

ECHAHID HAMMA LAKHDAR UNIVERSITY - EL-OUED
Under the Supervision of the DGRSDT and in collaboration with the CRTI
International Pluridisciplinary PhD Meeting (IPPM'20)
1st Edition, February 23-26, 2020
Theme: Etude du couplage de la convection naturelle et du rayonnement thermique
dans une cavité verticale à grand facteur de forme

Imène Rahmoune* et SaadiBougoul**
Laboratoire de Physique Energétique Appliquée (LPEA)
Département de Physique, Faculté des Sciences de la Matière, Université de Batna 1, 05000 Batna, Algérie
E-mail: saadi.bougoul@univ-batna.dz, imene.rahmoune@univ-batna.dz

Résumé

Une étude de simulation numérique de la convection naturelle turbulente couplée au rayonnement thermique dans une cavité verticale différentiellement chauffée et remplie de l'air supposé comme fluide transparent a été réalisée. La cavité a un facteur de forme important, les parois verticales sont soumises à des températures constantes tandis que les parois horizontales sont supposées adiabatiques. L'écoulement à l'intérieur de la cavité est turbulent et la turbulence a été modélisée en utilisant le modèle $K-\varepsilon$. Pour tenir compte du transfert radiatif, le modèle des ordonnées discrètes (DO) a été introduit. Pour résoudre les différentes équations, on a fait appel au logiciel de calcul Ansys-Fluent basé sur la méthode des volumes finis.

Les résultats numériques obtenus pour des valeurs du nombre de Rayleigh de 10^9 , 10^{10} et 10^{11} ont été validés par certains résultats existants dans la théorie. On constate que le rayonnement thermique a une influence significative sur les parois horizontales ou l'écoulement devient renforcé, ainsi, il accélère l'écoulement à l'intérieur de la cavité et donne formation d'une deuxième zone caractérisée par des gradients de vitesse et de température et qui relie toutes les parois.

Mots clés : Convection, turbulence, cavité, CFD, rayonnement thermique.

1. Introduction

Les écoulements de la convection naturelle turbulente au sein des cavités différentiellement chauffées, sont généralement engendrés par les forces d'Archimède qui sont dues à la présence des gradients de température causés par une différence de densités. L'étude de ces écoulements est très importante sur le plan fondamental (connaissance du phénomène physique mis en jeu) et sur le plan d'applications industrielles (refroidissement des composants électroniques, capteurs solaires,...), donc ils ont été l'objet de plusieurs études de recherches numériques et expérimentales. Dans la majorité des travaux de recherche réalisés dans ce domaine, on tient compte uniquement de la convection naturelle et on néglige son couplage au rayonnement thermique qui a un effet très significatif sur ce genre d'écoulement donc il faut en tenir compte. Parmi les études de recherche qui ont été réalisées dans ce domaine, on peut citer celles de Balaji et Venkateshan (1993) [1], Akimaya et Chong (1997) [2], Salat et Penot (2003) [3], ces auteurs ont étudié l'influence du rayonnement surfacique sur la convection naturelle en cavité. Colomer et al (2004) [4], ont traité numériquement le couplage convection-rayonnement dans une cavité carrée.

Dans cette étude, on s'intéresse à une étude de convection naturelle turbulente couplée au rayonnement thermique dans une cavité rectangulaire différentiellement chauffée et remplie d'air supposé comme fluide transparent. Le but est de voir l'effet du rayonnement thermique sur la structure de l'écoulement proche des parois et sur la stratification thermique au centre de la cavité pour différents nombres de Rayleigh.

2. Modèle physique

La géométrie étudiée est représentée dans la figure ci-dessous (figure 1), elle est constituée d'une cavité rectangulaire différentiellement chauffée de hauteur (H) et de largeur (L). Pour cette cavité le facteur de forme est variable et défini par L/H . A l'intérieur de la cavité, le fluide est de l'air supposé comme transparent.

