

**Contribution à la simulation numérique des transferts de  
chaleur par conduction, rayonnement et convection  
thermosolutale dans des cavités**

Najma Laaroussi

► **To cite this version:**

Najma Laaroussi. Contribution à la simulation numérique des transferts de chaleur par conduction, rayonnement et convection thermosolutale dans des cavités. Autre [cond-mat.other]. Université Paris-Est, 2008. Français. NNT : 2008PEST0219 . tel-00345711v3

**HAL Id: tel-00345711**

**<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00345711v3>**

Submitted on 24 Apr 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université PARIS-EST  
U.F.R Sciences de la matière

THÈSE  
pour obtenir le grade de  
Docteur de l'Université PARIS-EST

Spécialité : Energétique et Génie des Procédés  
Ecole doctorale : Information, Communication, Modélisation, Simulation (ED n°431)

présentée et soutenue publiquement par

Najma LAAROUSSI

le 30 juin 2008

***Contribution à la simulation numérique des transferts de  
chaleur par conduction, rayonnement et convection  
thermosolutale dans des cavités.***

Membres du jury :

G. Bonnet	Professeur	Univ. Marne la Vallée	Examineur
B. Guerrier	Dir. de recherche	CNRS	Rapporteur
F. Monchoux	Professeur	Univ. Toulouse	Examineur
G. Lauriat	Professeur	Univ. Marne la Vallée	Directeur de thèse
F. Penot	Dir. de recherche	CNRS	Rapporteur
X. Nicolas	M. de conférence	Univ. Marne la Vallée	Invité



---

***Contribution à la simulation numérique des transferts de chaleur par conduction, rayonnement et convection thermosolutale dans des cavités.***

**Résumé :** L'objectif de cette thèse est de contribuer à la simulation numérique des transferts de chaleur par conduction dans les parois, par rayonnement et par convection thermosolutale dans des cavités fermées ou dans des conduites. Dans la plupart des cas pratiques, les trois modes de transfert de chaleur sont fortement couplés lorsque le fluide en mouvement est un mélange de gaz.

Le transfert de chaleur par convection naturelle associé à la condensation surfacique dans une cavité à deux dimensions, remplie d'air humide a été étudié numériquement. Les parois verticales, d'épaisseur finie, sont en contact avec une ambiance extérieure froide. La modélisation faiblement compressible permet à la fois de tenir compte de la diminution de la masse du mélange et de la pression thermodynamique. Les variations temporelles des champs de fonction de courant, pression, température et fractions massiques sont étudiées pour différentes conditions d'humidité initiale.

Egalement, une étude de la convection mixte associée à l'évaporation d'un film liquide ruisselant sur les deux parois d'un canal vertical a été menée. Les effets des forces d'Archimède thermique et solutale sur le développement de l'écoulement ont été montrés. Les résultats ont été obtenus en considérant que les propriétés du mélange sont constantes ou basées sur la règle d'un tiers. Deux mélanges binaires de gaz parfaits air-vapeur et air-hexane ont été considérés en vertu de diverses conditions aux limites.

**Mots clés** : couplage convection naturelle-rayonnement, convection thermosolutale, condensation, évaporation, condensation surfacique, cavité fermée, canal vertical.

---

***Contribution to the numerical simulation of heat transfer by conduction, radiation and thermosolutal convection in cavities .***

**Resume :** The purpose of this thesis is the contribution to the numerical simulation of heat transfer by conduction, radiation and thermosolutal convection in a closed cavity or in a vertical channel. In most practical cases, the three modes of heat transfer are strongly coupled when the fluid in motion is a mixture of gases.

Heat transfer by natural convection and surface condensation in two-dimensional enclosures in contact with a cold external ambient through a wall of finite thickness was studied numerically. Special attention was given on the modeling of the flow of a binary mixture consisting of humid air. Low-Mach number assumption was introduced in order to account for decreases in mixture mass and average pressure within the enclosure between the initial and steady states. The time-variations of the stream function, mean pressure, temperature and water vapor as a function of time according to various values of the initial relative humidity are studied.

