

## I. Etude bibliographique

La convection naturelle dans les cavités fermées a eu une attention pour son importance dans les applications technologiques, car elle offre un champ d'application privilégié dans le confort thermique, le refroidissement des composants électroniques, les réservoirs de stockage. Concernant la convection naturelle dans les cavités verticales annulaires, elle a été étudiée par plusieurs auteurs, citons en particulier les travaux de De Vahl Davis et al. [1] à des nombres de Rayleigh de l'ordre de  $2 \cdot 10^5$ . Une étude paramétrique faisant varier le nombre de Prandtl dans la gamme  $0,5 < Pr < 5$  et un rapport de forme A entre 1 et 20 pour des rapports de rayons compris entre 1 et 4 leur a permis de conclure que le transfert de chaleur n'est pas seulement en fonction du nombre de Rayleigh Ra et du rapport de forme A mais également du rapport des rayons K. Citons également les travaux de Schwab et Dewitt [2] qui ont calculé le nombre de Nusselt moyen pour différentes valeurs de Ra, Pr et A et pour un rapport de rayon  $K=2$ , leurs résultats sont 30 à 50% supérieurs à ceux de De Vahl Davis et al. [1]. Lorsque K augmente fortement, la courbure de la paroi extérieure n'aura plus d'influence sur l'écoulement dans le cœur de la cavité, il sera alors assimilé à un écoulement de couche limite autour d'un cylindre vertical chaud, c'est d'ailleurs la conclusion à laquelle aboutit Prasad [3] dans une autre étude dans laquelle il considère cela à partir de  $K > 20$ . Contrairement aux études précédentes qui se sont principalement intéressés à la détermination du transfert de chaleur, Lee, Korpela et Horne [4] ont concentré leurs travaux sur la structure d'écoulement, notamment sur l'observation de régimes multicellulaires à  $Pr=0,71$ . Prasad et Kulacki [5] sont les premiers à avoir étudié expérimentalement l'effet de la courbure sur la convection en cavité annulaire, l'influence du rapport des rayons de la cavité annulaire y est étudiée à des nombres de Rayleigh compris entre  $8 \cdot 10^6$  et  $3 \cdot 10^{10}$ . Une de leurs constatations est que la distribution de température au milieu de la cavité annulaire ( $K=5,338$ ) varie entre 0,23 et 0,11 selon la valeur des paramètres Ra, A et Pr, alors qu'elle vaut 0,5 lorsqu'il s'agit d'une cavité rectangulaire ( $K=1$ ). Ils observent également qu'au fur et à mesure que la courbure de la cavité augmente, le fluide chaud s'accumule au voisinage de la paroi intérieure (chaude), il en résulte un faible gradient vertical de température dans la zone inférieure de la cavité et un fort gradient au niveau de la zone supérieure. Qualitativement, cela a été également obtenu par De Vahl Davis et al. [1], Schwab et al. [2], Lee et al. [4] et Kumar et al. [6]. Parmi les aspects intéressants de l'effet de la courbure, ils ont pu noter la diminution de température à l'intérieur de la couche limite, près de la paroi intérieure (chaude). Lorsque  $K > 1$ , cette diminution est

due à l'importance du transfert de chaleur près de la paroi intérieure. Parmi les travaux sur la convection naturelle dans les cavités annulaire verticales, on peut citer ceux de K. Choukairy et al. [7] où ils ont étudié le couplage de la conduction thermique à travers le cylindre intérieur avec la convection naturelle dans l'espace annulaire. Les auteurs ont mis en évidence l'effet de l'épaisseur et de la conductivité thermique du cylindre intérieur sur le transfert de chaleur dans la cavité. Un travail similaire a été effectué par Venkata Reddy et al. [8] où ils ont étudié la convection naturelle dans un espace annulaire verticale en présence d'un flux de chaleur généré par le cylindre intérieur le long de son axe de symétrie. Y.L. He et al [9] ont étudié numériquement la convection naturelle dans une cavité cylindrique verticale entourée par une paroi latérale adiabatique. Ils ont trouvé que pour des écarts de température enivrants  $\Delta T_w = 25$  K, ( $Ra = 1.1 \times 10^5 \sim 4 \times 10^7$ ) l'existence d'une recirculation entre les extrémités chaude et froide et pour des écarts importantes de température  $\Delta T_w = 220$  K, ils ont constaté une relation inversement proportionnelle entre le transfert de chaleur et le rapport de forme  $L/D$ .