Les parois verticales sont soumises à des températures différentes respectivement T_c et T_f (avec $T_c > T_f$). Les parois horizontales sont supposées adiabatiques. Sur toutes les parois, on respecte la condition de non glissement ($u=v=0$) et on impose une émissivité constante égale à l'unité ($\varepsilon = 1$) pour voir l'effet maximal du rayonnement. Cet écoulement est régi par les équations classiques de conservation. L'équation du transfert radiatif est représentée ci-dessous. Pour cette étude, on suppose que l'écoulement est bidimensionnel, stationnaire et le fluide est Newtonien, incompressible et satisfait à l'approximation de Boussinesq.

A- Equation de transfert radiatif :

L'équation du transfert radiatif est donnée par le bilan suivant :

$$\underbrace{\frac{dI_\lambda(\vec{r}, \vec{s})}{ds}}_A + \underbrace{(K_\lambda + \sigma_\lambda)I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})}_B = \underbrace{K_\lambda n^2 I_\lambda(\vec{r}, t)}_C + \underbrace{\frac{\sigma}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \varphi_\lambda(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega}_D \quad (1)$$

A : La variation de la luminance à la traversée une épaisseur ds. B : Pertes par absorption.

C, D : Représentent respectivement les gains de la luminance par émission et par diffusion.

La turbulence est modélisée en utilisant le modèle $K - \varepsilon$ constitué de deux équations de transport :

B- Couplage convection rayonnement :

L'équation de conservation d'énergie est la seule qui est affectée par l'introduction du rayonnement thermique.

Dans cette équation, le transfert radiatif est introduit comme terme source, elle s'écrit :

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho c_p} \nabla \cdot q_r \quad (2)$$

3. Modèle numérique

Pour résoudre les différentes équations écrites ci-dessus, on fait appel au code de calcul Ansys -Fluent basé sur la méthode numérique des volumes finis utilisée dans la discrétisation des équations de transport. L'équation générale de transport est écrite sous forme:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\Gamma_\phi \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (3)$$

Pour le couplage de la convection avec le rayonnement, le modèle des ordonnées discrètes (DO) a été introduit, le principe de ce modèle est d'approcher l'intégrale d'une grandeur directionnelle par une forme quadrature.

Le couplage vitesse–pression est assuré par l'algorithme de correction SIMPLE.

4. Résultats et discussion

Le maillage joue un rôle très important, il est choisi après plusieurs tests de l'indépendance de celui-ci des résultats. Il est raffiné proche des parois et large en se dirigeant vers le centre de la cavité. Ce choix permet de capter les différents gradients qui se développent proche des parois.