Also, a numerical investigation was conducted to study mixed convection in a vertical channel with evaporation of thin liquid films on wetted walls. The effects of the thermal and solutal buoyancy forces on the flow field, heat and mass transfer are illustrated. Results were obtained both for variable and for constant properties using the one-third rule. Air-water vapor and air-hexane vapor mixtures, assumed as ideal gases, are considered under various boundary conditions.

**Keywords :** Coupled natural convection-radiation, thermosolutale convection, condensation, evaporation, surface condensation, closed cavity , vertical channel.

# Table des matières

<b>Préambule</b>	<b>1</b>
<b>I Partie I</b>	<b>3</b>
<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>1 Equations de conservation</b>	<b>11</b>
1.1 Modélisation . . . . .	11
1.1.1 Hypothèses . . . . .	11
1.1.2 Equations de conservation . . . . .	11
1.1.3 Approximation de Boussinesq . . . . .	12
1.1.4 Ecoulement à faible nombre de Mach . . . . .	13
1.2 Transfert radiatif . . . . .	14
1.2.1 Méthode des radiosités . . . . .	15
1.2.2 Les DOM ou méthode des ordonnées discrètes . . . . .	16
1.3 Condition aux limites : couplage rayonnement convection . . . . .	17
1.4 Résolution numérique . . . . .	18
1.4.1 Discrétisation des équations de conservation . . . . .	20
1.4.2 Schéma d'interpolation . . . . .	21
1.4.3 Schéma centré du second-ordre . . . . .	22
1.4.4 Schéma amont du second ordre . . . . .	23
1.4.5 Schéma QUICK . . . . .	24
1.4.6 Couplage vitesse-pression . . . . .	25
1.4.7 Résidus : Paramètre de contrôle de la convergence . . . . .	27
1.4.8 Sous-relaxation . . . . .	28
1.4.9 Termes sources . . . . .	28

---

1.5	Méthode numérique de résolution temporelle . . . . .	28
1.5.1	Résolution découplée implicite . . . . .	28
1.5.2	Résolution couplée-explicite . . . . .	31
1.5.3	Schéma temporel non-itératif (NITA) . . . . .	31
<b>2</b>	<b>Validation</b>	<b>33</b>
2.1	Validation du modèle Boussinesq en régime stationnaire . . . . .	33
2.1.1	Cavité carrée $A = 1$ . . . . .	33
2.1.2	Cavité rectangulaire $A > 1$ . . . . .	35
2.2	Convection naturelle dans une cavité cubique . . . . .	37
2.2.1	Étude de maillage . . . . .	37
2.2.2	Etude de la convection naturelle pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh . . . . .	38
2.3	Validation du modèle Boussinesq en régime transitoire . . . . .	40
2.3.1	Cavité carrée $A = 1$ . . . . .	40
2.3.2	Cavité rectangulaire . . . . .	42
2.4	Validation du modèle faible Mach . . . . .	45
2.4.1	Première validation . . . . .	45
	Maillage et options de calculs. . . . .	47
	Comparaisons des profils de vitesses adimensionnelles . . . . .	48
	Comparaisons des nombres de Nusselt . . . . .	52
2.4.2	Deuxième validation . . . . .	54
2.5	Ecoulement transitoire dans une cavité allongée . . . . .	62
2.5.1	Validation et résultats . . . . .	63
2.6	Couplage convection-rayonnement en géométrie 2D . . . . .	69
2.7	Validation du code : couplage convection-rayonnement en géométrie 3D . . . . .	74
2.7.1	Description de la configuration étudiée . . . . .	75
2.7.2	Conditions aux limites . . . . .	75
2.7.3	Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes : (S2S et DOM) . . . . .	76
2.7.4	Comparaison avec Colomer et al. [26] . . . . .	77

