

3.1 Domaine d'étude:

Nous proposons d'étudier le transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité cylindrique verticale partiellement annulaire. Cette étude a pour but principal de répondre à des questions relatives aux applications industrielles et d'étudier le phénomène de la convection naturelle dans des cavités partiellement ou totalement annulaire ayant diverses formes et dimensions.

3.2. Choix des principaux paramètres de configuration:

La structure de l'écoulement, le champ thermique, ainsi que le transfert de chaleur à travers la paroi chaude sont examinés dans cette section.

Dans cette étude pour examiner l'effet de la géométrie de la cavité, nous avons fait varier le rapport des hauteurs X ($0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1$) et le rapport des rayons K ($2, 5, 10$) pour un nombre de Prandtl est fixé à 7.0 (cas de l'eau). Les résultats sont présentés pour quatre valeurs de nombre de Rayleigh ($Ra=10^3, 10^4, 10^5$ et 10^6) pour chaque rapport de hauteur et chaque rapport des rayons.

Nous présenterons des champs de vitesses et de température et des valeurs quantitatifs du transfert de chaleur (nombre de Nusselt) pour différentes paramètres qui caractérisent le problème de transfert de chaleur, qui sont les paramètres physiques (Ra) et les paramètres géométriques (X, K) correspondant aux différentes solutions obtenues en régime stationnaire et instationnaire.

3.3. Influence du nombre de Rayleigh:

Le paramètre principal qui gouverne l'écoulement convectif est le nombre de Rayleigh qui compare les forces de flottabilité (force d'Archimède) aux forces visqueuses, il est proportionnel au gradient de température appliqué.

- **Structure d'écoulement et distribution de température:**

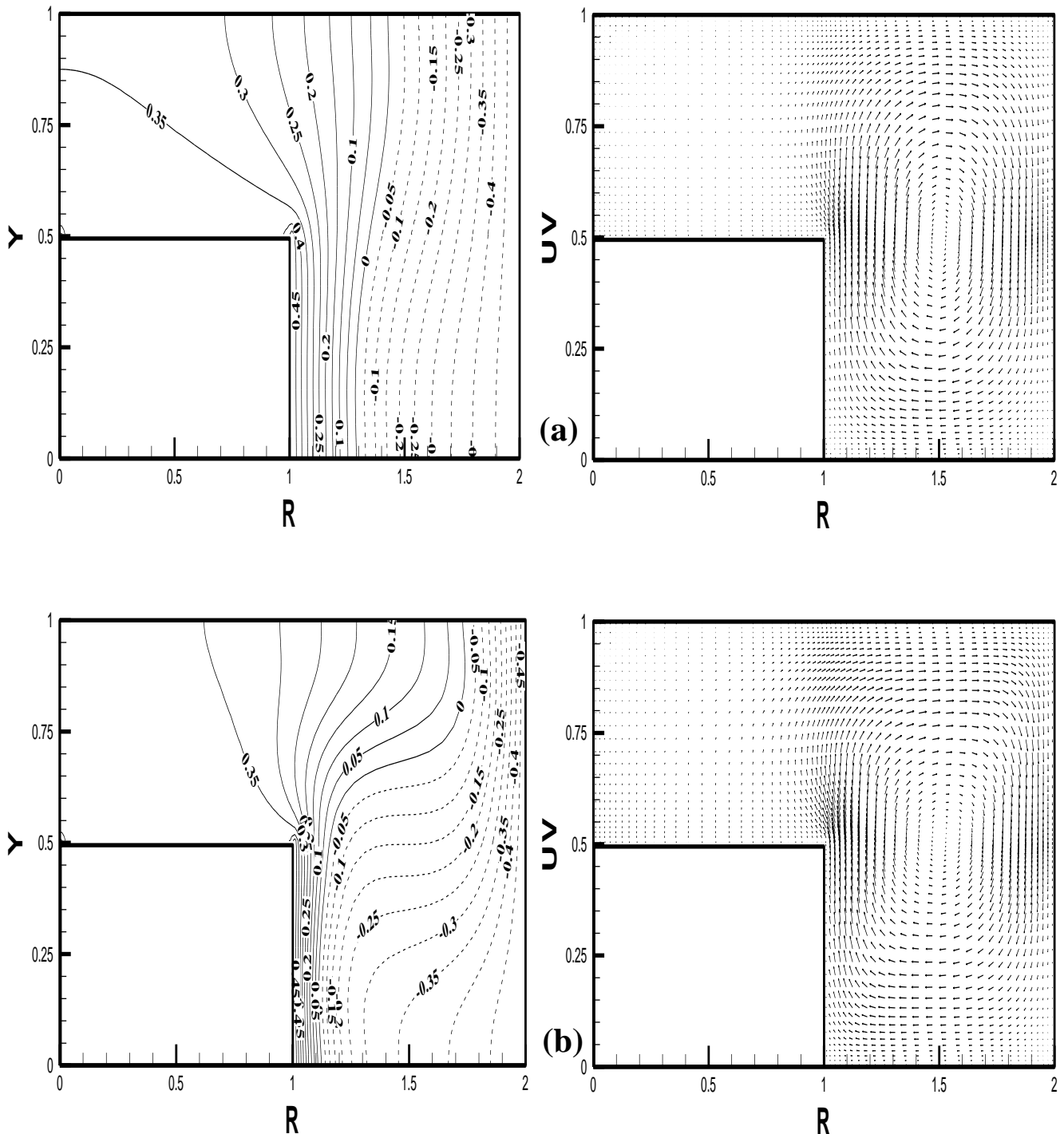
Les champs de température ainsi que les champs de vitesses sont montres dans les figures (III.1) pour un nombre de Rayleigh variant entre 10^3 et 10^6 .

Ainsi pour $Ra=10^3$, les sollicitations thermiques sont assez faibles pour pouvoir varier la densité du fluide et provoquer le mouvement des particules, le transfert de chaleur s'effectue alors uniquement par conduction thermique c'est pourquoi on observe une stratification horizontale des isothermes (fig.III.1-a). Lorsque les forces de poussées thermiques commencent à devenir plus importantes avec l'augmentation du nombre de Rayleigh de l'ordre de $Ra=10^4$, on constate dans la figure (fig.III.1-b) des isothermes qui commencent à se tordre au fur et à mesure qu'on s'approche de l'espace annulaire où les particules s'accélèrent en circulant dans le sens des aiguilles d'une montre, ascendantes près de la paroi chaude et descendante près de la paroi froide. Nous remarquons que les isothermes se resserrent à côté des parois verticales du cylindre où le gradient de température est important. L'augmentation du nombre de Rayleigh de $Ra=10^5$ jusqu'à $Ra=10^6$ engendre un gradient de température très fort aux voisinages des parois verticales (fig.III.1-c-d), ce qui signifie un échange thermique convectif croissant avec l'accroissement du nombre de Ra . Effectivement lorsqu'on analyse le champ de vitesse, on constate que pour $10^3 \leq Ra \leq 10^4$, les vitesses sont faibles au milieu de la

cavité ($Y=0.5$ et $R=1.5$) et presque négligeable dans l'intervalle $0 < R < 1$ (fig.III.1-a-b). Par contre, l'écoulement commence à se développer avec l'augmentation du nombre de Rayleigh ($10^5 \leq Ra \leq 10^6$), où les particules de fluide s'accroissent précisément au voisinage des parois et les vitesses commencent à devenir plus importantes sur la partie supérieure du cylindre intérieur (fig.III.1-c-d).

On peut également constater à partir de la figure III-3 que les vitesses de l'écoulement sont de plus en plus intenses en s'approchant des parois, principalement lorsqu'on fait accroître le nombre de Rayleigh, et donc les vitesses sont toujours maximales au voisinage des parois verticales.

Donc, l'augmentation du nombre de Rayleigh à partir $Ra \geq 10^4$ accentue l'effet convectif du transfert de chaleur (fig.III.2).



Suite de la figure (III.1)

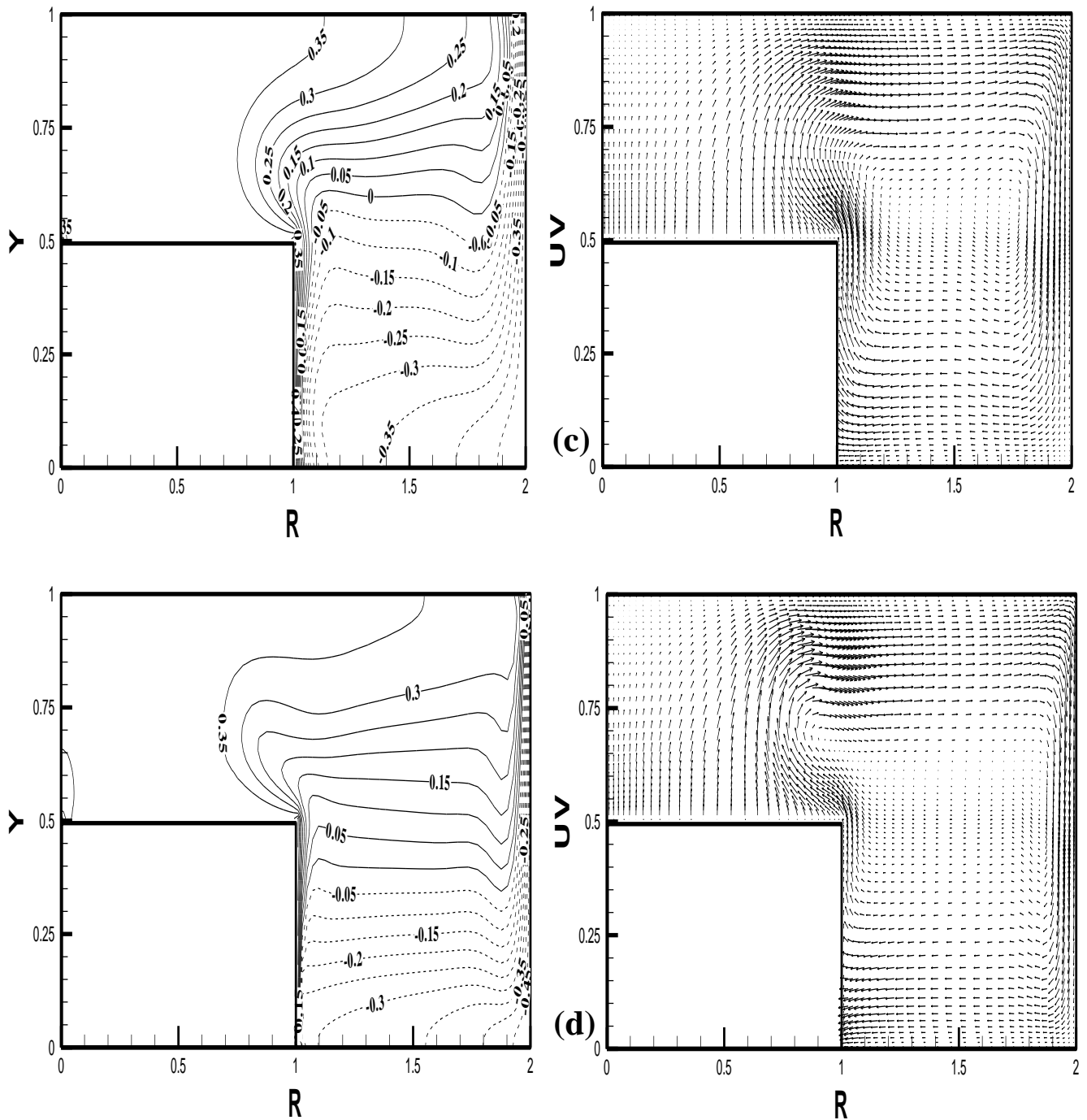


Fig.III.1: Effet du nombre de Rayleigh sur le champ de température et le champ de vitesse, $Ra=10^3$ (a), $Ra=10^4$ (b), $Ra=10^5$ (c), $Ra=10^6$ (d) ($A=1$, $K=2$, $X=0.5$, $Pr=7.0$)

- **Profils des températures et des vitesses:**

Le profil vertical de température au centre de la cavité ($Y=0.8$) pour différents nombres de Rayleigh est donné dans la figure (III.2). Le fluide est chaud au voisinage de la surface du cylindre intérieur et il est froid du côté de la paroi du cylindre extérieure. Pour un nombre de Rayleigh ayant une valeur de 10^3 le profil de température représente une certaine linéarité dans les deux zones $0 < R < 1$ et $1 < R < 2$. Cela est expliqué par le fait que jusqu'à cette valeur le transfert de chaleur est effectué seulement par conduction.

Cependant, on constate à travers les profils de température, lorsque Ra augmente au-delà de la valeur 10^4 , que la variation de température tend à s'affaiblir dans la zone annulaire ($1 < R < 1.9$), due à une stratification verticale de température provoquée par un écoulement convectif intense au fur et à mesure que le nombre de Rayleigh augmente (Fig.III.1 c-d). Au-delà de cette zone, au niveau de la paroi, on constate la présence d'un gradient de température horizontale intense due à un transfert thermique important. Effectivement, on remarque que les isothermes deviennent de plus en plus resserrées lorsque Ra augmente. La première différence qui apparaît par rapport au cas précédent est la présence sur ces profils de deux inflexion locaux ($R \sim 1.9$ et $R \sim 1.95$) qui traduisent l'augmentation du gradient de température entre le fluide et la paroi froide du cylindre extérieur.

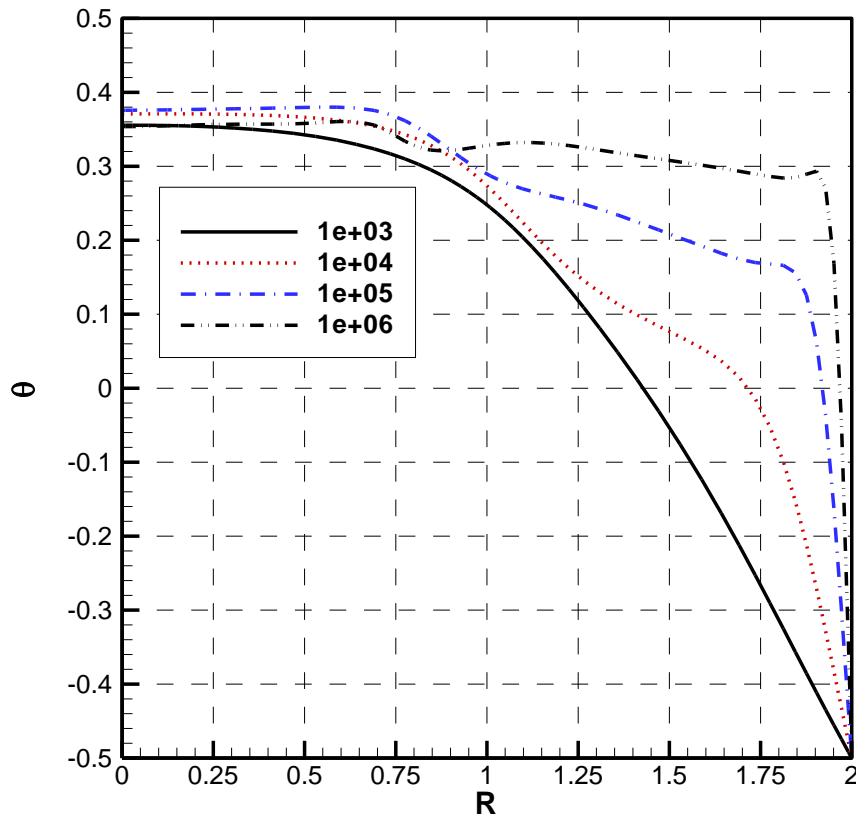


Figure (III.2): profil de la température statique à $Y=0.8$, $X=0.5$, $K=2$ pour différents nombre de Rayleigh

Ces courbes montrent, par leur allure, l'effet du régime convectif sur la distribution de température dans la cavité.

