 43	Profils de la vitesse verticale dans le plan médian horizontal de la cavité en fonction de l'épaisseur optique pour $Ra = 5.10^6$	121
Figure 44	Variation des vitesses horizontales maximale et minimale en fonction de ΔT pour différentes épaisseurs optiques et pour $Ra=5.10^6$	122
Figure 45	Variation des vitesses verticales maximale et minimale en fonction de ΔT pour différentes épaisseurs optiques et $Ra=5.10^6$	123
Figure 46	Profils des températures dans le plan médian horizontal de la cavité en fonction de ΔT et de l'épaisseur optique pour $Ra=5.10^6$	124
Figure 47	Profils des températures dans le plan médian vertical de la cavité en fonction de ΔT et de l'épaisseur optique pour $Ra=5.10^6$	125
Figure 48	Distribution de la température aux parois adiabatiques supérieure et inférieure en fonction de ΔT pour $Ra=5.10^6$ et $\tau = 0.2$	125
Figure 49	Distribution de la température aux parois adiabatiques supérieure et inférieure en fonction de ΔT pour $Ra=5.10^6$ et $\tau = 1$	126
Figure 50	Distribution de la température aux parois adiabatiques supérieure et inférieure en fonction de ΔT pour $Ra=5.10^6$ et $\tau = 5$	126
Figure 51	Distribution du nombre de Nusselt convectif local à la paroi chaude en fonction de ΔT et de l'épaisseur optique pour $Ra=5.10^6$	127
Figure 52	Distribution du nombre de Nusselt radiatif local à la paroi chaude en fonction de ΔT et de l'épaisseur optique pour $Ra=5.10^6$	128
Figure 53	Distribution du nombre de Nusselt total local à la paroi chaude en fonction de ΔT et de l'épaisseur optique pour $Ra=5.10^6$	129

Chapitre 6

Figures	Titre	Pages
Figure 1	Isothermes (haut) et lignes de courant (bas) pour $Pl=0.02$, $Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	132
Figure 2	Profils de température dans les plan médians vertical (gauche) et horizontal (droite) pour différentes valeurs de l'émissivité, $Pl=0.02$, $Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	132
Figure3	Profils des composantes horizontale (gauche) et verticale (droite) de vitesse dans les plans médians pour différentes valeurs de l'émissivité, $Pl=0.02$, $Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	133
Figure 4	Effet de l'émissivité sur les nombres de Nusselt locaux convectif (gauche) et radiatif (droite) pour $Pl=0.02$, $Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	133
Figure 5	Effet de l'émissivité sur le nombre de Nusselt local total pour $Pl=0.02$,	133

	$Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	
Figure 6	Profils des Nusselt moyens convectif, radiatif et total pour $Pl=0.02$, $Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	134
Figure 7	Lignes de courant (haut) et isothermes (bas) pour $Pl=0.02$, $Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	135
Figure 8	Profils de température dans les plans médians horizontal (gauche) et vertical (droite) pour différentes valeurs de l'émissivité, $Pl=0.02$, $Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	135
Figure 9	Profils des composantes horizontale (gauche) et verticale (droite) de vitesse dans les plans médians pour différentes valeurs de l'émissivité, $Pl=0.02$, $Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	135
Figure 10	Effet de l'émissivité sur les nombres de Nusselt locaux convectif (gauche) et radiatif (droite) pour $Pl=0.02$, $Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	136
Figure 11	Effet de l'émissivité sur le nombre de Nusselt local total pour $Pl=0.02$, $Ra=5.10^6$ et $\varepsilon_b=0.6$	136
Figure 12	Isothermes (haut) et lignes de courant (bas) pour $Pl=0.02$, $\varepsilon_b = 0.6$ et $Ra=5.10^6$	137
Figure 13	Profils de température dans les plan médians horizontal (gauche) et vertical (droite) dans les plan médians pour $Pl=0.02$ et $Ra=5.10^6$	138
Figure 14	Profils des composantes horizontale (gauche) et verticale (droite) de vitesse dans les plan médians pour $Pl=0.02$ et $Ra=5.10^6$	138
Figure 15	Profils du nombre de Nusselt convectif local sur les parois chaude (gauche) et froide (droite) pour $Pl=0.02$ et $Ra=5.10^6$	138
Figure 16	Lignes de courant (haut) et isothermes (bas) dans la cavité avec parois complètement noires pour $Pl = 0.02$, $Ra = 5.10^6$ et $\varepsilon_b = 0.6$	140
Figure 17	Profils de température dans les plan médians horizontal (gauche) et vertical (droite) pour $Pl = 0.02$ et $Ra = 5.10^6$	140
Figure 18	Profils des composantes horizontale (gauche) et verticale (droite) de vitesse dans les plans médians pour $Pl = 0.02$ et $Ra = 5.10^6$	140
Figure 19	Profils de Nusselt convectif local sur les parois chaude (gauche) et froide (droite) pour $Pl = 0.02$ et $Ra = 5.10^6$	141
Figure 20	Profils de Nusselt radiatif local sur les parois chaude (gauche) et froide (froide) pour $Pl = 0.02$ et $Ra = 5.10^6$	141
Figure 21	Profils de Nusselt total local sur les parois chaude (gauche) et froide (droite) pour $Pl = 0.02$ et $Ra = 5.10^6$	142
Figure 22	Profils des nombres de Nusselt convectif, radiatif et total moyens sur la paroi chaude pour $Pl = 0.02$ et $Ra = 5.10^6$	142