<b>3</b>	<b>Couplage conduction, convection naturelle et rayonnement surfacique dans des cavités</b>	<b>81</b>
3.1	Introduction . . . . .	81
3.2	Double vitrage . . . . .	84
3.2.1	Études paramétriques . . . . .	84
3.3	Cavité partitionnée . . . . .	88
3.3.1	Régime stationnaire . . . . .	88
3.3.2	Régime instationnaire . . . . .	92
3.3.3	Comparaison des résultats numériques et expérimentaux [43] . . . . .	95
3.4	Etude de la stratification thermique . . . . .	97
3.4.1	Cavité 2D remplie d'air différentiellement chauffée avec des parois horizontales adiabatiques . . . . .	97
3.4.2	Cavité 3D remplie d'air différentiellement chauffée avec des surfaces horizontales adiabatiques . . . . .	101
	Conditions aux limites . . . . .	102
	Influence du coefficient d'échange extérieur $h_{cv}$ sur les parois horizontales	103
3.4.3	Valeur de la stratification $S$ dans une cavité 3D . . . . .	107
	Variation du paramètre $S$ en fonction de la profondeur de la cavité $p$ . .	109
3.5	Structures alvéolaires : Couplage de la convection, du rayonnement et de la conduction . . . . .	110
3.5.1	Paramètres de calcul . . . . .	111
3.5.2	Etude de maillage pour une cellule de parpaing différentiellement chauffée	111
3.5.3	Etude de parpaing de 10 . . . . .	112
	Calcul du flux et des résistances thermiques pour différentes températures extérieures . . . . .	113
3.5.4	Transfert de chaleur dans un parpaing de 20 cm comportant deux cellules	117
<b>II</b>	<b>Partie II</b>	<b>121</b>
<b>4</b>	<b>Transfert de matière et de chaleur dans une cavité fermée : étude de la condensation surfacique</b>	<b>125</b>
	<b>Introduction</b>	<b>125</b>
4.1	Condensation dans une cavité remplie d'air humide . . . . .	127
4.1.1	Modélisation . . . . .	127



4.1.2	Conditions aux limites . . . . .	128
4.1.3	Termes sources . . . . .	130
4.2	Condensation dans une cavité fermée . . . . .	130
4.2.1	Tests de validation : calcul de la masse condensée . . . . .	130
4.2.2	Résolution numérique . . . . .	131
4.2.3	Résultats . . . . .	133
4.2.4	Calculs des chaleurs latente et sensible . . . . .	135
	Cavité fermée remplie d'air sec . . . . .	138
	Cavité fermée remplie d'air humide . . . . .	140
4.2.5	Cavité différentiellement chauffée avec une seule paroi conductrice . . . . .	147
4.2.6	Influence de la variation de l'humidité relative initiale. . . . .	149
4.2.7	Influence de la variation du coefficient d'échange externe $h_{cv}$ . . . . .	157
<b>III</b>	<b>Partie III</b>	<b>163</b>
<b>5</b>	<b>Convection mixte dans une conduite plane verticale : Influence des transferts de matière sur les parois</b>	<b>167</b>
	<b>Introduction</b>	<b>167</b>
5.1	<b>Modélisation</b> . . . . .	171
5.1.1	Hypothèses . . . . .	171
5.1.2	Equations de conservation . . . . .	172
	Conditions aux limites . . . . .	174
	Grandeurs calculées . . . . .	175
5.1.3	Equations de conservation sous l'approximation de Boussinesq . . . . .	177
	Grandeurs de référence . . . . .	178
5.2	Méthode de résolution numérique. . . . .	179
5.2.1	Etude de maillage . . . . .	179
5.3	Comparaison avec des résultats publiés par Azizi et al.[85] . . . . .	181
5.3.1	Hypothèses communes aux deux études . . . . .	182
	Comparaison . . . . .	182
5.4	Evaporation de la vapeur d'eau . . . . .	184
5.4.1	Evaporation de la vapeur d'eau dans l'air en convection mixte . . . . .	185
	Convection solutale : $T_p = T_0$ . . . . .	185

---

Convection Thermosolutale : $\Delta T = 20, 2K$ . . . . .	191
5.5 Evaporation de l'hexane . . . . .	195
5.5.1 Evaporation de l'hexane dans l'air en convection mixte . . . . .	195
Propriétés physiques du mélange air-hexane à pression atmosphérique .	195
Convection solutale : $T_p = T_0$ . . . . .	196
Convection thermosolutale : $\Delta T = 45K$ . . . . .	200
Influence de la variation des propriétés thermophysiques du mélange . .	201
<b>Conclusions et Perspectives</b>	<b>207</b>
<b>Annexes</b>	<b>211</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>231</b>
<b>Publications</b>	<b>238</b>