Dans les travaux expérimentaux, on peut citer plusieurs auteurs, parmi eux A. H. Malik et al [10] qui ont étudié expérimentalement et numériquement la flottabilité d'un fluide dans une cavité cylindrique verticale concentrique, chauffée par bas. Nilesh B. Totala et al [11] ont étudié la convection naturelle dans une cavité cylindrique verticale. Ils ont calculé le coefficient de transfert de chaleur local et ils l'ont comparé avec les valeurs théoriques obtenues par les solutions analytiques. R. Hosseini et al [12] ont étudié expérimentalement la convection naturelle dans une cavité annulaire cylindre verticale concentrique et excentrique, chauffée le long du cylindre intérieur. Les mesures expérimentales ont été obtenues pour un cas concentrique et six cas excentricités de 0,1 à 0,92 et cinq différents flux imposés. Une corrélation est suggérée pour déterminer le nombre de Nusselt en fonction du rapport des diamètres. Ils ont montré que le transfert de chaleur est maximal pour les cylindres excentriques.

Contrairement à la convection naturelle stationnaire, l'étude transitoire de la convection naturelle dans une cavité cylindrique verticale a reçu beaucoup d'attention dans la littérature. K. Choukairy et al [13] ont étudié numériquement et analytiquement la convection libre en régime transitoire dans une cavité cylindrique verticale remplie d'air  $Pr = 0,71$ . Les résultats ont montré que le temps nécessaire pour atteindre l'état stationnaire diminue avec l'intensité de l'écoulement convectif et il est indépendant de la courbure. Anil Kumar Sharma et al [14] ont étudié numériquement la convection naturelle turbulente en régime transitoire, générée par une source d'énergie placée à l'intérieure de l'espace annulaire remplie d'un fluide à faible

teneur  $Pr = 0,005$ . Amitesh Kumar et al [15] ont étudié numériquement la convection naturelle instationnaire dans une cavité cylindrique verticale axisymétrique chauffée latéralement au niveau de la paroi verticale pour différents rapport de forme 2-4 et nombre de Prandtl  $0.01 \leq Pr \leq 10$ . Ils ont montré que, pour les fluides à faible nombre de Prandtl,  $Pr < 1,0$ , le nombre de Rayleigh critique augmente avec l'augmentation du rapport de forme, tandis que pour les fluides à nombre élevé de Prandtl,  $Pr > 1,0$ , ce nombre de Rayleigh diminue avec l'augmentation du rapport de forme.

Pour étudier la stabilité de la convection naturelle dans une cavité annulaire, K.Choukairy et al [16] ont étudié numériquement l'effet d'un obstacle sur la convection naturelle. L'obstacle modifie la structure d'écoulement et affecte les transferts locaux. La configuration considérée est celle d'une cavité cylindrique annulaire chauffée de manière différentielle par un anneau localisé au niveau des parois verticales, les parois horizontales sont adiabatiques. M. Sankar et al [17] ont étudié numériquement la convection naturelle dans une cavité cylindrique vertical chauffée avec une source de chaleur localisée au niveau de la paroi intérieure, tandis que les parois supérieure et inférieure sont maintenues adiabatique alors que la paroi extérieure est maintenue à une température plus basse. Ils ont trouvé que le placement de la source de chaleur près de la partie médiane de la paroi intérieure donne un transfert de chaleur maximum et un transfert de chaleur minimum près de la partie supérieure. En outre, ils ont découvert que le transfert de chaleur augmente avec la croissance du rapport de rayon de l'espace annulaire.