Ces gradients de température (couches limites thermique) sont bien associées à l'écoulement du fluide qui se fait principalement dans les couches limites au voisinage des parois comme le confirme l'observation des profils de vitesses verticales (V) et de vitesses horizontales (U) pour $Ra=10^3$ jusqu'à $Ra=10^6$ (Fig.III.3.a) et (Fig.III.3.b), le mouvement y subit une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre. La vitesse verticale s'annule à $R=1.5$ quelle que soit la valeur de Ra par contre lorsque l'écoulement est étouffé pour $Ra=10^3$ et $Ra=10^4$ les vitesses verticales sont nulles dans l'intervalle $R \in [0, 0.5]$. Aux niveaux des parois (couche limite dynamique), on constate que les vitesses verticales croient avec l'augmentation du nombre de Ra et s'annulent au contact de la paroi froide (condition de non-glissement).

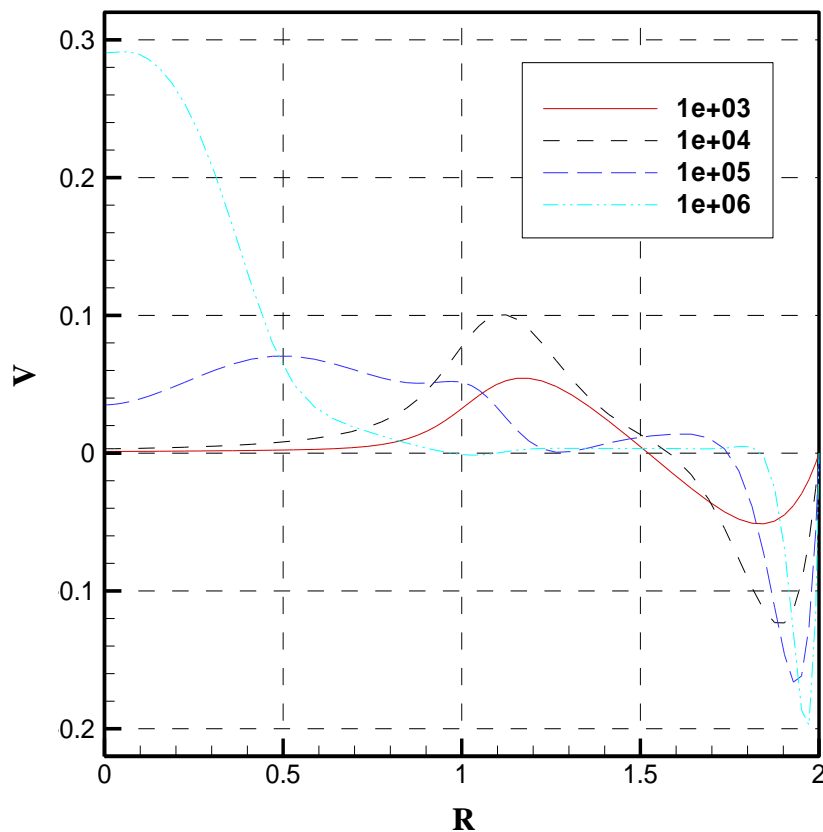


Fig III.3.a: profil de la vitesse moyenne (V) à $Y=0.8$, $X=0.5$, $K=2$ pour différents nombre de Rayleigh

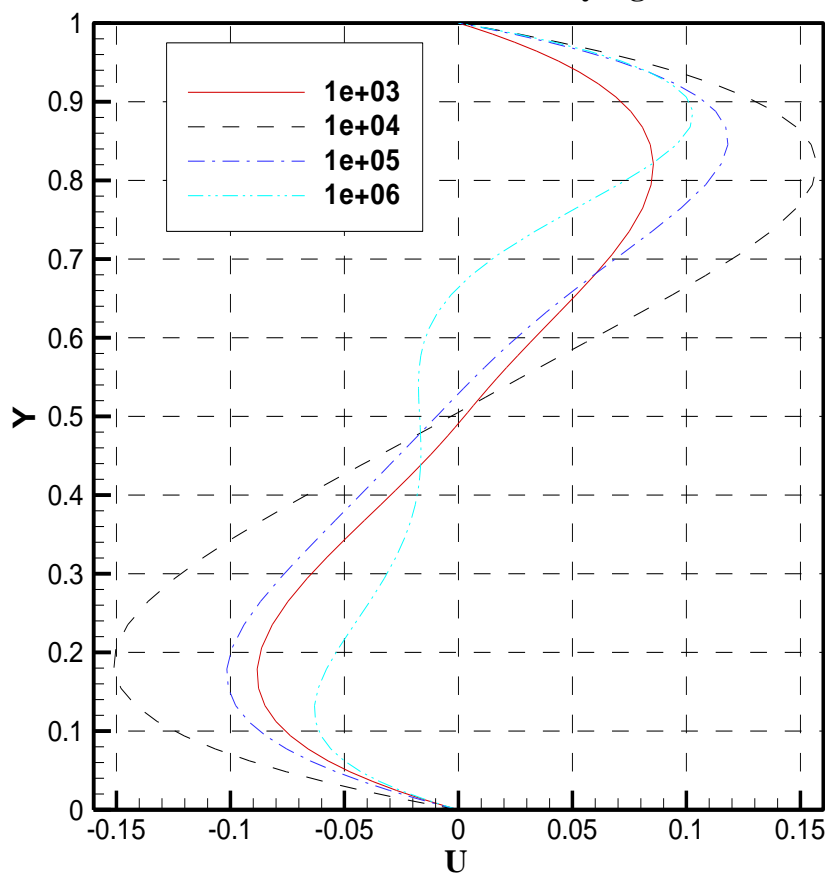


Fig III.3.b: profil de la vitesse moyenne (U) à $R=1.65$, $X=0.5$, $K=2$ pour différents nombre de Rayleigh

D'autre part, au niveau de l'axe de symétrie, les vitesses verticales augmentent avec lorsque le nombre de Rayleigh et atteint un maximum $V \sim 0.3$ ($Y=0.8$, $R=0$) pour un nombre de Rayleigh égal à 10^6 .

3.4. Influence du rapport de hauteur:

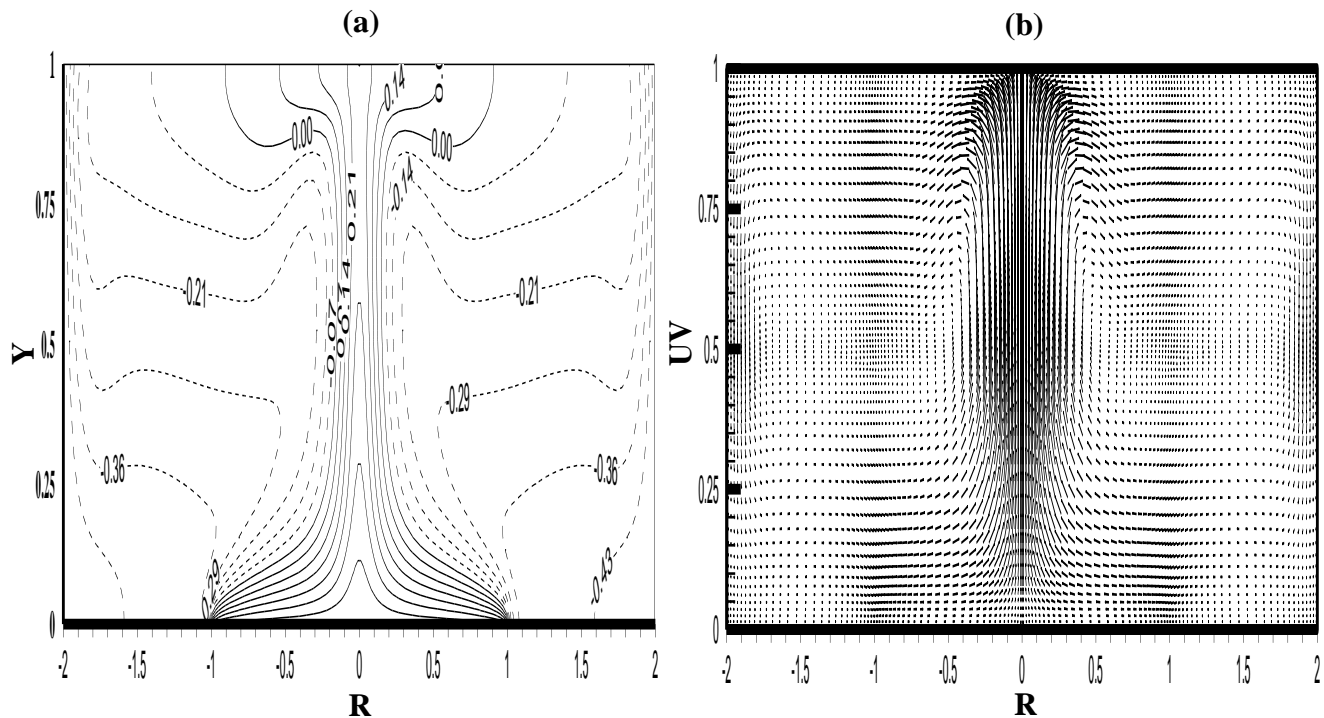
Le rapport des hauteurs (X) est un ordre de grandeur adimensionnelle qui caractérise la géométrie de la cavité et qui représente le rapport de la hauteur du cylindre intérieur à la hauteur du cylindre extérieur.

- **Structure d'écoulement et distribution de température**

Pour mettre en évidence l'effet du rapport des hauteurs des deux cylindres, nous avons considéré différents rapports de hauteurs entre $0 \leq X \leq 1$ pour $Ra=10^5$, $K=2$, $A=1.0$, $Pr=7.0$.

En observant les isothermes de la figure (III.4.a) on constate que le flux de chaleur est verticale est intense au niveau de la paroi chaude, mais dès qu'on s'éloigne de cette dernière ($Y=0.2$), le flux de chaleur devient radial le long et à proximité de l'axe verticale ($0 < R < 0.5$). Cela provoque un écoulement intense sous forme de panache.

Dans le reste de la cavité le gradient de température s'affaiblit avec une stratification thermique verticale où le flux de chaleur devient descendant, sauf au niveau de la paroi froide où le flux de chaleur redevient horizontal. Lorsque le nombre de Rayleigh continue à augmenter et atteint $Ra=10^5$, le flux de chaleur ascendant est serré au centre de la cavité le long de l'axe vertical avec un gradient de température faible entouré d'un gradient de température horizontale très intense, mais le reste de la cavité possède une stratification de thermique verticale avec un gradient de température faible ce qui provoque une zone de fluide où les particules sont ralenties (Figure III.4.b).



**Fig.III.4: Isotherme (a) et champ de vitesses (b) pour $X=0.0$
($Ra=10^5$, $K=2$, $Pr=7.0$)**

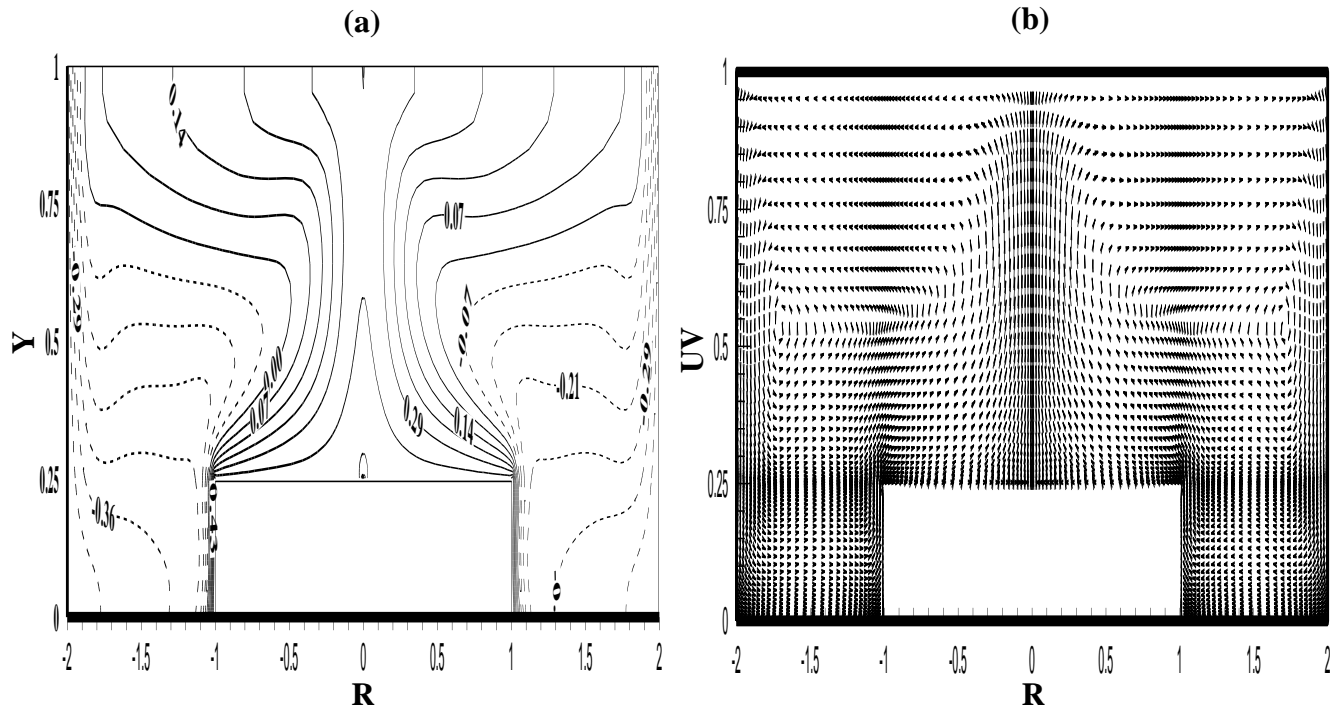


Fig.III.5: Isotherme (a) et champ de vitesses (b) pour $X=0.25$
($Ra=10^5$, $K=2$, $Pr=7.0$)