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Pages
Chapitre 2		
Tableau 1	Coefficients et termes de source des équations du modèle LMN.....	32
Tableau 2	Expression des coefficients convectifs.....	35
Tableau 3	Expression des coefficients convectifs.....	36
Tableau 4	Fonction $A([P])$ pour différents schémas numériques.....	39
Chapitre 3		
Tableau 1	Les trois premiers ordres de la quadrature S_N	67
Chapitre 4		
Tableau 1	Nombres de Nusselt moyens total et radiatif sur la paroi chaude ($Ra=5.10^6$, $\tau = 1$, $Pl=0.1$).....	81
Tableau 2	Nombre de Nusselt moyen.....	81
Tableau 3	Nombre de Nusselt radiatif sur la paroi chaude de la cavité ($Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$, $\theta_0 = 1.5$)	82
Tableau 4	Nombre de Nusselt total sur la paroi chaude de la cavité ($Ra = 5.10^6$ et $\tau = 1$, $\theta_0 = 1.5$)	82
Chapitre 5		
Tableau 1	Nombre de Nusselt moyen	98
Tableau 2	Nombres de Nusselt radiatif et total sur la paroi chaude ($S_4, \theta_0 = 1.5$)	98
Tableau 3	Variation des propriétés thermophysiques en fonction de ΔT pour $\tau = 0.2$	117
Tableau 4	Variation des propriétés thermophysiques en fonction de ΔT pour $\tau = 1$.	118
Tableau 5	Variation des propriétés thermophysiques en fonction de ΔT pour $\tau = 5$..	118
Tableau 6	Variation des nombres de Nusselt moyens total et radiatif en fonction de ΔT pour $\tau = 0.2$	118
Tableau 7	Variation des nombres de Nusselt moyens total et radiatif en fonction de ΔT pour $\tau = 1$	118
Tableau 8	Variation des nombres de Nusselt moyens total et radiatif en fonction de ΔT pour $\tau = 5$	119
Chapitre 6		
Tableau 1	Nombres de Nusselt moyens sur la paroi chaude pour $Pl=0.02$, $\varepsilon_b = 0.6$ et $Ra = 5.10^6$	143

NOMENCLATURE

Liste des Symboles

C_p	capacité thermique à pression constante, [J. Kg ⁻¹ . K ⁻¹]
C_v	capacité thermique à volume constant, [J. Kg ⁻¹ . K ⁻¹]
g	accélération de la pesanteur, [m.s ⁻²]
H	hauteur de la cavité, [m]
K	conductivité thermique, [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
k_a	coefficient d'absorption, [m ⁻¹]
L	luminance adimensionnel [-]
L_b	luminance du corps noir [W.m ⁻² .sr ⁻¹]
Nu	nombre de Nusselt [-]
P	pression adimensionnel [-]
Pl	nombre de Planck [-]
Pr	nombre Prandtl, [-]
S_R	terme source radiatif, W/m ³
Q_{inc}	flux radiatif incident adimensionnel [-]
$\bar{P}$	pression thermodynamique moyenne [Pa]
p'	Pression dynamique perturbée [Pa]
P_0	pression de référence [Pa]
q_r	flux radiatif, [W.m ⁻²]
Q_r	flux radiatif adimensionnel, [-]
Ra	nombre de Rayleigh, [-]
t	temps adimensionnel [-]
T	température adimensionnelle, [-]
T_0	température de référence, $T_0 = (T_c + T_f) / 2$ [K]
u, v	composantes de la vitesse, [m.s ⁻¹]
U, V	composantes adimensionnelles de la vitesse [-]
V_0	vitesse de référence, [m.s ⁻¹]
x, y	coordonnées cartésiennes, [m]
X, Y	coordonnées cartésiennes adimensionnelles [-]