# Bibliographie

-



# Bibliographie

- [1] A.Rubel, F. Landis, Numerical study of natural convection in a vertical rectangular enclosure, *Phys. Fluids Suppl. II*, V.12-II, pp : 208-213, (1969).
- [2] G.D. Mallinson, G. de Vahl Davis, Three-dimensional natural convection in a box : a Numerical Study *J. Fluid Mech*, Vol.83, part1, pp : 1-31 (1977).
- [3] M.P.Fraikin, J.J.Portier and C.J.Fraikin CJ, Application of  $k - \epsilon$  turbulence. model to enclosed buoyancy-driven recirculating flow, *Chem. Eng. Comm*, Vol.13, pp : 289-314, (1982).
- [4] S.Xin, P.LE QUERE, Linear stability analyses of natural convection flows in a differentially heated square cavity with conducting horizontal walls, *Phys. Fluids*, Vol.13, N°.9, pp : 2529-2542, (2001).
- [5] A.Soufiani, F.Andre, J.Taine, A fictitious-gas based statistical narrow-band model for IR long-range sensing of H<sub>2</sub>O at high temperature, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol.73, pp : 339-347, (2002).
- [6] , E.Sediki, A.Soufiani and M.S.Sifaoui Combined gas radiation and laminar mixed convection in vertical circular tubes, *Int.Journal of Heat and Fluid Flow*, Vl. 24, N°.5, pp : 736-746, (2003).
- [7] , S. Meftah, D. Lemonnier, A. Benbrik, A. Mezrhab, Etude numérique de la convection naturelle de double diffusion dans un mélange air-CO<sub>2</sub>, *SFT 2007*, Ile des Embiez, 29 Mai, pp : 619-624, (2008).
- [8] Fluent 6.2.16 User's Guide (n.d.), [www.fluentusers.com](http://www.fluentusers.com).
- [9] N.Laaroussi, G.Lauriat, X.Nicolas, Etude Numérique des Transferts de Chaleur Couplés dans une Paroi Alvéolaire, *Journée Internationales de Thermique JITH*, 15-17 Novembre, Tanger, Maroc, 251-254, (2005).
- [10] J.M. Mihaljan. A rigorous exposition of the Boussinesq approximation applicable to a thin layer of fluid. *Astrophys.J*, Vl. 136, pp : 1126-1133, (1962).
- [11] A. Gray, D. Giorgini, The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases. *Int.J.Heat and Mass Transfer*, Vol. 19, pp : 545-551, (1976).
- [12] R. Siegel, J.R. Howell , *Thermal radiation heat transfer*, Mc Graw-Hill Book Company, second edition, New York, (1992).
- [13] S. Chandrasekhar. *Radiative transfer*. Clarendon Press, (1950).
- [14] B.G. Carlson and K.D. Lathrop. Transport theory - The Method of Discrete Ordinates. in : *Computing in reactor physics*, *Ed. Gordon and Breach*, (1968).