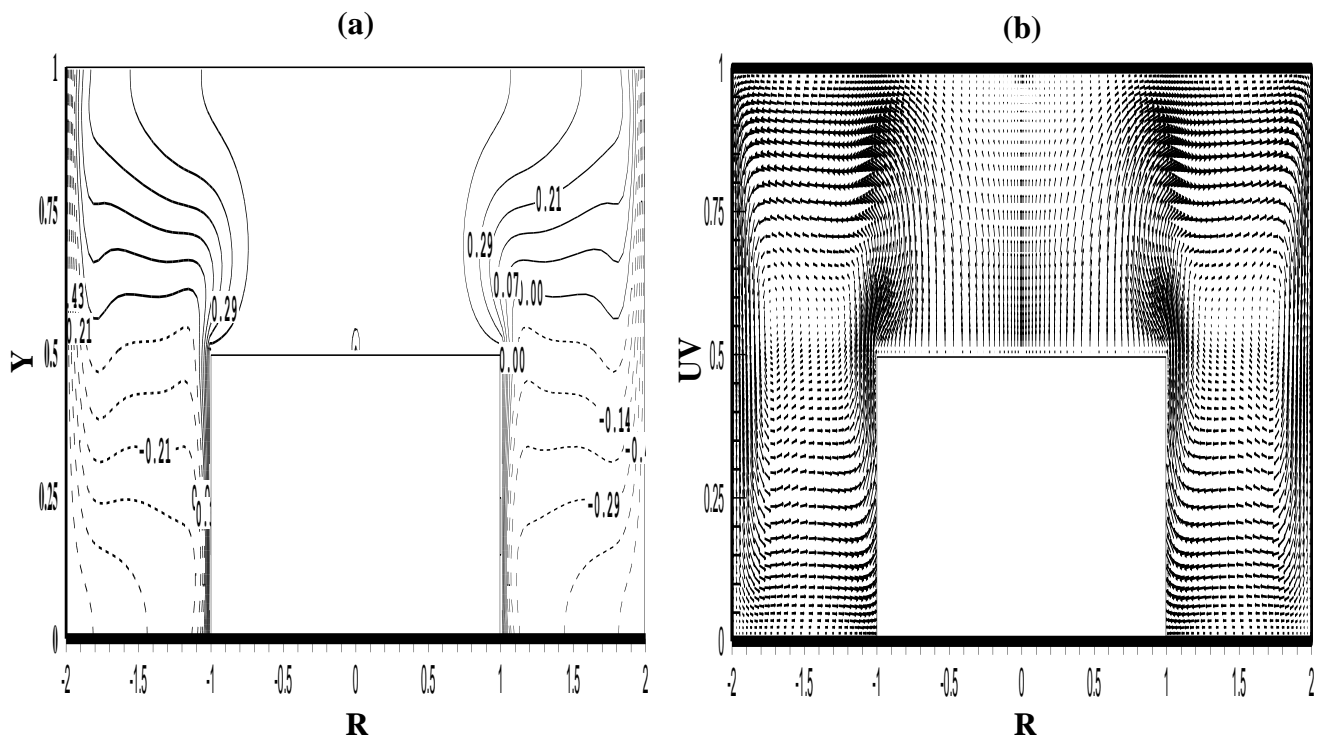


Fig.III.6: Isotherme (a) et champ de vitesses (b) pour $X=0.5$
($Ra=10^5$, $K=2$, $Pr=7.0$)

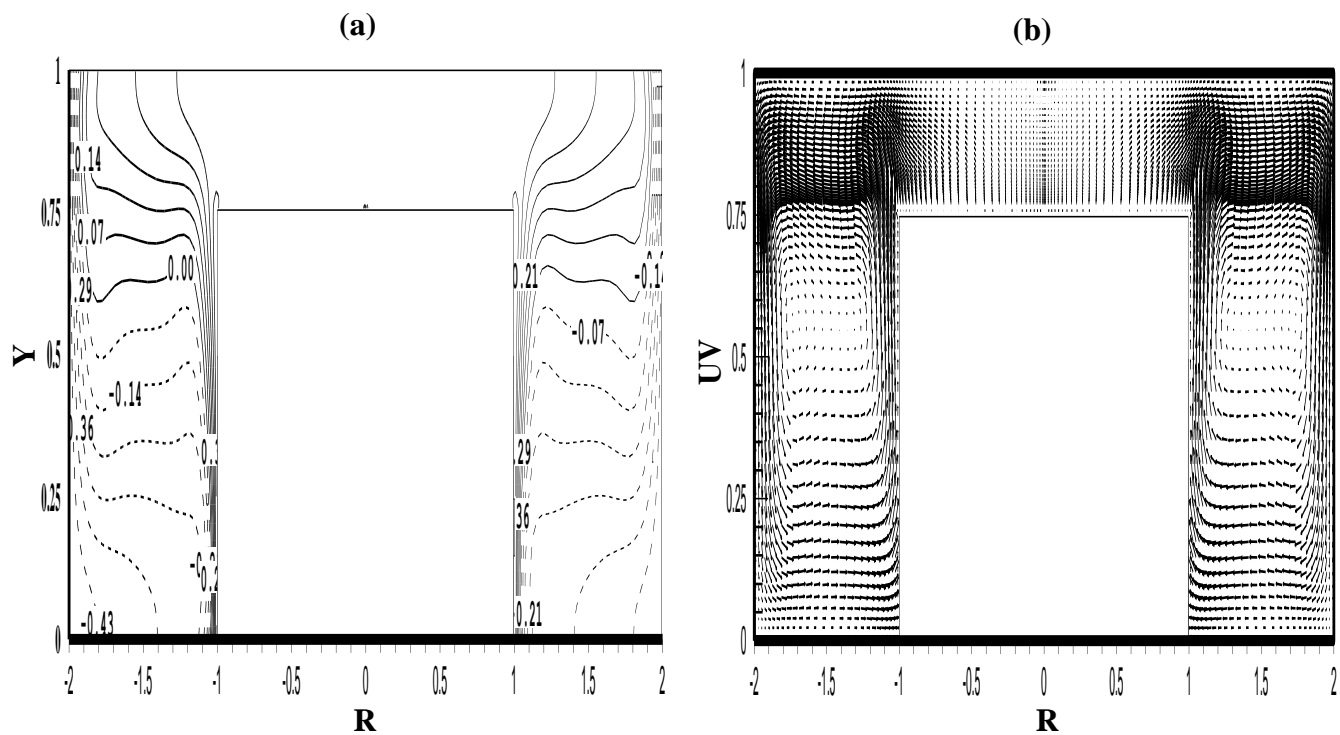


Fig.III.7: Isotherme (a) et champ de vitesses (b) pour $X=0.75$
($Ra=10^5$, $K=2$, $Pr=7.0$)

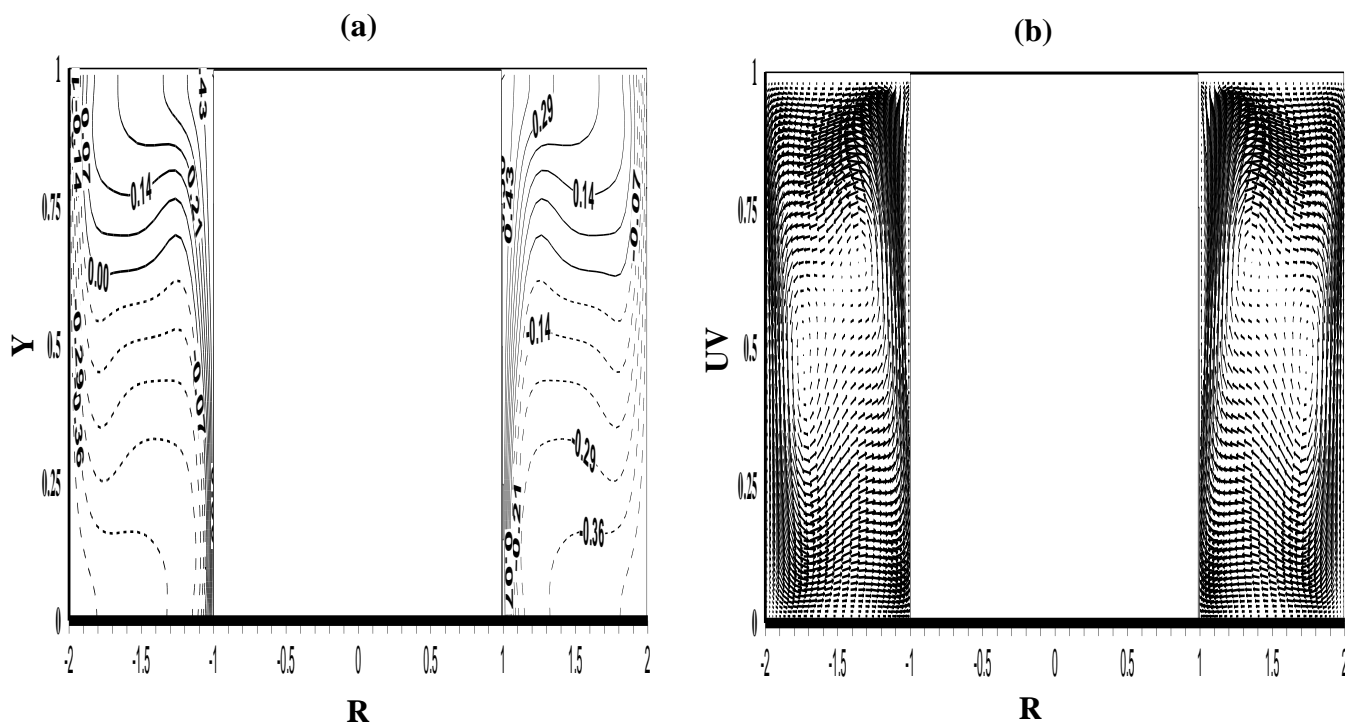


Fig.III.8: Isotherme (a) et champ de vitesses (b) pour $X=1$
($Ra=10^5$, $K=2$, $Pr=7.0$)

Lorsque $X=0,25$, on remarque un écoulement très animé dans la zone $(-1 \leq R \leq 1)$ qui provoque un échange thermique important (Fig.III.5-a). Par contre lorsque X croît ($0,25 < X < 0,75$), les isothermes ont tendance de s'éloigner de plus en plus dans la zone supérieure du cylindre intérieur $(-1 \leq R \leq 1)$, ce qui traduit une diminution du gradient de température dans cette zone (Fig.III.6.a). Lorsque $X=0,75$ (Fig.III.7.a), on remarque une stratification de température verticale dans la zone $1 \leq R \leq 2$ et $-2 \leq R \leq -1$, et un gradient nul dans la zone au-dessus du cylindre intérieur. On constate que l'échange thermique convectif augmente avec l'augmentation de la hauteur, car en effet ce transfert de chaleur est animé par un gradient de température établi entre les deux cylindres.

Concernant les vitesses, on a vu que pour un rapport de hauteurs compris entre 0.0 et 0.5, les vitesses s'accroissent de plus en plus dans la zone $-1 \leq R \leq 1$ (Fig.III.4-b) et (Fig.III.5-b), mais lorsque X augmente de 0.75 jusqu'à 1, les particules de fluide s'accroissent totalement dans la partie $-2 \leq R \leq -1$ et $1 \leq R \leq 2$ et elles sont presque nulles dans la zone $-1 \leq R \leq 1$ (Fig.III.7-b) et (Fig.III.8-b)

- **Profils des températures et des vitesses:**

Les profils de température à $Y=0.8$ pour les faibles rapports de hauteurs ($X=0$ et $X=0.25$) montre également l'existence d'un gradient de température important au centre de la cavité $(-1 \leq R \leq 1)$. Ce flux de chaleur est verticale est intense au niveau de la paroi isotherme chaude et au fur et à mesure que la hauteur du cylindre intérieur augmente et on s'approche de la paroi supérieure adiabatique ($0.5 \leq X \leq 1$) le gradient de température s'annule car le flux de chaleur s'effectue principalement au niveau de la zone comprise dans l'intervalle $1 < R < 2$ et symétriquement $-2 < R < -1$.

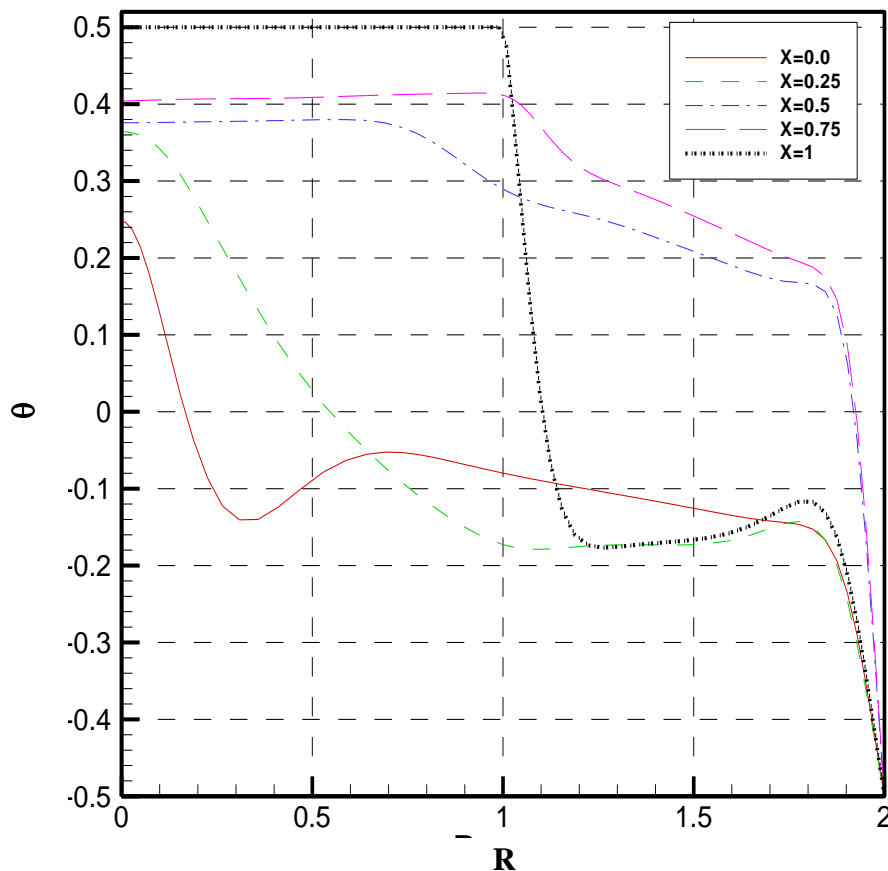


Figure (III.9): profil de la température statique à $Y=0.8$, $Ra=10^5$, $K=2$ pour différents rapports de hauteurs (X).