Une grande partie des travaux de recherche a été focalisé sur la compréhension du mécanisme du transfert chaleur et de masse dans les cavités cylindriques annulaires. La convection double diffusive dans les cavités fermées a eu une attention pour son importance dans les applications technologique, car elle offre un champ d'application privilégié dans des situations réelles diverses: croissance de cristaux destinés à l'industrie des semi-conducteurs, processus de séchage, processus de fusion-solidification de mélanges binaires, stockage des gaz liquide ou oxydation des surfaces métalliques. On estime actuellement que ce phénomène de transfert convectif de masse et de chaleur constitue un domaine très actif car d'importants travaux expérimentaux et numériques ont été effectués très récemment. La diversité des configurations et le nombre important de paramètres qui interviennent dans ce type d'écoulement nous donne un grand choix de domaine d'études.

On peut citer l'un des premières études sur le couplage du transfert de chaleur et de masse dans les cavités annulaires verticaux présenté par Shipp et al. [18], ils ont étudié la

convection thermosolutale dans une cavité annulaire concentrique pour des nombre de Lewis modéré. Kefeng Shi et al. [19] ont étudié numériquement la convection double diffusive transitoire dans une enceinte cylindrique verticale par la méthode des éléments finis. Weidong Guo et al. [20] ont étudié la convection de Rayleigh-Marangoni dans une cavité annulaire verticale chauffée par le bas en utilisant une analyse de stabilité linéaire. Ils ont montré que la largeur de l'espace annulaire n'est pas un facteur important dans le contrôle de l'effet Marangoni, mais les profondeurs des liquides et des gaz jouent un rôle dominant. Teamah [21] a fait une simulation numérique sur la convection double diffusion dans un espace annulaire horizontal, le cylindre intérieur est maintenu à une température et concentration élevé, et il est en rotation avec une vitesse uniforme. N. Retiel et al. [22] ont étudié l'effet de la courbure sur la convection double diffusive coopérante dans une cavité annulaire verticale. Bennacer et al. [23] ont étudié la convection double diffusif et ont analysé l'effet Soret en détail. Il y a I. Ryzhkov [24] qui a étudié la convection double diffusive dans une cavité cylindrique coaxiale verticale. Il a analysé l'influence de l'effet Soret et l'épaisseur de la couche limite sur l'écoulement. Sheng Chen et Jonas Tölke [25] ont étudié numériquement la convection double diffusive dans une cavité annulaire verticale avec des gradients de températures et des concentrations opposées, pour des nombres de Rayleigh supérieure à  $10^6$  et des rapports de forces de flottabilité variant entre  $0,8 \leq N \leq 1,3$ . Les résultats obtenus ont montré que pour un nombre de Rayleigh  $10^6$  et  $N < 1.0$  l'apparition d'une grande cellule thermique qui circule dans le sens des aiguilles d'une montre. Ils ont aussi trouvé que le nombre de Nusselt moyen et le nombre de Sherwood moyen sont des fonctions croissantes avec le rapport de courbure  $K$ .

La convection naturelle dans les milieux poreux, a été largement étudiée dans la littérature. H. Beji et al. [26] ont étudié numériquement la convection double diffusive dans une cavité poreuse annulaire verticale dont les parois verticales sont maintenues à des températures et des concentrations constantes. Bennacer et al. [27] ont analysé la Convection thermosolutale dans une cavité annulaire verticale contenant un milieu poreux. Jiten C Kalita et Anoop K Dass [28] ont analysé la convection double diffusive dans une cavité annulaire verticale poreuse par l'algorithme HOC (Higher Order Compact). Les paramètres physiques et géométriques exploités dans ce travail sont  $-50 \leq N \leq 50$ ,  $1 \leq A \leq 10$ ,  $1 \leq K \leq 50$ ,  $0 \leq Ra \leq 10^3$  et  $1 \leq Le \leq 500$ . M. Sankar et al [29] ont étudié la convection double diffusive dans une cavité annulaire poreuse chauffée par une source de chaleur et de masse localisée au niveau de la paroi verticale du cylindre intérieur. Le modèle physique des équations de continuité est

formulé par la loi de Darcy et la résolution des équations gouvernantes est effectuée par la méthode implicite des différences finies.