- [15] W.A. Fiveland. Three-Dimensional radiative heat transfer solutions by the Discrete Ordinates Method. *Journal of Thermophysics*, V.l. 2, N<sup>o</sup>. 4, pp : 309-316, 1988.
- [16] S. V. Patankar, Numerical Heat and Fluid Flow, London, Mc Graw Hill, (1980).
- [17] B.E. Launder, W.C. Reynolds, W. Rodi et al., Turbulence Models and their Applications, Vol.2, Paris : Eyrolles (1984).
- [18] H.B. Awbi, Ventilation of Buildings, London : E & FN Spon (1991) ISBN(1-883413-88-5).
- [19] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, An introduction to computational Fluid Dynamics, Essex : Longman Scientific & Technical, (1995) (ISBN.0-582-21884-5)
- [20] J. Van Doormaal et G. Raithby, Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows, Num. Heat Transfer, Vol.7, pp :147-163, (1984).
- [21] R.I. Issa, Solution of implicitly discretised fluid flow equations by operator splitting, J. Comput. Phys, Vol.62, pp : 40-65 (1986).
- [22] A.Lankhorst, Laminar and turbulent natural convection in cavities, Numerical Modelling and Experimental Validation, These, (1991).
- [23] M.R.Warren, P.H.James, I.C.Young, Handbook of Heat Transfer, MacGraw-Hill Handbooks, Third Edition, (1998).
- [24] Y. Le Peutrec et G. Lauriat, Effects of the heat transfert at the side walls on natural convection in cavities, Trans *ASME J. Heat Tranfert*, Vol. 112, pp : 370-378, (1990).
- [25] T. Fusegi, J. Min. Hyun, Laminar and transitional natural convection in an enclosure with complex and realistic conditions, *Int. J. Heat Fluid Flow*, V. 15, N<sup>o</sup>.4, pp : 258-268, (1994).
- [26] G. Colomer, M. Costa, R. Consul, Three-dimensional numerical simulation and radiation in a differentially heated cavity using the discrete ordinates method, *Int. J. Heat Fluids Flow*, V.47, N<sup>o</sup>.1, pp : 257-269, (2004).
- [27] S.W. Armfield, J.C. Patterson, Wave proprties of natural convection boundary layers, J. Fluid. Mech, Vol.239, pp : 195-212, (1992).
- [28] J.M.Hyun, J.W.Lee, Numerical solutions for transient natural convection in a square cavity with different sidewall temperatures, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.10, N<sup>o</sup>.2, pp : 146-151, (1989)
- [29] G. Lauriat, I. Altimir, A new formulation of the method for the prediction of natural convection flows in cavities, *Computers and Fluid*, Vol.13, N<sup>o</sup>.2,pp : 141-155, (1985)
- [30] S.W. Armfield, J.C. Paterson, Direct simulation of wave interactions in unsteady natural convection in a cavity, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.34, No.45,pp : 929-940,(1991).
- [31] J.C. Patterson, S.W. Armfield, Transient features of natural convection in a cavity, J. Fluid. Mech, Vol.219, pp : 469-497, (1990).
- [32] G. Lauriat, Accurate solutions of natural convection flows in square cavity at high Rayleigh numbers with a cubic spline approximation. ASME Winter Annual Meet, 82-WA/HT-71, Phonix,pp : 1-10. (1982).
- [33] J.C. Patterson, J. Imberger, Unsteady convection in a rectangular Cavity, J. Fluid Mech, Vol.100, part.1, pp : 65-86. (1980).
- [34] P. Le Quéré, T. Alziary de Roquefort, Transition to unsteady natural convection of air in differentially heated cavities, American Society of Mechanical Engineering, Heat Transfer Division, Vol. 60 pp : 29-36, (1986).