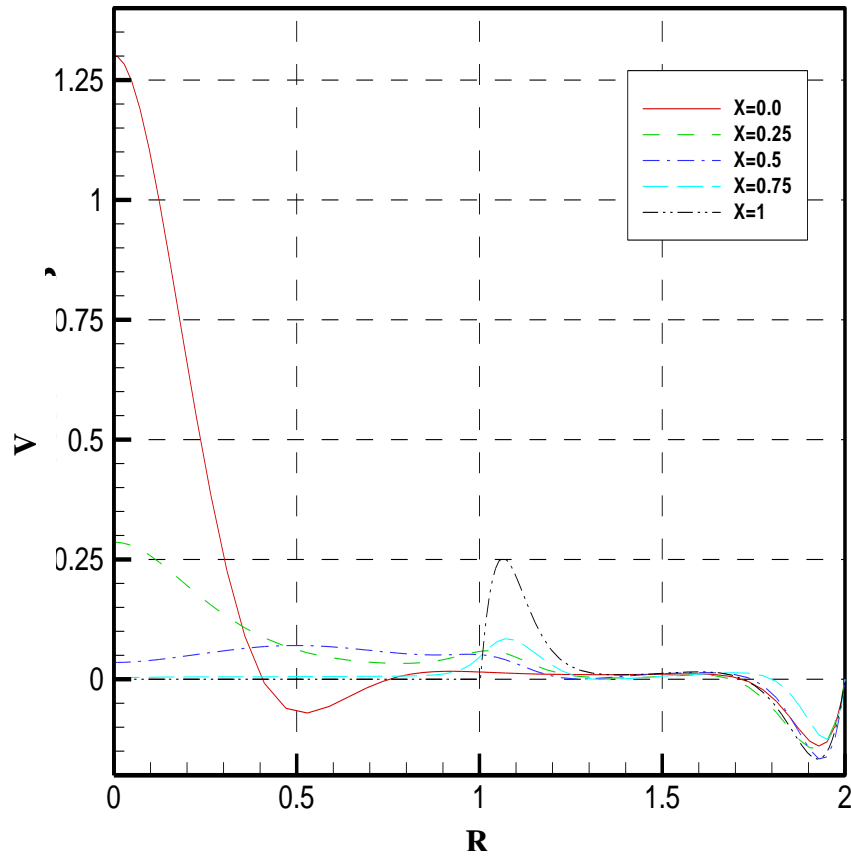


Figure (III.10): profil de la vitesse moyenne (V) à $Y=0.8$, $Ra=10^5$, $K=2$ pour différents rapports de hauteurs (X).

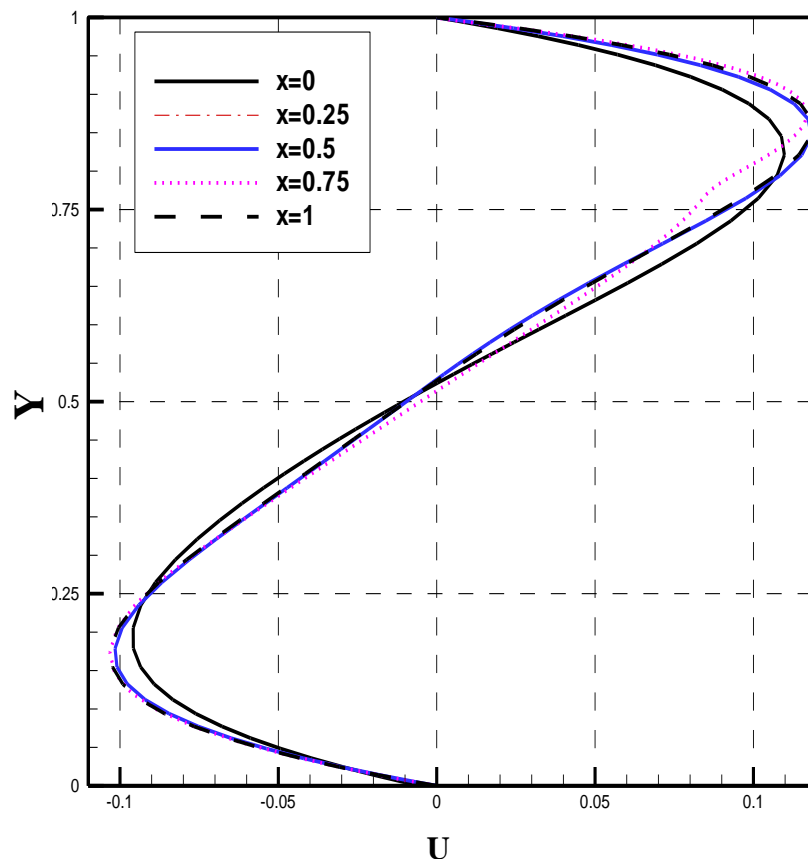


Figure (III.11): profil de la vitesse moyenne (U) à $R=1.65$, $Ra=10^5$, $K=2$ pour différents rapports de hauteurs (X).

Les profils de vitesses verticale (V) à $Y=0.8$ Fig (III.10), montre clairement que plus le rapport de hauteur augmente (X) les vitesses de l'écoulement ascendant, au-dessus du cylindre intérieur, s'affaiblie ($-1 \leq R \leq 1$) et à l'extérieur de cette zone, les particules sont lentes.

Les profils de vitesses horizontales (U) à $R=1.65$ Fig (III.11), montre que l'écoulement près des deux parois horizontale adiabatiques évolue peu avec la variation de rapport de hauteur (X) et conserve la même allure pour différentes valeurs de X

- **Transfert de chaleur:**

La figure (III.12) montre l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes valeurs de hauteurs X.

Nous remarquons que pour des valeurs croissantes de X le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de Ra ($10^3 \leq Ra \leq 10^6$), sauf lorsque $X=0.5$ dans un régime bien développé $10^4 \leq Ra \leq 10^6$, on remarque que le transfert de chaleur est maximum, car le cylindre intérieur contribue au transfert thermique à travers deux surfaces, celle de la paroi verticale ($S_1=2.\pi.r_i.h$) et celle de la paroi horizontale supérieure ($S_2=\pi.r_i^2$). L'effet de section horizontal est bien présent lorsque $0 \leq X \leq 0.5$, mais avec une surface verticale faible, et contrairement quand X augmente ($0.75 \leq X \leq 1$), la section horizontale, en s'approchant de la paroi adiabatique, devient de plus en plus isolé et ne contribue plus au transfert thermique car le fluide dans cette zone est immobile.

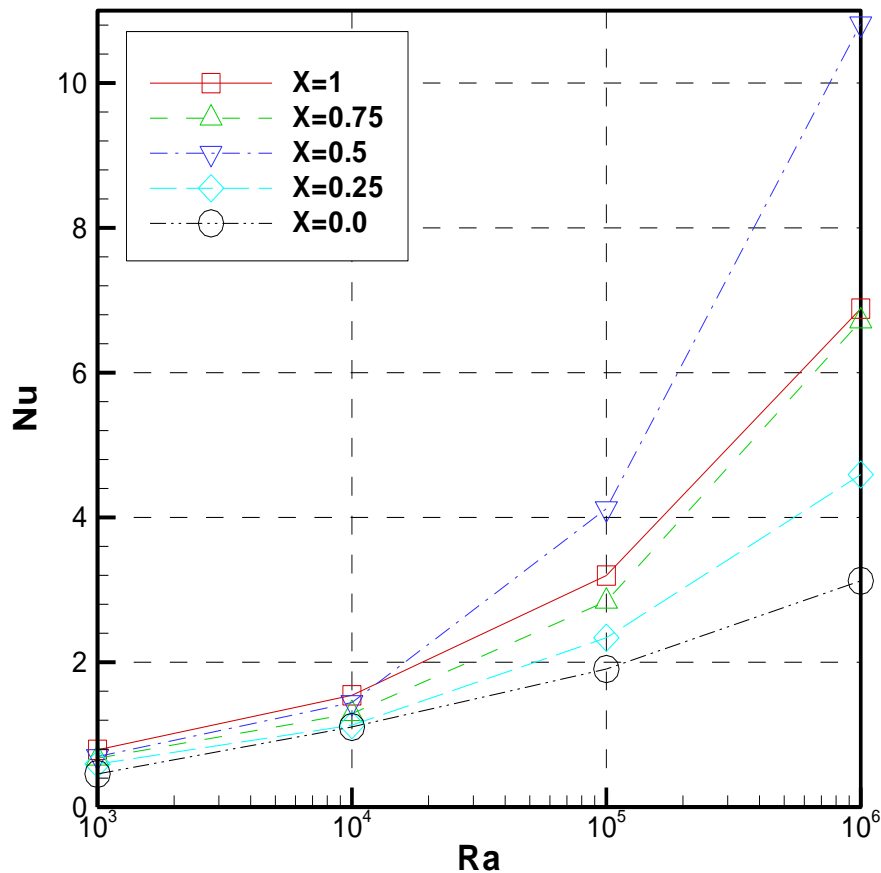


Fig.III.12: Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes valeurs X.

On peut voir ça clairement sur la figure (III.13) qui montre l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du rapport de hauteur X pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh

Il est évident que le transfert convectif croît avec l'accroissement du nombre de Rayleigh, mais nous avons un écoulement faible lorsque $Ra=10^3$ et $Ra=10^4$ et où le transfert convectif est faible car le nombre de Nusselt reste constant pour plusieurs valeurs de X , par contre lorsque les forces de poussée thermique deviennent plus importantes $Ra=10^5$ et $Ra=10^6$ l'augmentation du nombre de Nusselt est avec l'existence d'un maximum lorsque $X=0,5$.

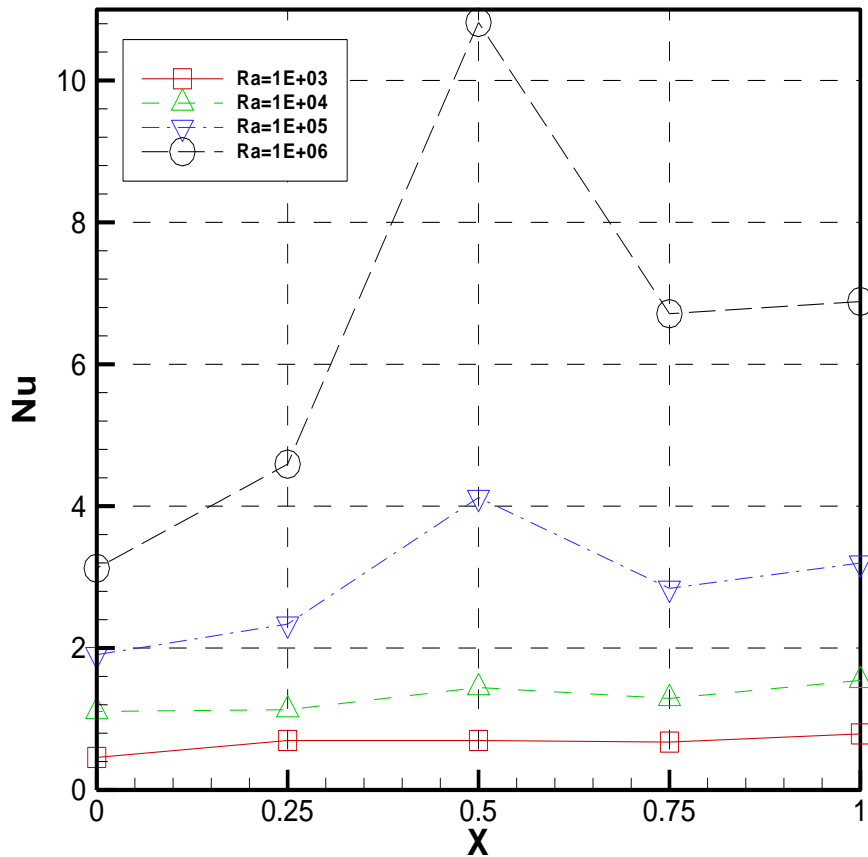


Fig.III.13: Nombre de Nusselt en fonction du rapport de hauteur X pour différentes valeurs Rayleigh

3.5. Influence du rapport de courbure:

Le rapport des rayons (K) est un nombre adimensionnel qui caractérise la géométrie de la cavité et qui représente le rapport du rayon du cylindre extérieur sur le rayon du cylindre intérieur.

- **Structure d'écoulement:**

Pour mettre en évidence l'effet du rapport des rayons des deux cylindres, nous avons considéré différentes valeurs de K entre 2 et 10 pour $Ra=10^5$, $X=0,5$, $Pr=7.0$.

En observant les isothermes de la figure (III.16.a), lorsque $K=2.0$, on constate que le flux de chaleur est horizontale, à travers les couches limites thermiques au niveau des deux parois verticales, ensuite il devient vertical descendant à travers une stratification verticale au fur et à

mesure qu'on s'approche du milieu ($R=1.5$) avec un gradient de température faible. Par contre lorsque le rapport de rayons augmente $K=5$ et $K=10$ Figure (III.14.a) et Figure (III.15.a), on remarque un gradient de température très important au niveau de la paroi chaude et un gradient de température plus faible au niveau de la paroi froide lorsque le rapport K augmente ce qui montre que le fluide s'échauffe mieux lorsque le rapport des rayons est faible ($K=2$).