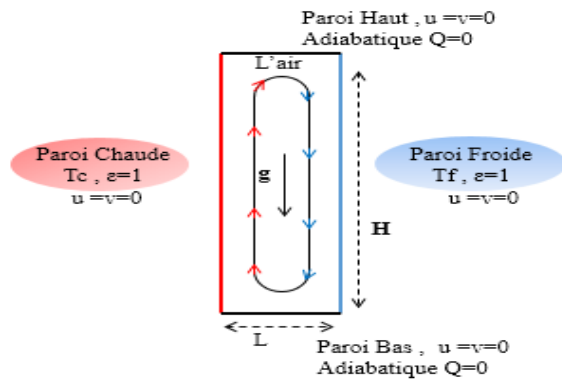


Figure.1: Configuration du problème

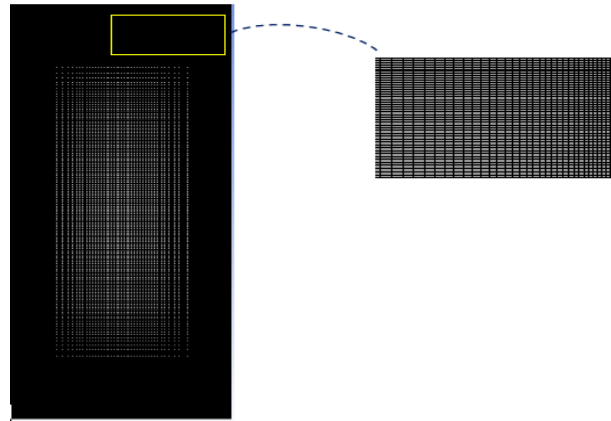


Figure.2 : Maillage utilisé

A. Variation de la vitesse moyenne :

Dans le cas du couplage convection-rayonnement, on constate que le rayonnement thermique influe sur l'écoulement interne de la cavité et en particulier sur la vitesse moyenne. Il se forme une seconde zone qui relie toutes les parois et dans laquelle la variation de la vitesse et de la température est importante.

Le long de la paroi active, la vitesse débute par une variation faible pour atteindre une variation importante au centre de la cavité, ensuite elle commence à diminuer jusqu'à atteindre des valeurs faibles en haut. Proche du plafond, il se forme un jet pariétal avec une vitesse moyenne qui se dirige vers la paroi opposée. Le même phénomène se produit le long de la paroi froide et l'écoulement est symétrique mais dans le sens inverse.

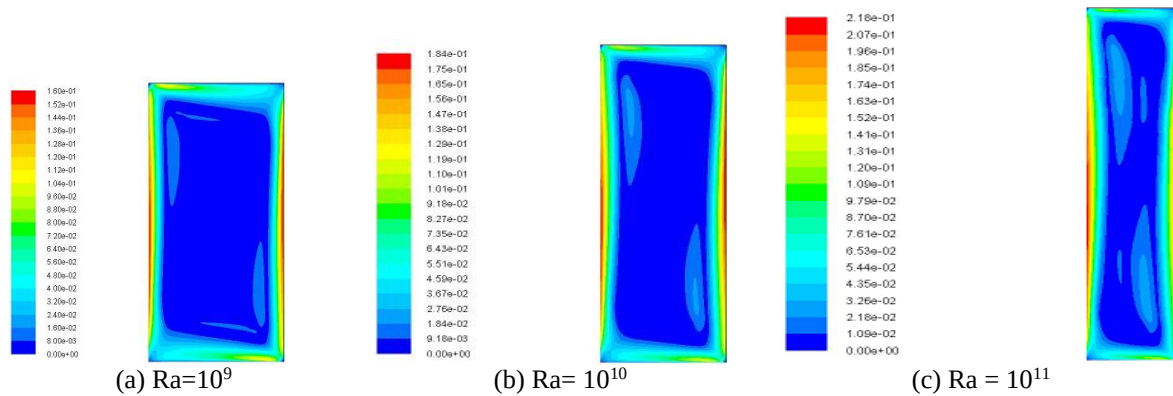


Figure.3 : Variation de la vitesse moyenne dans le cas de la convection couplée pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh avec $\varepsilon=1$

Si on augmente le nombre de Rayleigh avec l'émissivité qui reste constante pour les quatre parois, on observe l'émergence de deux boucles localisées proche des zones de retour du fluide.

B. Les profils de vitesses :

Pour une position fixe et quand la vitesse du fluide dans la couche limite augmente (paroi chaude) ou décroît (paroi froide), l'épaisseur du pic varie. La variation de la vitesse est significative dans le jet localisé au plafond et au plancher de la cavité. Cette variation est accompagnée d'une variation importante dans le pic qui est due à une forte émissivité ($\varepsilon = 1$) et à une augmentation du nombre de Rayleigh. L'augmentation de ces deux paramètres entraîne aussi une modification de la structure d'écoulement à l'intérieur de la cavité et qui devient instable pour des valeurs importantes de Rayleigh. Dans la figure ci-dessous, on représente la variation de la vitesse verticale pour les différentes positions de la cavité.