D'autres recherches ont été menées pour étudier l'effet du champ magnétique dans différentes enceintes. Kewei Song et al [30] ont étudié numériquement la convection naturelle dans une enceinte carrée sous un champ magnétique non uniforme, ils ont concentré leur travail sur le transfert de chaleur en présence de la convection magnétothermique de l'air entraînée par un champ magnétique permanent ainsi que, la comparaison entre la convection entraînée par champ magnétique et le champ de gravité.

La convection naturelle dans les nano-fluides a également attiré une attention considérable. Récemment, Hicham Salhi et al [31] ont travaillé sur la convection naturelle d'un nano-fluide (NF) constitué d'eau et (Ag ou  $\text{TiO}_2$ ) dans une cavité inclinée. Les parois gauche et droite de la cavité ont une géométrie complexe ondulée, maintenues à des températures basse et haute (température est aléatoire, selon une fonction variable). S.bazi et al [32] ont étudié numériquement le transfert de chaleur et l'écoulement de fluide dans une cavité annulaire horizontale partiellement chauffée rempli de nano-fluide. Une source de chaleur due à une température constante est localisée au niveau de la paroi du cylindre extérieur. La température du cylindre intérieur est inférieure à celle du cylindre extérieur, tandis que les parties restantes restent isolées. Quatre nanoparticules (Au, Cu, CuO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et trois fluides de base (eau, éthylène glycol, huile) sont sélectionnés pour examiner l'amélioration potentielle du transfert de chaleur dans l'espace annulaire.

L'effet du rayonnement sur la convection naturelle thermique en cavité rectangulaire a fait l'objet de plusieurs études, Yucel [33], Lauriat [34], Fusegi [35], asaka [36], Farok [37], Draoui et al [38] et C.Balaji et al [39]. Lorsque les cavités sont remplies par un gaz, l'influence des échanges radiatifs entre surfaces à travers un milieu qui émet du rayonnement à sa propre température locale, absorbe et diffuse le rayonnement incident en tout point (milieu semi-transparent) a été étudiée par Ganesan et Loganathan [40], ils ont observé que, pour des faible valeurs du nombre de Prandtl et certains paramètres radiatifs, la vitesse d'écoulement et la température du fluide au niveau des parois du cylindre augmente brusquement avec le temps. Plus récemment, Borjini et al. [41] ont étudié numériquement les effets du rayonnement volumétrique sur la double convection diffusive dans une cavité rectangulaire soumise à un champ magnétique externe. Ils ont constaté que, lorsque l'épaisseur optique du milieu varie, plusieurs solutions (stationnaires ou oscillatoires) peuvent être obtenues selon les conditions initiales. S. Mefteh et al [42] ont analysé le couplage du

rayonnement et la convection double diffusif dans une enceinte carrée remplie d'un mélange participant non gris (air-CO<sub>2</sub> ou air-H<sub>2</sub>O). Les caractéristiques du flux ont été calculées en prenant en compte la participation radiative du mélange, les sources de rayonnement et les flux pariétaux des parois ont été évalués en utilisant la méthode des ordonnées discrètes [43] avec le SLW modèle spectral de Denison et Webb [44]. A. Mezrhab et al [45] ont analysé numériquement l'effet du rayonnement sur la convection thermosolutale dans cavité carrée rempli d'un fluide participant avec des surfaces qui émettent le maximum de rayonnement.