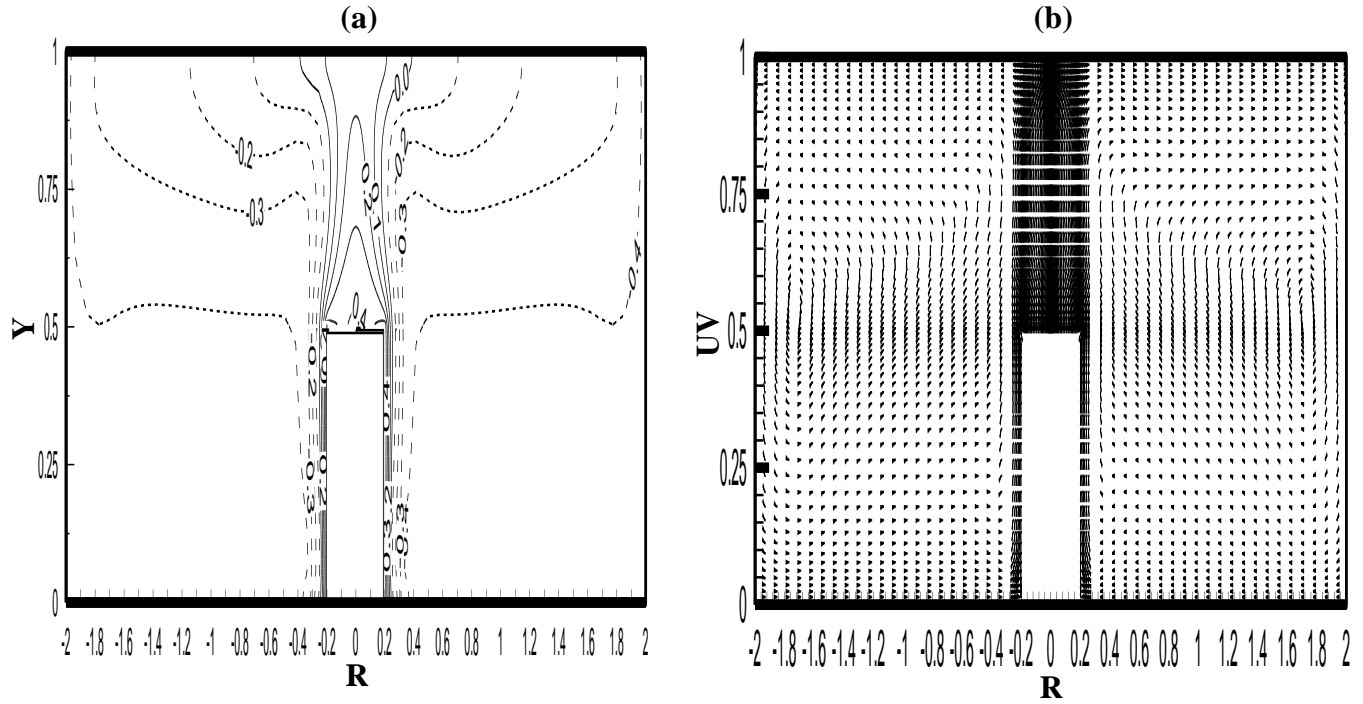


Fig.III.14: Isotherme (a) et champ de vitesses (b) pour $K=10$
($Ra=10^5$, $X=0.5$, $Pr=7.0$)

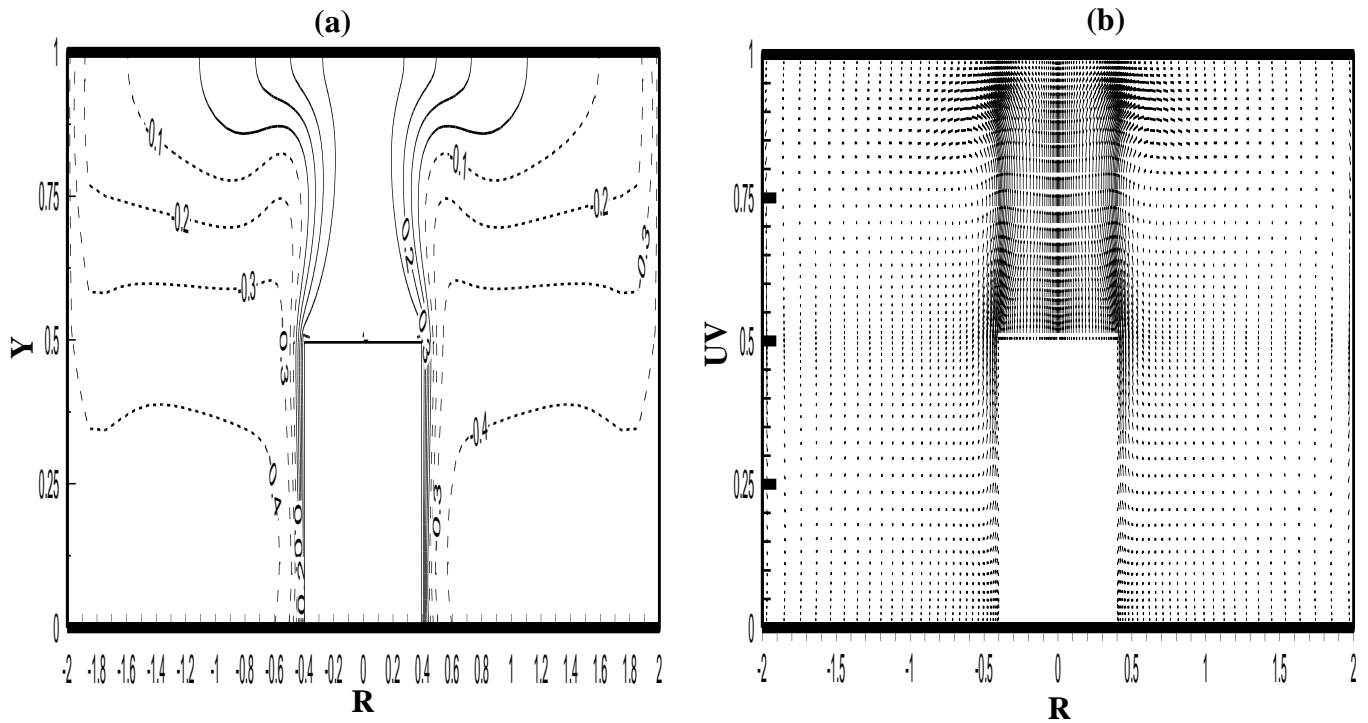
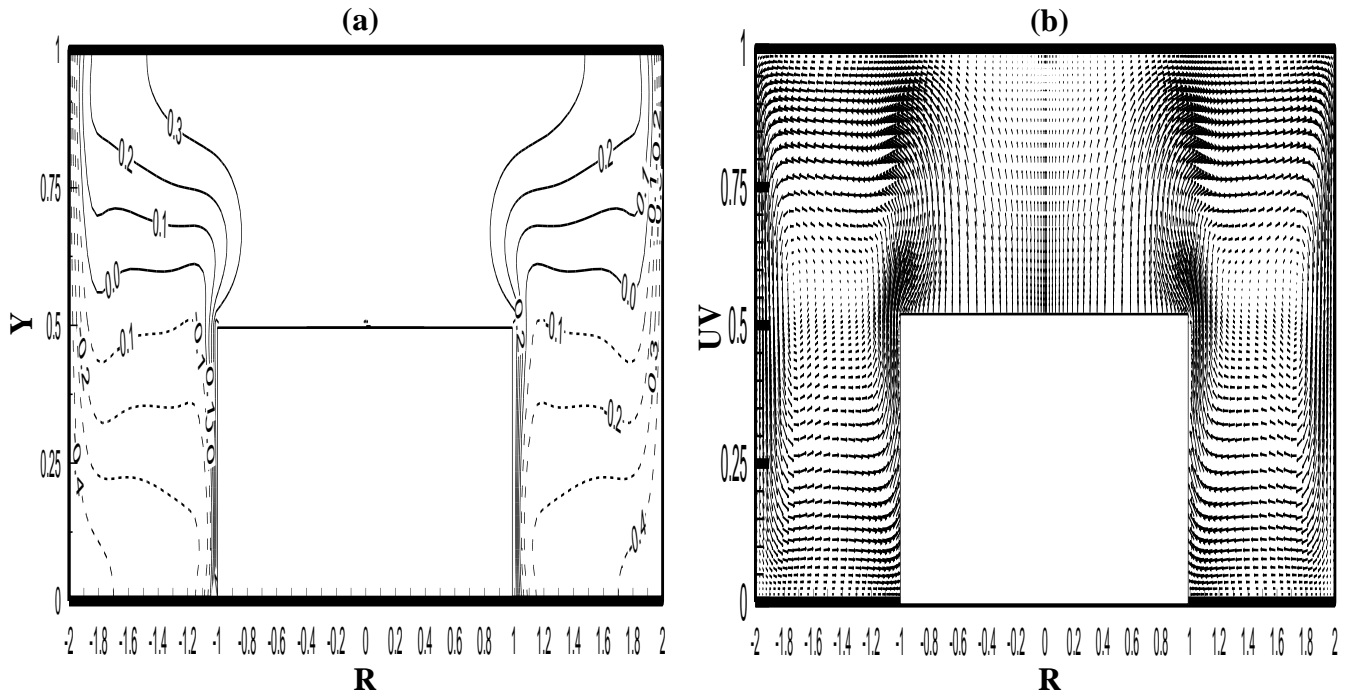


Fig.III.15: Isotherme (a) et champ de vitesses (b) pour $K=5$
($Ra=10^5$, $X=0.5$, $Pr=7.0$)



**Fig.III.16: Isotherme (a) et champ de vitesses (b) pour $K=2$
($Ra=10^5$, $X=0.5$, $Pr=7.0$)**

On peut voir également à travers la figure (III.16.a) qu'une zone isotherme s'installe au-dessus du cylindre intérieur au fur et à mesure que le rapport des rayons diminue.

- **Distribution de température et champ de vitesse pour différents nombres de Rayleigh:**

Nous avons étudié l'influence du rapport de rayons (K) sur la distribution de température et le champ de vitesse. Pour chaque valeur du rapport de rayons nous avons fixé le rapport de hauteur (X) à 0.5 et nous avons fait varier le nombre de Rayleigh de 10^3 à 10^6 , pour un nombre de Prandtl=7,0.

Dans les figures (III.17), (III.18) et (III.19) des structures d'écoulement et des champs de température sont obtenus pour mettre en évidence les effets du nombre de Rayleigh et le rapport des rayons $K=r_o/r_i$.

Pour les faibles valeurs du nombre de Rayleigh ($Ra=10^3$), l'écoulement généré par le gradient de température entre les deux parois isothermiques, dans tout les cas où $K=2, 5, 10$ l'écoulement est faible et conduit à un transfert de chaleur en régime conductif (Fig.III.17a,18a,19a). Mais, lorsque le nombre de Rayleigh augmente au delà de $Ra=10^4$, le gradient de température est assez puissant pour provoquer un écoulement convectif. Effectivement, on voit sur la figure (III.22b), pour $Ra=10^4$ et $K=2$ un écoulement ascendant accéléré au niveau de la paroi chaude et descendant lent près de la paroi froide du cylindre en formant un fort gradient thermique près de la paroi chaude et faible près de la paroi froide.

Lorsque K augmente on constate que les isothermes sont très serré au niveau de la paroi chaude et plus en plus séparé au niveau de la paroi froide Fig (III.17) et Fig. (III.17).

a) cas rapport de courbure égale à 10:

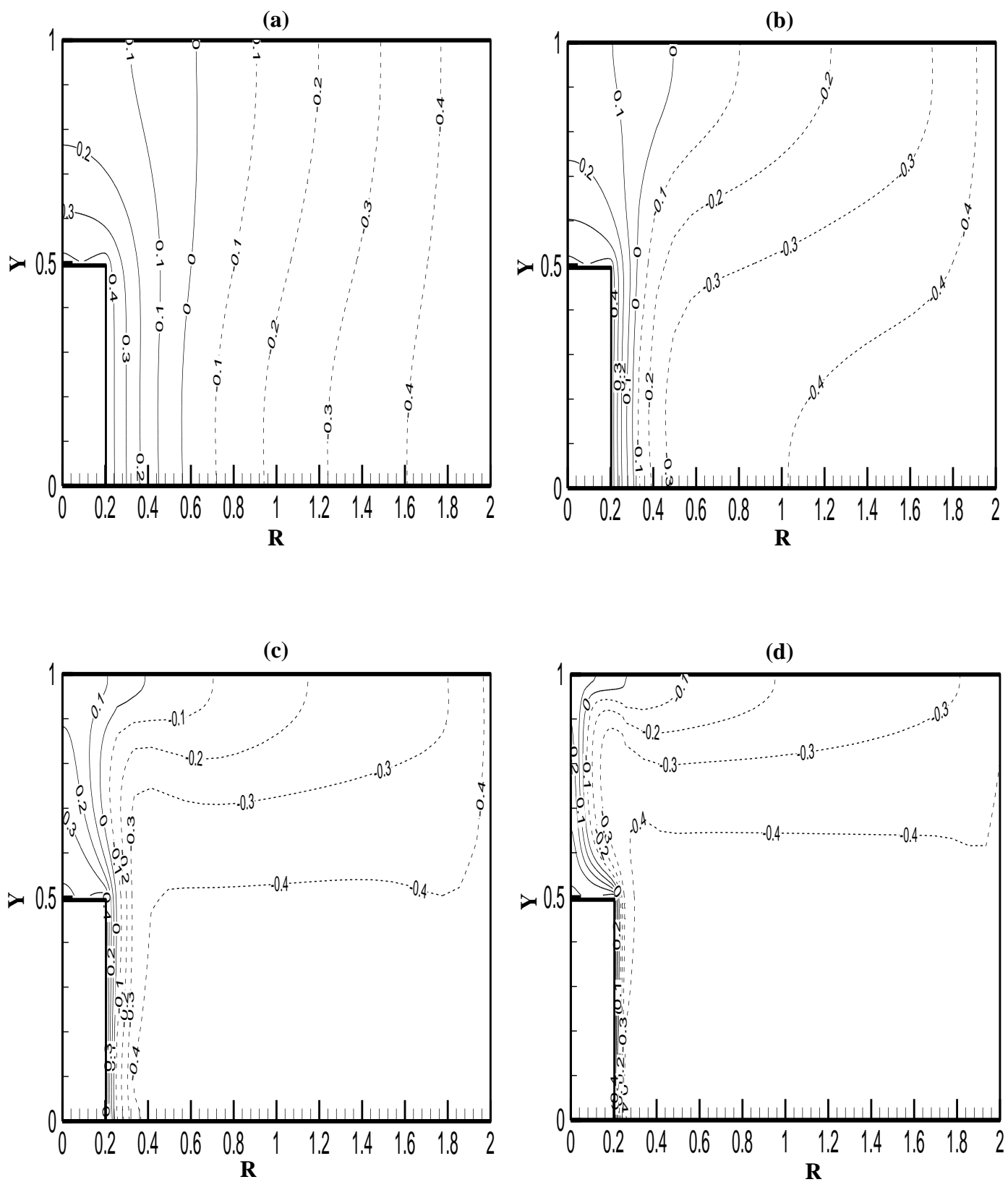


Fig.III.17: Effet du nombre de Rayleigh sur le champ de température
 $Ra=10^3$ (a), $Ra=10^4$ (b), $Ra=10^5$ (c), $Ra=10^6$ (d)
 ($K=10$, $X=0.5$, $Pr=7.0$)

b) cas rapport de courbure égale à 5:

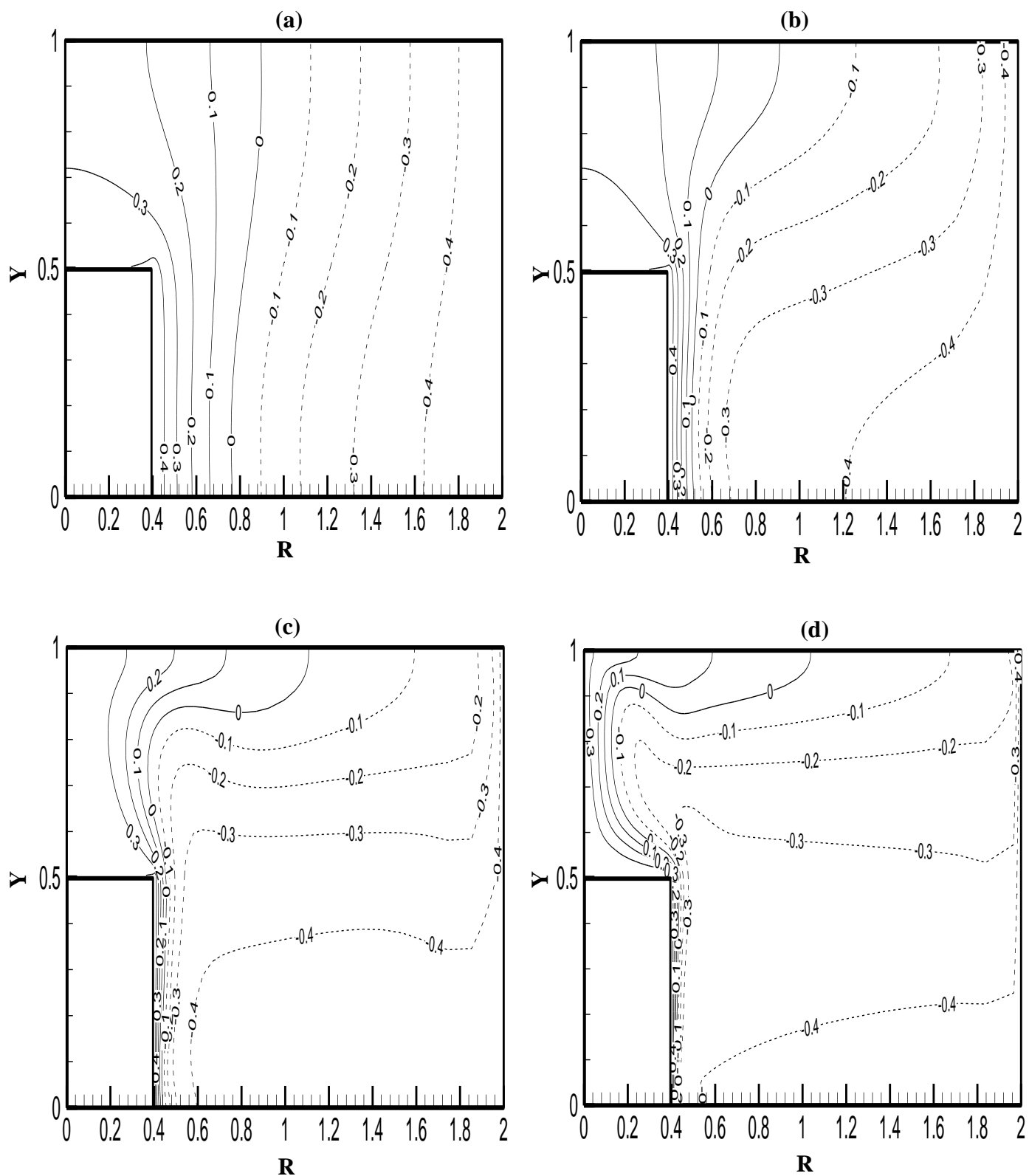


Fig.III.18: Effet du nombre de Rayleigh sur le champ de température
 $Ra=10^3$ (a), $Ra=10^4$ (b), $Ra=10^5$ (c), $Ra=10^6$ (d)
 ($K=5$, $X=0.5$, $Pr=7.0$)

c) cas rapport de courbure égale à 2:

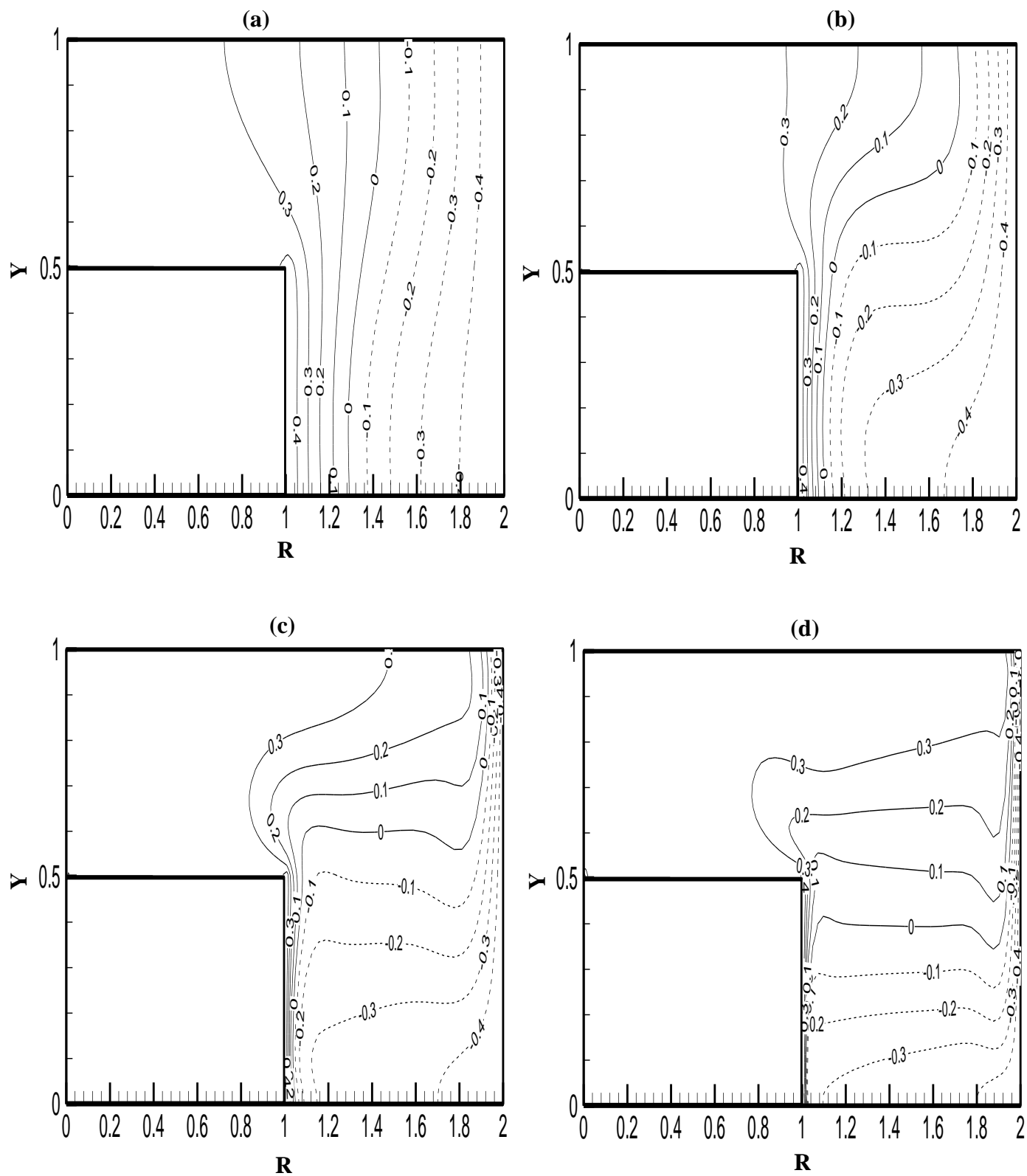


Fig.III.19: Effet du nombre de Rayleigh sur le champ de température
 $Ra=10^3$ (a), $Ra=10^4$ (b), $Ra=10^5$ (c), $Ra=10^6$ (d)
 $(K=2, X=0.5, Pr=7.0)$

d) cas rapport de courbure égale à 10:

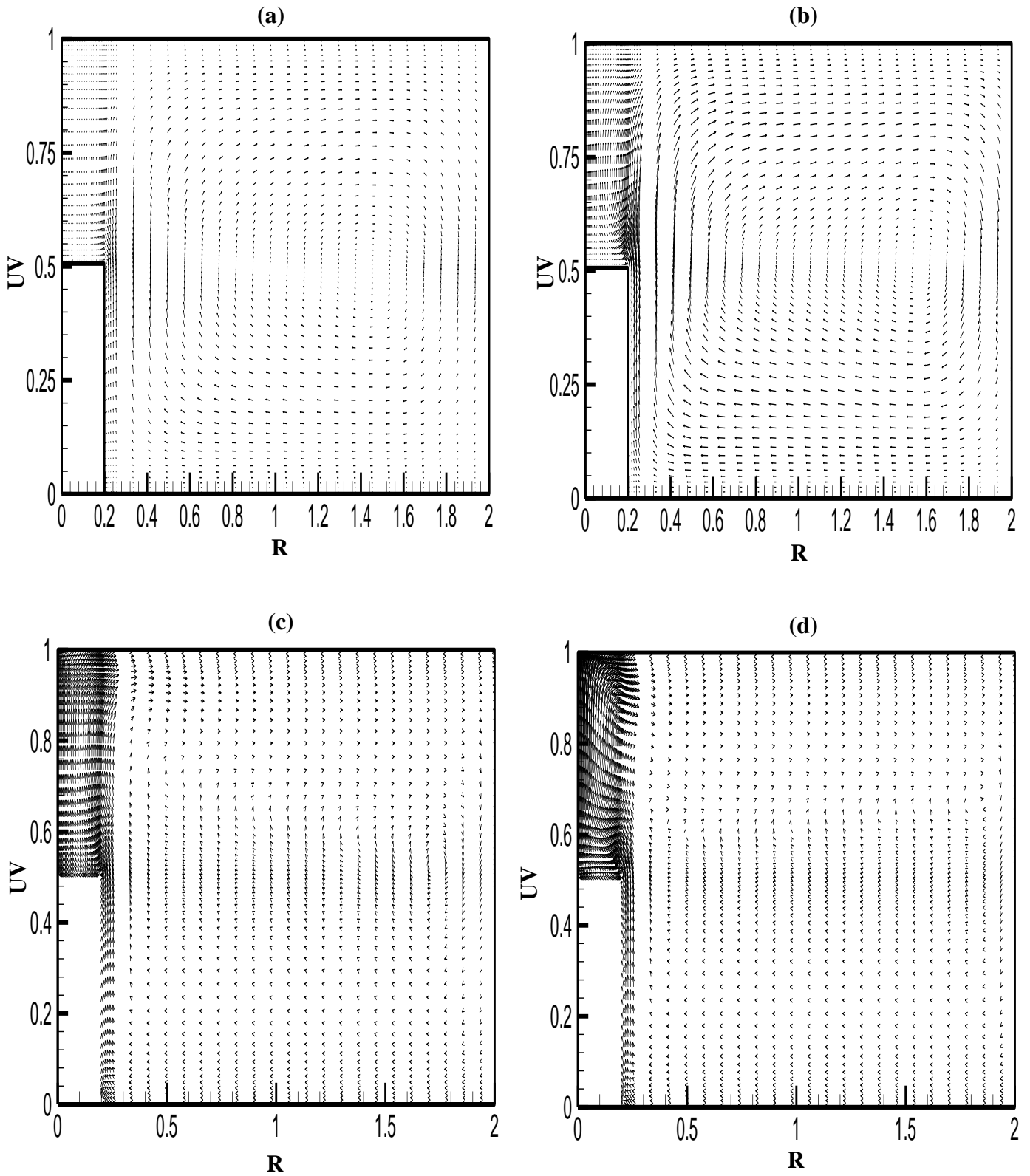


Fig.III.20: Effet du nombre de Rayleigh sur le champ de vitesse
 $Ra=10^3$ (a), $Ra=10^4$ (b), $Ra=10^5$ (c), $Ra=10^6$ (d)
 (K= 10, X =0.5, Pr=7.0)

e) cas rapport de courbure égale à 5:

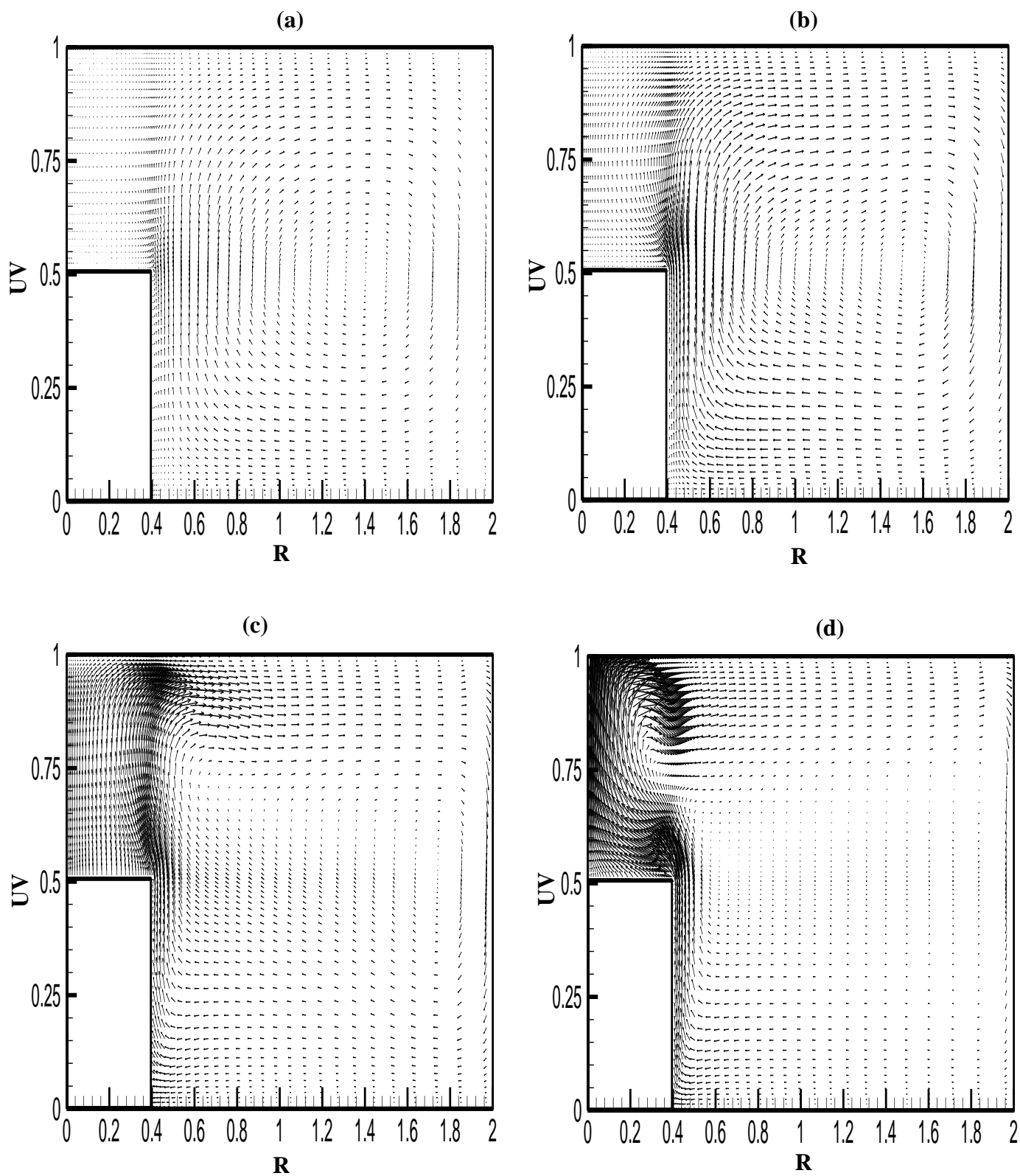


Fig.III.21: Effet du nombre de Rayleigh sur le champ de vitesse
 $Ra=10^3$ (a), $Ra=10^4$ (b), $Ra=10^5$ (c), $Ra=10^6$ (d)
 ($K=5$, $X=0.5$, $Pr=7.0$)

f) cas rapport de courbure égale à 2:

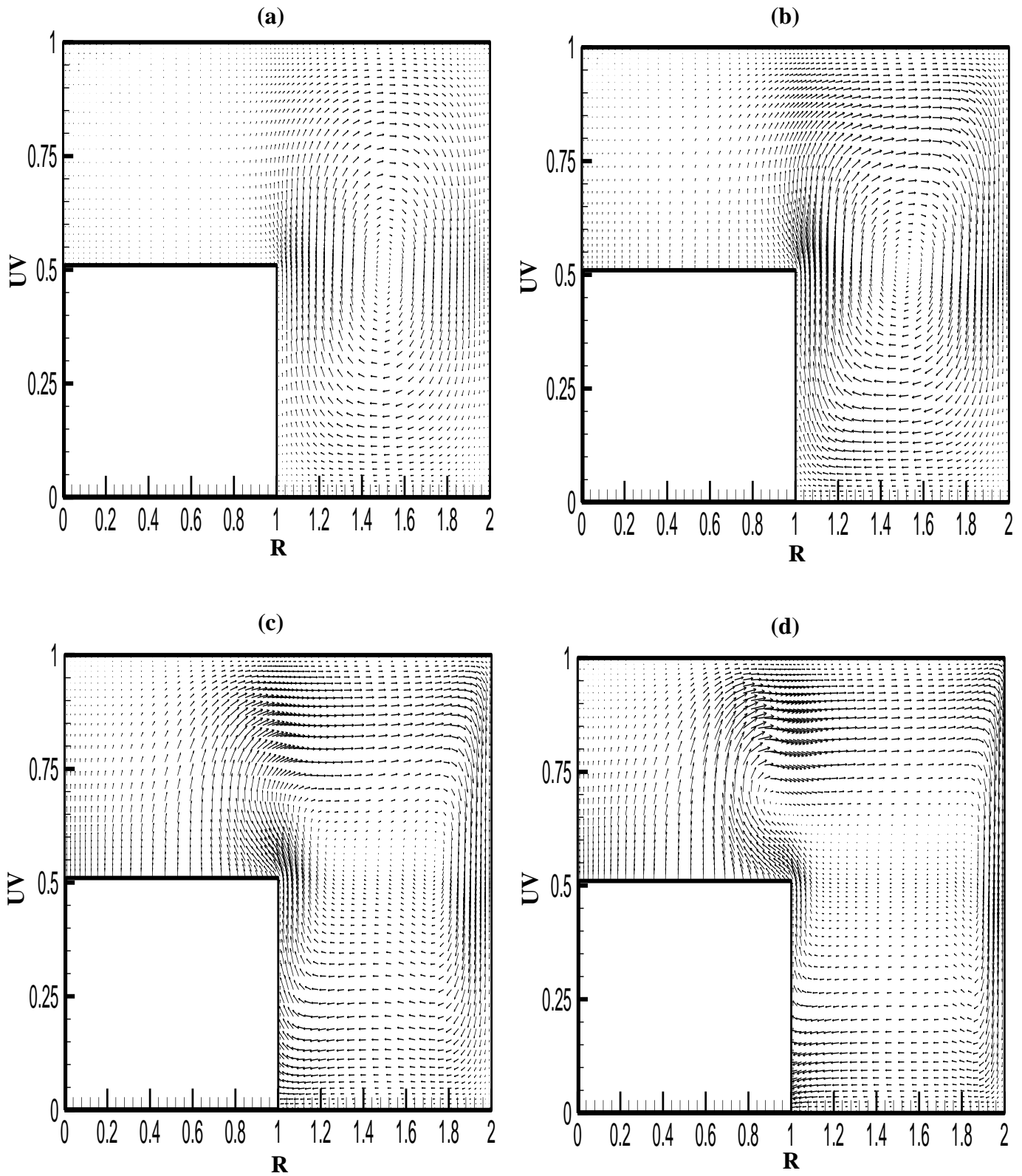


Fig.III.22: Effet du nombre de Rayleigh sur le champ de vitesse
 $Ra=10^3$ (a), $Ra=10^4$ (b), $Ra=10^5$ (c), $Ra=10^6$ (d)
 ($K=2$, $X=0.5$, $Pr=7.0$)

- **Profils des températures et des vitesses:**

Les profils de température à $Y=0.8$ pour différents rapports de rayons (K) montre que la température décroît avec l'augmentation du rapport K , cette diminution est différente en trois zones: ($0 \leq R \leq 0.7$) la température diminue sauf pour $K=2$, car la paroi supérieure du cylindre intérieur est assez grande pour imposer une zone isothermique entre les deux parois supérieures des deux cylindres. Pour $K=5$ et 10 le gradient de température est constant (même pente). Pour $0.7 \leq R \leq 1.85$, la diminution de température est lente qui traduit l'existence d'un gradient de température faible et constant pour les trois valeurs de $K=2, 5$ et 10 . Pour $1.85 \leq R \leq 2$, une chute rapide de la température explique la présence d'un gradient de température important près de la paroi froide, par contre ce gradient de température est inversement proportionnelle au rapport des rayons K , c'est-à-dire que le gradient de température est important lorsque K est faible.

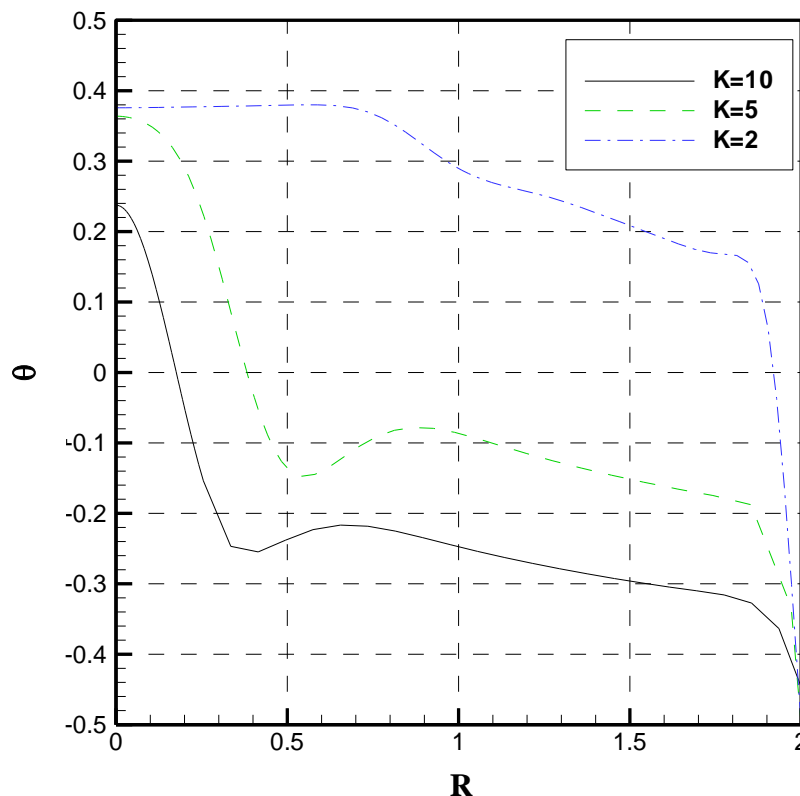


Fig III.23: profil de la température statique à $Y=0.8$, $Ra=10^5$, $X=0.5$ pour différents rapports de courbures (K).

Les profils de vitesses verticale (V) à $Y=0.8$ Fig. (III.24), montre clairement que plus le rapport des rayons augmente (K) les vitesses de écoulement ascendant au niveau de l'axe de symétrie s'accroissent et atteignent une valeur maximale égale à 0.35 pour $K=10$ ($-0.5 \leq R \leq 0.5$) et par contre à l'extérieure de cette zone près de paroi froide $R=2$ les particules de l'écoulement descendant sont lentes et décroissent avec la croissance de rapport de rayons, cela est due à la conservation de quantité de mouvement et de l'inégalité des surfaces des parois isothermiques.

Les profils de vitesses horizontales (U) à $R=1.65$ Fig. (III.25), on constate que pour $K=5$ la vitesse est maximale $U \sim 0.17$ près de la paroi adiabatique supérieure et $U \sim -0.15$ près de la paroi adiabatique inférieure, par contre pour $K=2$ les vitesses diminuent et atteignent une valeur minimale pour $K=10$, $U \sim 0.09$ pour $H \sim 0.85$. Cela, peut être expliqué par la transition d'un écoulement accéléré ascendant pour un fort rapport K vers un écoulement lent descendant pour un fort rapport K .

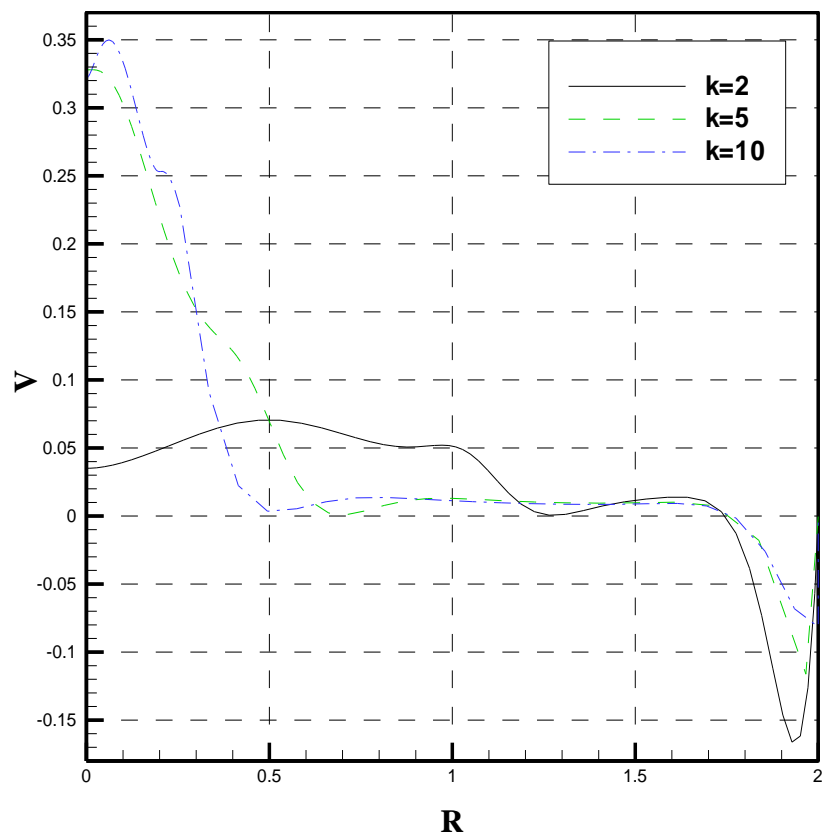


Fig III.24: profil de la vitesse moyenne (V) à $Y=0.8$, $Ra=10^5$, $X=0.5$ pour différents rapports de courbures (X).

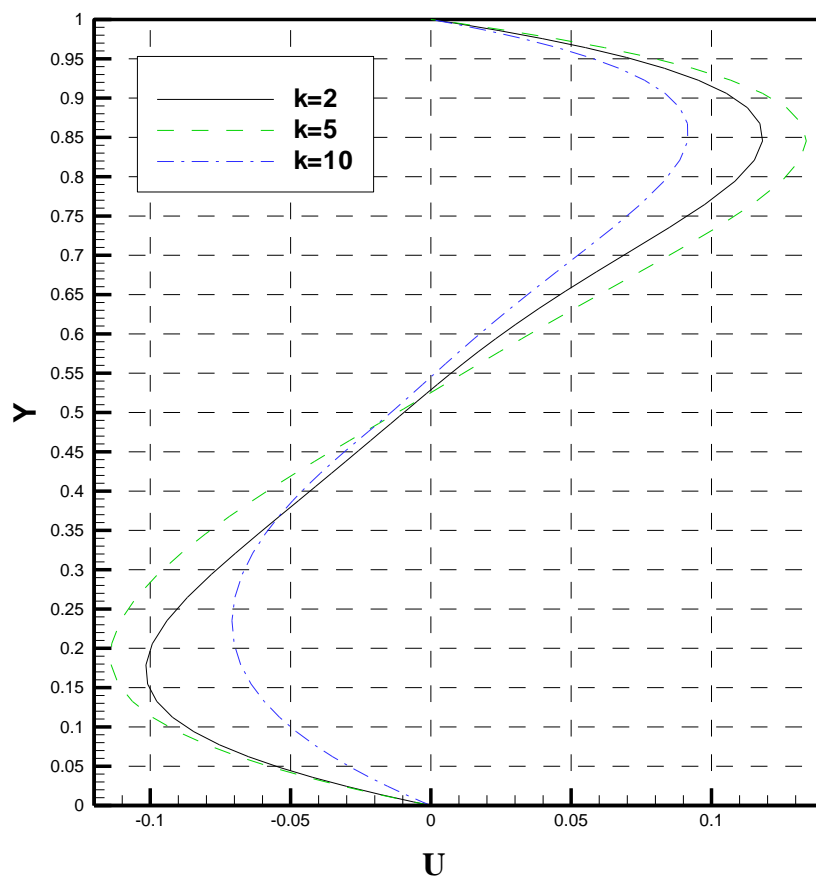


Fig III.25: profil de la vitesse moyenne (U) à $R=1.65$, $Ra=10^5$, $X=0.5$ pour différents rapports de courbures (K).