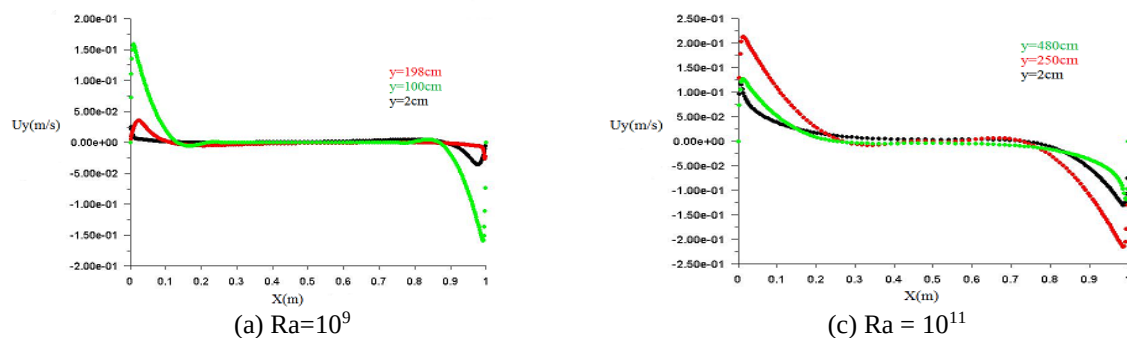


Figure.4 : Variation de la composante verticale de la vitesse pour différentes positions et pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh, $\varepsilon=1$

Dans la région des jets localisés aux parois passives, on constate que si le nombre de Rayleigh augmente la vitesse augmente avec l'épaisseur du jet qui devient faible. Comme la paroi de droite est froide, le fluide chaud perd sa chaleur et devient plus dense donc il descend en bas en formant une couche limite.

C. Les lignes de courant :

Le rayonnement surfacique provoque l'augmentation de la circulation du fluide proche des parois de la cavité. L'écoulement est ascendant du côté de la paroi chaude et descendant du côté de la paroi froide. Le fluide circule en circuit fermé et les lignes de courant sont caractérisées par des pics le long des parois actives, ces pics sont significatifs quand le nombre de Rayleigh augmente.

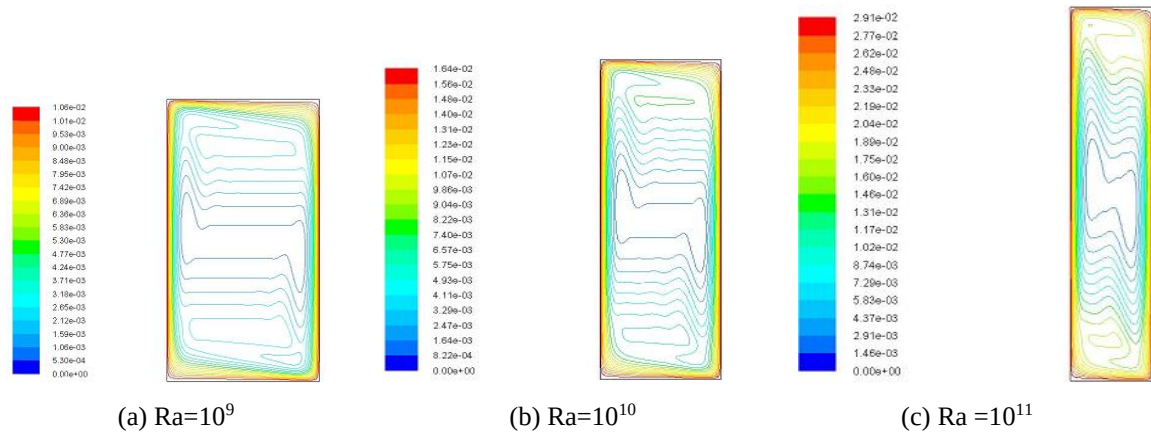


Figure.5 : Lignes de courant pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh et $\varepsilon=1$

D. Champ thermique :

Dans le cas du couplage convection – rayonnement, la variation de la température dans la cavité pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh est représentée dans la figure ci-dessous.