La présentation des différentes méthodes de résolutions de l'équation de transferts radiatifs par la méthode des ordonnées discrètes a été détaillée par des ouvrages comme [46], [47], [48]. L'étude du rayonnement thermique dans des cavités cylindriques a eu une grande considération. Nous pouvons remarquer que peu de travaux se sont intéressés au couplage de la convection avec le rayonnement thermique dans des cavités cylindriques, on peut citer, Man Young Kim et al [49]. [50], ils ont étudié le transfert radiatif dans une cavité cylindrique asymétrique remplie d'un fluide qui absorbe, émet et diffuse. Ils ont utilisé les méthodes de différences finies MDOM, FVM, et MFVM. Kyung Moo Kim et al [51] ont étudié numériquement le couplage de la conduction et du rayonnement dans une cavité cylindrique rempli d'un fluide binaire. La complexité de l'équation différentiel du transfert radiatif ETR est résolue par la méthode des ordonnées discrètes. K.W. Kim et al [52] ont étudié le couplage conduction-rayonnement dans une cavité cylindrique remplie d'un fluide participant. L'algorithme Levenberg-Marquardt est utilisé pour résoudre le système d'équation et la méthode de Broyden pour calculer les coefficients de sensibilité. C. Balaji et S. P. Venkateshan [53] ont étudié l'interaction du rayonnement de surface avec convection naturelle dans une cavité ouverte. L'effet du rayonnement de surface a été analysé pour différents nombres de Rayleigh ( $10^4$ - $10^8$ ). Les mêmes auteurs ont poussé leurs travaux [54], pour étudier l'interaction des trois modes de transfert de chaleur conduction, convection et rayonnement et effectuer des corrélations correspondantes. B. Cherif et al [55] ont analysé l'influence du rayonnement sur le transfert thermique des deux modes de transfert convection, conduction dans une cavité cylindrique rempli d'un fluide poreux semi transparent. Différents résultats ont été obtenus pour des profils de températures adimensionnées et des flux totaux dans le solide et le fluide. Semra Harmandar et al [56], ont développé un code de calcul basé sur la méthode des ordonnées discrète pour étudier le transfert radiatif dans une cavité cylindrique axisymétrique rempli d'un fluide émettant et absorbant. Plusieurs tests ont été effectués pour valider ce travail. M. Timoumi et al [57] ont analysé le couplage rayonnement,

convection, et conduction dans une cavité cylindrique contenant un fluide qui émet, absorbe et diffuse. L'effet des propriétés radiatif du milieu sur le transfert thermique a été examiné. Mohamed Naceur Borjini et al [58], ont étudié numériquement l'influence du transfert radiatif sur la convection naturelle laminaire, bidimensionnelle, permanente, dans un espace annulaire d'axe horizontal, délimité par deux cylindres circulaires isothermes concentriques ou verticalement excentrique. Le milieu participant est gris et il absorbe, émet et diffuse isotropiquement le rayonnement, Le modèle numérique utilisé est la méthode des volumes de contrôle formulée dans le système de coordonnées bidimensionnelles. Ils ont discuté l'influence du rayonnement sur les champs des températures et des vitesses, ainsi que sur le transfert de chaleur, pour des nombres de Rayleigh de  $10^3$ ,  $10^4$  et  $10^5$ .

V. Le Dez et al [59] ont analysé le couplage conduction et rayonnement dans une cavité conique, Le milieu participant est gris et il absorbe, émet isotropiquement le rayonnement. La modélisation bidimensionnelle est basée sur une représentation à double grille correspondant aux coordonnées curvilignes adaptées à la forme de la cavité dans lesquelles la source radiative est calculée par la technique de traçage des rayons et l'équation de transfert radiatif (ETR).

Mohamed Naceur Borjini et al [60] ont étudié numériquement les transferts couplés rayonnement-convection naturelle en régime laminaire dans des géométries définies par des secteurs et des espaces annulaires bidimensionnels remplis d'un fluide Newtonien. Ils ont utilisé la technique du volume de contrôle et la méthode des volumes finis pour la résolution de l'équation du transfert radiatif. Le fluide est supposé semi-transparent, gris, émetteur, absorbant et diffusant isotropiquement le rayonnement. Les influences des conditions aux limites (pour les secteurs) et de la position du cylindre interne (pour les espaces annulaires) sur l'intensité et la stabilité de l'écoulement sont analysées. Les simulations numériques ont été effectuées pour  $Pr=0,7$ ,  $Ra<2.10^5$  et pour un paramètre de couplage rayonnement-conduction allant de zéro à l'infini. F. Gotse [61] ont étudiée analytiquement les équations du transfert radiatif, et ont étendu les résultats antérieur de Mercier [62]. Xia Xinlin et al [63] ont analysé le couplage conduction-rayonnement en régime instationnaire dans une cavité cylindrique rempli d'un fluide semi-transparent, les parois sont opaques. Les méthodes des volumes finies et des ordonnées discrètes ont été introduite pour résoudre le problème tridimensionnel avec des conditions aux limites non linéaire des deuxièmes et troisièmes ordre.