- [35] O. Touazi, Etude numérique d'un schéma de volumes finis sur des maillages non structurés pour des écoulements de fluide visqueux à densité constante ou faiblement variable, Thèse de Doctorat, université de Marne-La-Vallée, (2006).
- [36] P. Le Quéré, C. Weisman, H. Paillère, J. Vierendeels, E. Dick, R. Becker, M. Braack and J. Locke, Modelling of natural convection flows with large temperature differences : A Benchmark problem for low Mach number solves. Part 1. Reference solutions , ESAIM : Mathematical Modelling and Numerical Analysis , vol. 39, N° . 3, pp : 609-616, (2005)
- [37] P. Le Quéré, C. Weisman, H. Paillère, J. Vierendeels, E. Dick, R. Becker, M. Braack and J. Locke, Modelling of natural convection flows with large temperature differences : A Benchmark problem for low Mach number solves. Part 2. Contributions to the june 2004 Conference , ESAIM : Mathematical Modelling and Numerical Analysis , vol. 39, N° . 3, pp : 617-621, (2005)
- [38] F. Xu, J.C. Patterson, Ch. Lei, Shadowgraph observations of transition of the thermal boundary layer in side-heated cavity, *Exp. Fluids*, Vol.38, pp : 770-779, (2005a).
- [39] F. Xu, J.C. Patterson, Ch. Lei, Transient of thermal boundary layer in adifferntially heated cavity to adouble-layer structure, James Cook University, Australia, (2005b).
- [40] J.C. Patterson, T. Graham, W. Schöpf, S.W. Armfield, Boundry layer developement on a semi-infinite suddenly heated vertical plate. *J. Fluid. Mech*, Vol.219, pp : 467-497(2002).
- [41] H. Wang, S. Xin, P. Le Quéré, Etude numérique du couplage de la convection naturelle avec le rayonnement de surface en cavité carrée remplie d'air. *C. R. Mecanique*, Vol.334, pp : 48-57, (2005).
- [42] F. Ordones. Simulation Numérique de transfert couplés convection naturel-rayonnement dans une cavité : application à une paroi de parpaing soumise au feu. *Rapport du DEA TES*. Université de Marne la vallée, 2004.
- [43] V. Sambou, Transferts thermiques instationnaires : vers une optimisation de parois de bâtiments, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, (2008)
- [44] A. Benkhelifa, "Contribution à l'études expérimentales des bifurcations de convection naturelle dans une cavité en air différentiellement chauffée : Influence de l'inclinaison", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, (2006).
- [45] J. Salat Contribution à l'étude de la convection naturelle tridimensionnelle en cavité différentiellement chauffée. PhD Thesis. Université de Poitiers. Poitiers, (2004).
- [46] Réglementation RT2000, Règles Th-Bât, CSTB.
- [47] A. Bejan, *Convection Heat Transfert*, second edition, Wiley, (1996).
- [48] S. Xin, P. Le Quéré, "Direct numerical simulation of two dimensional chaotic natural convection in a differentially heated cavity of aspect ratio 4", *J. Fluid. Mech*, Vol.304, pp : 87-118, (1995)
- [49] P.D. Weidman, Convection regime flow in a vertical slot : continuum of solutions from capped to open ends, *Heat and Mass Transfer*, Vol.43, N° .2, pp : 103-109, (2006).
- [50] ERG. Eckert, WO. Carlson, Natural convection in an air layer enclosed between two vertical plates with different temperature, *Int. J. Heat Mass Transfer*, N° :2, pp : 106-120, (1961).
- [51] S. Xin, Etudes numériques de la convection naturelle en cavité et de problèmes connexes, Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Université de Paris Sud, (2005).