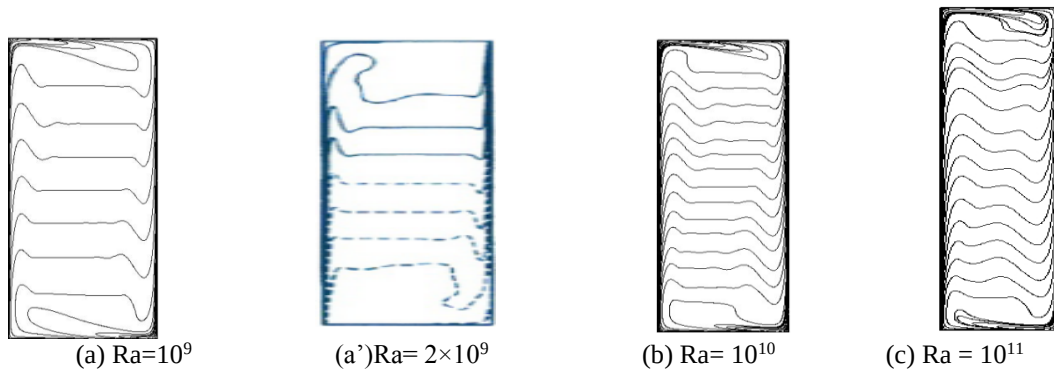


Figure.6 : Variation de la température à l'intérieur de la cavité pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh (a), (b) et (c), $\varepsilon=1$, (a') Variation de la température à l'intérieur de la cavité [5].

On constate que la variation de la température est similaire à celle de la convection pure. Dans le cas du couplage convection-rayonnement, les isothermes ont une forme particulière proche des parois horizontales (parois passives). Si on augmente le nombre de Rayleigh, la turbulence devient plus importante, on observe que les isothermes qui étaient sous formes de strates pour les nombres de Rayleigh de 10^9 et 10^{10} se déforment pour le nombre de Rayleigh de 10^{11} . Ceci est constaté pour le cas de la convection pure.

La figure ci-dessus, représente la variation de la température au centre de la cavité pour les différentes valeurs du nombre de Rayleigh, on constate que l'influence du nombre de Rayleigh et de l'émissivité sur la température au centre de la cavité n'est pas significative.

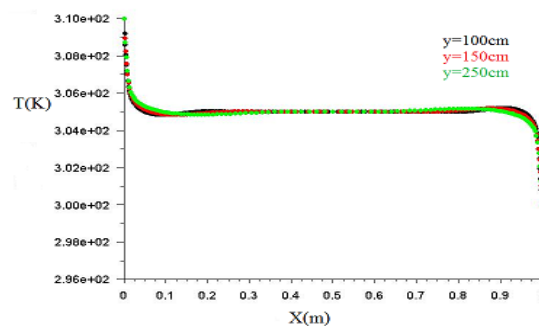


Figure.7: Profils de températures pour les différents nombres de Rayleigh au centre de la cavité.

Par comparaison avec le cas de l'étude réalisée en convection pure, on constate que les jets sont faibles aux parois passives contrairement au cas de la convection couplée, donc le rayonnement thermique accélère l'écoulement. Dans l'introduction du rayonnement thermique, on remarque proche des parois actives que l'épaisseur de la couche limite augmente et des gradients de vitesse qui apparaissent au niveau des parois passives, ceci est équivalent à une formation d'une seconde zone caractérisée par des gradients significatifs et qui relie toutes les parois de la cavité.