Symboles Grecques

α	diffusivité thermique, $[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$, $\alpha = \frac{K}{\rho C_p}$
β	coefficient de dilatation thermique, $[\text{K}^{-1}]$
ΔT	différence de température, $\Delta T = T_c - T_f$, $[\text{K}]$
ε	émissivité
ε_b	paramètre de Boussinesq, $\varepsilon_b = \frac{\Delta T}{2T_0}$
γ	rapport des capacités thermiques, $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$
τ	épaisseur optique $\tau = Hk_a$
μ_m, η_m, ξ_m	cosinus directeurs
μ	viscosité dynamique, $[\text{Kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$
ν	viscosité cinématique, $[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
ρ	densité, $[\text{Kg}.\text{m}^{-3}]$
σ	constante de Stefan–Boltzmann, $[\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-4}]$
π	pression adimensionnelle, $\pi = \frac{P - \bar{P} + \rho_0 g z}{\rho_0 V_0^2}$
θ_0	température de référence , $\theta_0 = T_0 - \Delta T$
ω	Albédo
$\vec{S}$	vecteur direction, $\vec{S} = \mu \vec{i} + \eta \vec{j}$

Indices et Acronymes

moy	valeur moyenne
BS	Boussinesq
c	chaud
CV	convectif
f	froid
PC	propriétés constantes
PV	propriétés variables
max	valeur maximale
min	valeur minimale
R	radiatif
T	total
p	parois
0	état de référence
	paramètres adimensionnels

Résumé : Le but de ce travail est d'étudier numériquement le couplage de la convection naturelle avec le rayonnement dans un milieu semi-transparent sous l'approximation faible nombre de Mach. La configuration géométrique utilisée est une cavité carrée dont les deux parois horizontales sont adiabatiques et les deux parois verticales sont différentiellement chauffées. L'étude a été effectuée par des simulations directes en utilisant un code numérique bidimensionnel basé sur la technique des volumes finis pour les équations généralisées de Navier-Stokes et le problème radiatif est résolu par la méthode des ordonnées discrètes. Le code numérique est validé par la comparaison avec des travaux de la littérature dans les deux approximations Boussinesq et hors Boussinesq. Les résultats obtenus montrent particulièrement que pour des larges gradients thermiques l'approximation de Boussinesq n'est plus applicable, que la variation des propriétés physiques du fluide en fonction de la température modifie l'échange thermique et le régime dynamique de l'écoulement, et que le rayonnement volumique modifie considérablement les propriétés thermiques et dynamiques de l'écoulement.

Mot clés : convection naturelle, rayonnement volumique, couplage, épaisseur optique, semi-transparent, faible nombre de Mach, Boussinesq, volumes finis, ordonnées discrètes.

Abstract: The aim of this work is to investigate numerically the coupling of natural convection with radiation in a semi-transparent medium under the low Mach number approximation. The geometric configuration used is a square cavity whose two horizontal walls are adiabatic and the two vertical walls are differentially heated. The study was carried out by direct simulations using a two-dimensional numerical code based on the finite volume technique for the Navier-Stokes equations and the radiative problem is solved by the discrete ordinate method. The numerical code is validated by the comparison with works of literature in both Boussinesq and LMN approximations. The results obtained show in particular that for large thermal gradients the Boussinesq approximation is no longer applicable, the variation of the physical properties of the fluid as a function of the temperature modifies the heat exchange and the dynamic regime of the flow, and the volume radiation modifies significantly the thermal and dynamic properties of the flow.

Keywords: natural convection, volume radiation, coupling, optical thickness, semi-transparent, low Mach number, Boussinesq, finite volumes, discrete ordinates.

ملخص: الهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة عددية لاقتران الحمل الحراري الطبيعي بالإشعاع في وسط شبه شفاف خارج إطار فرضية بوسيناسك (Boussinesq). والهدف هنا هو الأخذ في الاعتبار تغيرات درجات الحرارة الكبيرة في اختيار ما يسمى بنماذج ماك المنخفضة LMN التي تمكن من الاستغناء عن فرضية (Boussinesq). التكوين الهندسي المستخدم هو عبارة عن تجويف مربع له جداران أفقيان ثابتان ويتم تسخين الجدارين الرأسيين بشكل تفاضلي. أجريت الدراسة بواسطة المحاكاة المباشرة باستخدام كود عددي ثنائي الأبعاد يعتمد على تقنية الحجم المحدود للمعادلات المعممة Navier-Stokes وتم حل المشكلة الإشعاعية بطريقة التصريفات المنفصلة ordonnées discrètes. يتم التحقق من صحة الرمز العددي من خلال المقارنة مع أعمال الأدب في التقريرين Boussinesq وخارج Boussinesq. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها بشكل خاص أنه بالنسبة للتدرجات الحرارية الكبيرة لم يعد التقريب Boussinesq قابلاً للتطبيق، وأن تغير الخواص الفيزيائية للسائل كدالة لدرجة الحرارة يعدل التبادل الحراري والنظام الديناميكي للتدفق، وأن الإشعاع الحجمي يعدل الخصائص الحرارية والدينامية للتدفق.

الكلمات المفتاحية: الحمل الحراري الطبيعي، الإشعاع الحجمي، الاقتران، السماكة البصرية، شبه شفافة، عدد الماخ المنخفض، Boussinesq، الأحجام المتناهية، التصريفات المنفصلة.