- [52] Règles Th-U, fascicule 4/5, calcul de caractéristiques thermiques des parois opaques, CSTB.
- [53] B. Gebhart, Y. Jaluria, R.L. Mahajan, B. Sammakia, Buoyancy-Induced Flows and Transport, Hemisphere Pub. Co., New-York, (1988).
- [54] A. Bejan, Convection Heat Transfer, Third edition, John Wiley and Sons, New York, (2005).
- [55] J.A. Weaver, R. Viskanta, Natural convection due to horizontal temperature and concentration gradients - 1. Variable thermophysical properties effects, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.34, N°.12, pp : 3107-3120, (1991).
- [56] J.A. Weaver, R. Viskanta, Natural convection due to horizontal temperature and concentration gradients - 2. Species interdiffusion, Soret and Dufour effects, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.34, N°.12, pp : 3121-3133, (1991).
- [57] M.M. Rahman, M.J. Lampinen, Numerical study of natural convection from a vertical surface due to combined buoyancies, Numer. Heat Transfer Part A, Vol.28, pp : 409-429, (1995).
- [58] J. Chang, T.F. Lin, Transient natural convection heat and mass transfer over a vertical plate of finite height, Numer. Heat Transfer Part A, Vol.21, pp : 187-214, (1992).
- [59] T.F. Lin, C.J. Chang, W.M. Yan, Analysis of combined buoyancy effects of thermal and mass diffusion on laminar forced convection heat transfer in a vertical tube, ASME J. Heat Transfer, Vol.110, pp : 337-344 (1988).
- [60] W.M. Yan, Y.L. Tsay, T.F. Lin, Simultaneous heat and mass transfer in laminar mixed convection flows between vertical parallel plates with asymmetric heating, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.10, N°.3, pp : 262-269,(1989).
- [61] K.T. Lee, H.L. Tsai, W.M. Yan, Mixed convection heat and mass transfer in vertical rectangular ducts, Int. J. Heat Mass transfer, Vol.40, N°.7, pp : 1621-1631, (1997).
- [62] G. Desrayaud, G. Lauriat, Heat and mass transfer analogy for condensation of humid air in a vertical channel, Heat and Mass Transfer, Vol.37, pp : 67-76, (2001).
- [63] W.M. Yan, T.F. Lin, C.J. Chang, Combined heat and mass transfer in natural convection between vertical parallel plates, Wärme und Stoffübertragung, Vol.23, pp : 69-76, (1988).
- [64] J.A. Weaver, R. Viskanta, Natural convection in binary gases due to horizontal thermal and solutal gradients, ASME J. Heat Transfer Vol.113, pp : 140-147, (1991).
- [65] P. Le Quéré, C. Weisman, H. Paillère, J. Vierendeels, E. Dick, R. Becker, M. Braack and J. Locke, Modelling of natural convection flows with large temperature differences : A Benchmark problem for low Mach number solves. Part 1. Reference solutions , ESAIM : Mathematical Modelling and Numerical Analysis , vol. 39, N°.3, pp : 609-616, (2005)
- [66] W.G.Reynolds, Thermodynamic properties in SI : graphs, tables and computational equation for forty substances, "Dept of Mechanical Engineering stanford University", (1979).
- [67] T. Fujii, Y. Kato, K. Mihara, Expressions of transport and thermodynamic properties of air, steam and water, Sei San Ka Gaku Ken Kyu Jo, Report No. 66, Kyu Shu University, Kyu Shu, Japan (1977)
- [68] E.V. Somers, Theoretical considerations of combined thermal and mass transfer from a vertical plate, J. Appl. Mech, Vol.23, pp : 295-301, (1956).

- [69] H. Nakamura, Bull. Japan Soc. Mech. Engrs 5 (1962) 311
- [70] L.C. Chow, J.N. Chung, Evaporation of water into a laminar stream of air and superheated steam, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.26, pp : 373-380, (1983).
- [71] E.M. Sparrow, J.L. Gregg, The variable fluid-property problem in free convection, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, Vol. 80, pp : 879-886, (1958).
- [72] M. Haji, L.C. Chow, Experimental measurement of water evaporation rates into air and superheated steam, ASME J. Heat Transfer, Vol.110 ,pp : 237-242, (1988).
- [73] T.S. Lee, P.G. Parikh, A. Acrivos, D. Bershader, Natural convection in a vertical channel with opposing buoyancy forces, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.25 , pp : 499-511, (1982).
- [74] C.J. Chang, T.F. Lin, W.M. Yan, Natural convection flows in a vertical, open tube resulting from combined buoyancy effects on thermal and mass diffusion, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.29, pp : 1543-1552, (1986).
- [75] W.M. Yan, T.F. Lin, Effects of wetted wall on laminar mixed convection in a vertical channel, J. Thermophysics, Vol.3, pp : 94-96, (1989).
- [76] W.M. Yan, Mixed convection heat transfer enhancement through latent heat transport in vertical parallel plate channel flows, Can. J Chem. Eng. Vl.69, pp : 1277-1282, (1991).
- [77] Y.L. Tsay, T.F. Lin, Combined heat and mass transfer in laminar gas stream flowing over an evaporating liquid film, Wärme und Stoffübertragung, Vol.25, pp : 221-213, (1990).
- [78] W.M. Yan, T.F. Lin, Combined heat and mass transfer in natural convection between vertical plates with film evaporation, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.33, pp : 529-541, (1990).
- [79] W.M Yan, The effect of liquid film vaporization on natural convection heat and mass transfer in a vertical tube, Canadian journal of chemical engineering (Can. j. chem. eng.), vol.70, No.3, pp : 452-462 (1992).
- [80] W.M. Yan, Effects of film evaporation on laminar mixed convection heat and mass transfer in a vertical channel, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.35, pp : 3419-3429, (1992).
- [81] J.H. Jang, W.M. Yan, Thermal protection with liquid film in turbulent mixed convection channel flows, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.49, pp : 3645-3654, (2006).
- [82] J.H. Jang, W.M. Yan, C.C. Huang, Mixed convection heat transfer enhancement through film evaporation in inclined square ducts, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.48, pp : 2117-2125, (2005).
- [83] C.C. Huang, W.M. Yan, J.H. Jang, Laminar mixed convection heat and mass transfer in vertical rectangular ducts with film evaporation and condensation, Int. J. Heat Mass Transfer Vol.48, pp : 1772-1784, (2005).
- [84] Z.A. Hammou, B. Benhamou, N. Galanis, J. Orfi, Laminar mixed convection of humid air in a vertical channel with evaporation or condensation at the wall, Int. J. Thermal Sciences, Vol.43, pp : 531-539, 2004).
- [85] Y. Azizi, B. Benhamou, N. Galanis, M.Ganaoui, Buoyancy effects on upward and downward laminar mixed convection heat and mass transfer in a vertical channel, Int.J.of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, Vol.17, N°3, pp : 333-353, (2007).
- [86] R.Lide.David, Henry.V.Kehiaian, "CRC HANDBOOK of Thermophysical and Thermochemical Data", (1994).
- [87] R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, Transport Phenomena, Wiley, New York, (1960)