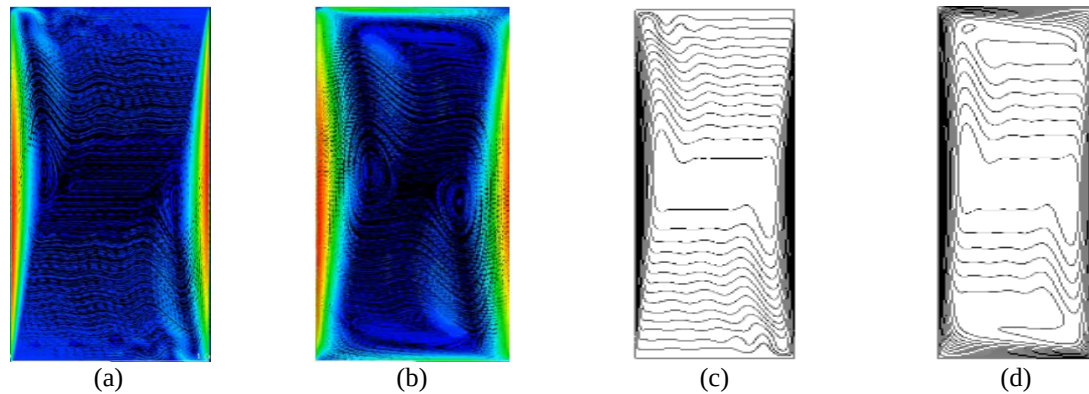


Figure.8: Comparaison de la variation de la vitesse moyenne pour le cas de la convection naturelle turbulente (a) et le cas de la convection couplée au rayonnement (b) et des lignes de courant pour le cas convection naturelle turbulente (c) et le cas de la convection couplée au rayonnement (d)

Pour le côté dynamique, on constate que les gradients de vitesses sont importants dans le cas du couplage convection-rayonnement contrairement au cas de la convection naturelle, de même pour le cas des gradients thermiques. Pour les parois passives (horizontales), l'intensité du jet est importante dans le cas couplé et les gradients thermiques se présentent sur toutes les parois de la cavité.

5. Conclusion

Dans ce travail, une étude de la convection naturelle turbulente couplée au rayonnement dans une cavité verticale différentiellement chauffée et remplie d'un fluide qui est de l'air est réalisée. On constate que le rayonnement thermique a un effet considérable sur la structure de l'écoulement et sur l'échange thermique qui se produit à l'intérieur de la cavité. Le nombre de Rayleigh, le facteur de forme et l'émissivité de la paroi influent sur la variation de vitesse et de température dans l'enceinte considérée. Dans le cas de la convection couplée, l'influence du rayonnement est visible sur toutes les parois et en particulier le long des parois horizontales passives contrairement au cas de la convection pure et les jets pariétaux sont renforcés. Ceci permet le transport du fluide d'un côté à un autre, ce qui donne une circulation d'air en circuit fermé. Dans le cas du couplage convection-rayonnement, les différents gradients sont importants et visibles le long de toutes les parois, ce qui permet de constater la formation d'une seconde zone contrairement au cas de la convection pure où les gradients apparaissent uniquement le long des parois actives.

REFERENCES

- [1] C. Balaji, S.P. Venkateshan, (1993). Interaction of surface radiation with free convection in a square cavity, Int. J. Heat Fluid Flow 14, pp 260–267.
- [2] M. Akiyama, Q.P. Chong, (1997). Numerical analysis of natural convection with surface radiation in a square enclosure, Numer. Heat Transfer, Part A 31, pp 419–433.
- [3] J. Salat, F. Penot, (2003). Approche expérimentale de la convection naturelle en transition turbulente dans une cavité cubique différentiellement chauffée, VIe Colloque Interuniversitaire Franco-québécois de Thermique des Systèmes, Québec, pp. 75-81.
- [4] G.Colomer, M.Conul, A.Oliva,(2004). Three-dimensional numerical simulation of convection and radiation in a differentially heated cavity using the discretized method. Int. J. Heat and Mass Transfer, (47), pp 257-269.
- [5] H. Wang, Sh. Xin, P.LeQuéré, (2006). Étude numérique du couplage de la convection naturelle avec le rayonnement de surfaces en cavité carrée remplie d'air. C. R. Mécanique. Vol 334, pp. 48–57.