**PUBLICATIONS et COMMUNICATIONS**

---

- ||1| N.LAAROUSSI, G.LAURIAT, *Conjugate Thermosolutal Convection and Condensation of Humid Air in Cavities*, International Journal of Thermal Science, doi : 10.1016/j.ijthermalsci.2007.12.014 (2008).
- ||2| N.LAAROUSSI, G.LAURIAT, G.DESRAYAUD , *Effects of variable density for film evaporation on laminar mixed convection in a vertical channel*, International Journal of Heat and Mass Transfer, doi : 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2008.05.22 (2008).
- ||3| G.DESRAYAUD, R.BENNACER, J.P.CALTAGIRONE, E.CHENIER, A.JOULIN, N.LAAROUSSI, K.MOJTABI , *Étude Numérique Comparative des Écoulements Thermoconvectifs dans un Canal Vertical Chauffée Asymétriquement*, VII ème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, 28-30 Mai 2007, Montréal.
- ||4| N.LAAROUSSI, G.LAURIAT, G.DESRAYAUD , *numerical simulation of mixed convection with film evaporation in a vertical channel*, Proceedings of 5th European Thermal-Sciences Conference, 18-22 May 2008, Eindhoven, the Netherlands, CPC-1, ABSTRACT p :95.
- ||5| N.LAAROUSSI, G.LAURIAT, *Numerical Simulation of Natural Convection and Condensation of Humid Air In a Partitioned Enclosure*, Proceedings of CHT-08 ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, May 11-16, 2008, Marrakech, Morocco, CHT-08-382, ABSTRACT p :132
- ||6| N.LAAROUSSI, G.LAURIAT, *Condensation dans une Cavité Remplie d'air Humide* , Congrès Français de Thermique, SFT 2007, Les Embiez, p : 613-618.
- ||7| N.LAAROUSSI, G.LAURIAT, *Etude Numérique des Transferts de Chaleur dans des Structures Alvéolaires en Régime stationnaire et Transitoire*, Revue Internationale d'Héliotechnique, Énergie-Environnement, N° 36, Edité par la COMPLES : Coopération Méditerranéenne pour l'Energie Solaire, 2006, p : 14-15.
- ||8| N.LAAROUSSI, G.LAURIAT, E.CHENIER, *Convection Thermique et Massique en Régime Instationnaire dans Une Cavité Ventilée*, Congrès Français de Thermique, SFT 2005, Reims, p : 185-190.
- ||9| N.LAAROUSSI, G.LAURIAT, X.NICOLAS, *Etude Numérique des Transferts de Chaleur Couplés dans une Paroi Alvéolaire*, Journée Internationales de Thermique JITH, 15-17 Novembre, 2005, Tanger, Maroc, p : 251-254