- Transfert de chaleur:

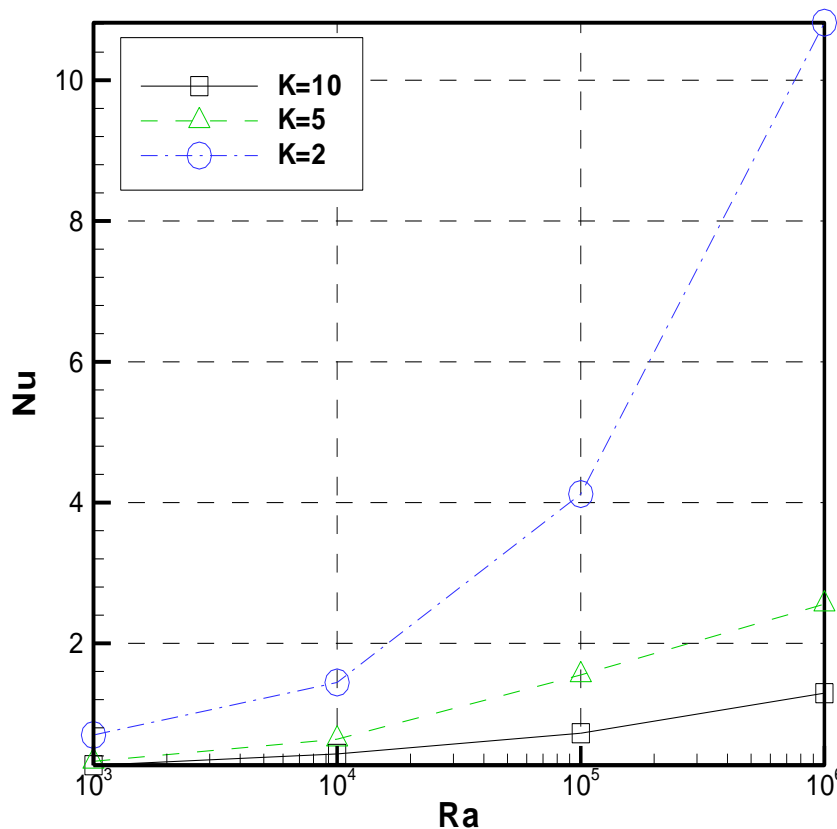


Fig III.26: Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh pour différentes valeurs K .

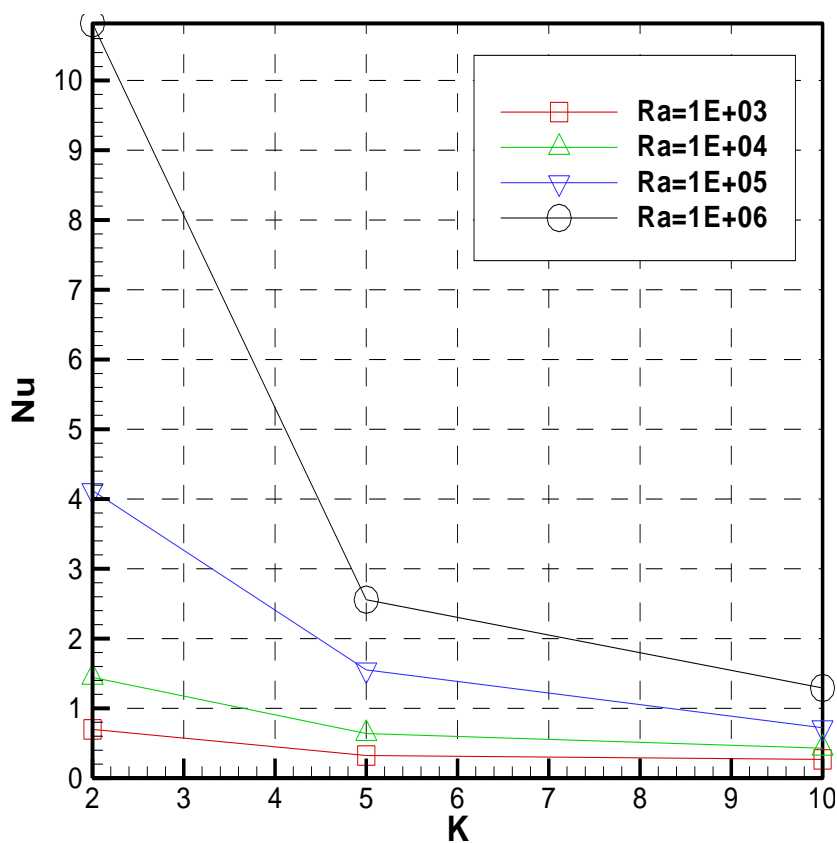


Fig.III.27: Nombre de Nusselt en fonction du rapport de courbure K pour différentes valeurs Rayleigh

La figure (III.26) montre l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh. Nous remarquons que pour toutes les valeurs de K , le transfert de chaleur augmente lorsque le nombre de Rayleigh augmente. Donc, il est évident que plus la surface chauffée augmente, plus le transfert de chaleur devient important.

La figure (III.27) représente le transfert de chaleur en fonction du rapport des rayons K . Nous remarquons que le nombre de Nusselt décroît avec l'augmentation de K cela signifie que le transfert de chaleur diminue lorsque la surface de la paroi chaude diminue (augmentation de K) et cela pour n'importe quelle valeur du nombre de Rayleigh.

3.6. Etude de la convection naturelle en régime instationnaire:

Après avoir étudié la convection naturelle en régime stationnaire, il nous à semblé intéressant de voir l'évolution des structures d'écoulements et du champ de température au cours du temps. Nous avons donc choisi un cas d'écoulements où les forces des volumes thermiques sont bien développées $Ra=10^5$. Nous analysons les résultats uniquement du point de vue quantitatif.

Nous considérons un écoulement de convection dont le nombre de Rayleigh thermique $Ra=10^5$, par ailleurs nous gardons toujours $Pr=7$, $X=0.5$, $K=2$.

Initialement, le fluide à l'intérieur de la cavité est immobile. Nous avons présenté les résultats enregistrés au cours du temps sur la figure (III 28).

Dans les premier pas de temps l'écoulement est faible et dominé par la conduction thermique. Lorsqu'on avance dans le temps, le transfert de chaleur qui s'effectue par conduction au niveau des parois isothermes de la cavité, à travers une stratification de température, verticale près de la paroi horizontale du cylindre intérieur et verticale près des parois vertical de la cavité. La stabilité de écoulement est perturbé par un écoulement chaud provenant du milieu de la cavité (cylindre intérieur), ressemblants à une vague thermique qui vient balayer ces isothermes immobiles et repousse le fluide froid pour être remplacé par le fluide chaud.

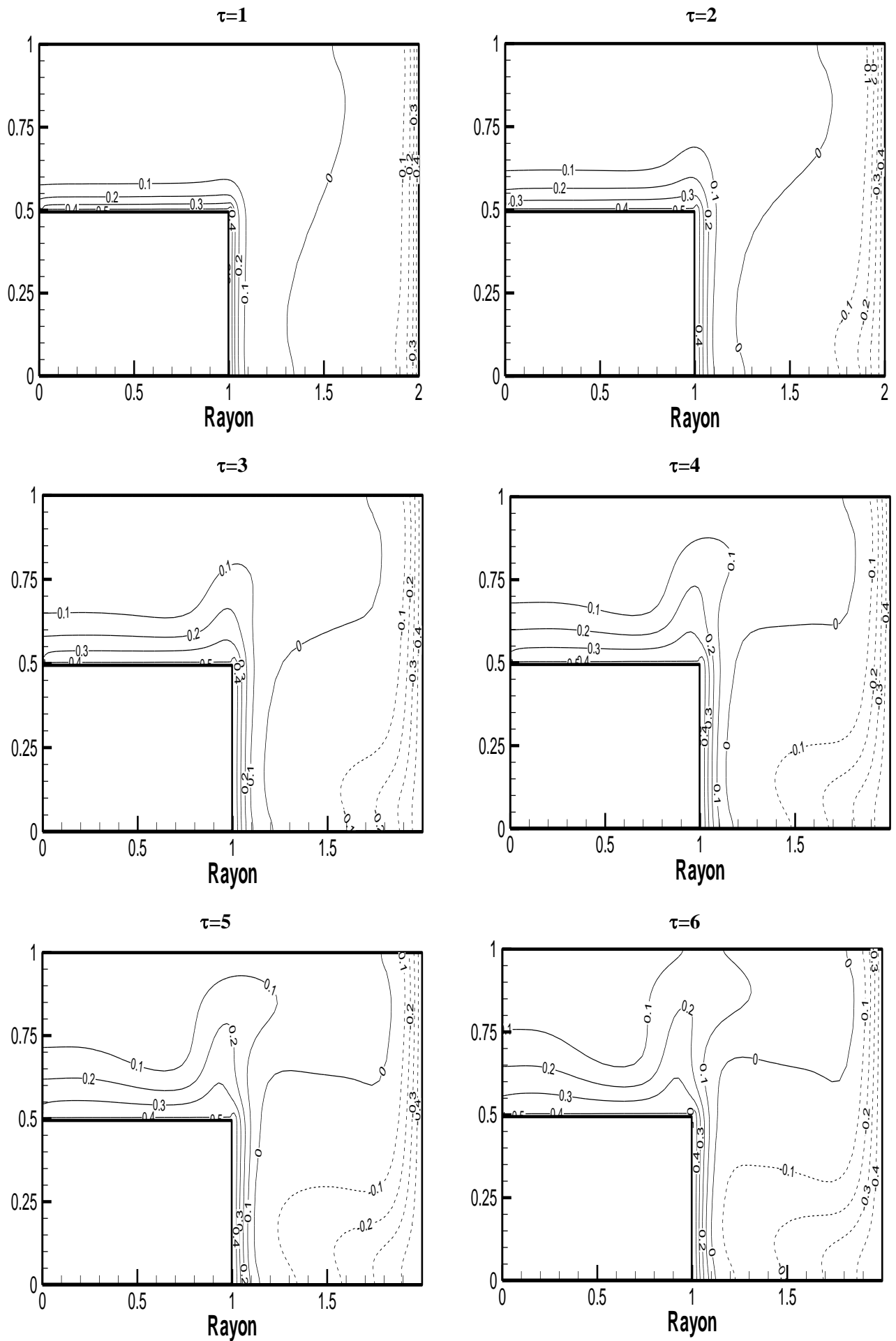
Au fur et a mesure qu'on avance dans le temps on remarque un gradient très important au niveau des parois chaude et froide, les isothermes qui sont près de la paroi verticale extérieur progressent vers la paroi chaude jusqu'à l'arrivé a un état stationnaire où on ne remarque aucun changement avec l'évolution du temps.

- **Profils des températures et des vitesses:**

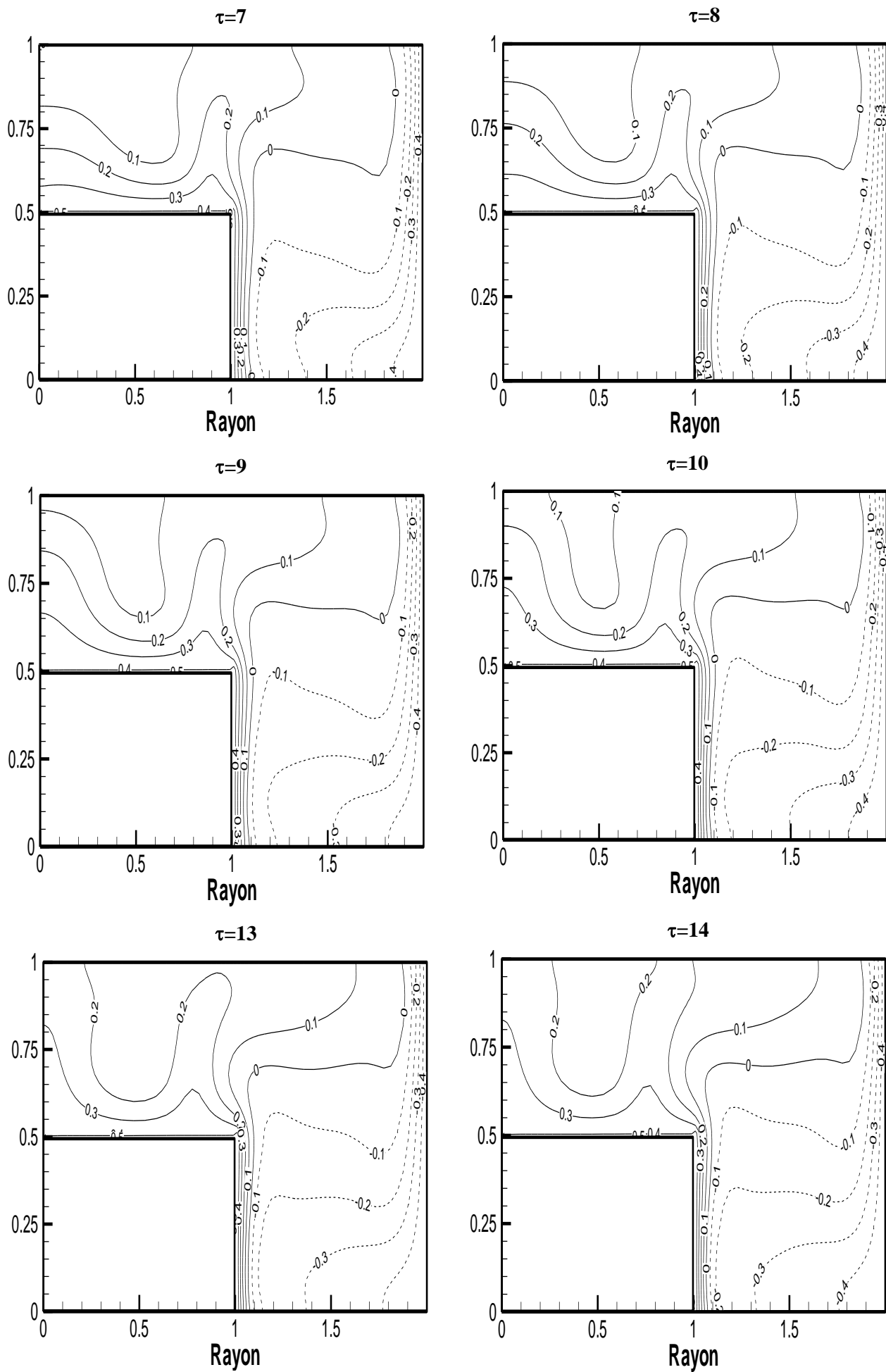
Dans cette partie nous analysons, en régime instationnaire, la température et la vitesse horizontale (U) et vertical (V) au milieu de la cavité en fonction du temps.

La figure (III.31) montre l'évolution de la température le long de la droite $Y=0.8$ pour différents pas de temps.

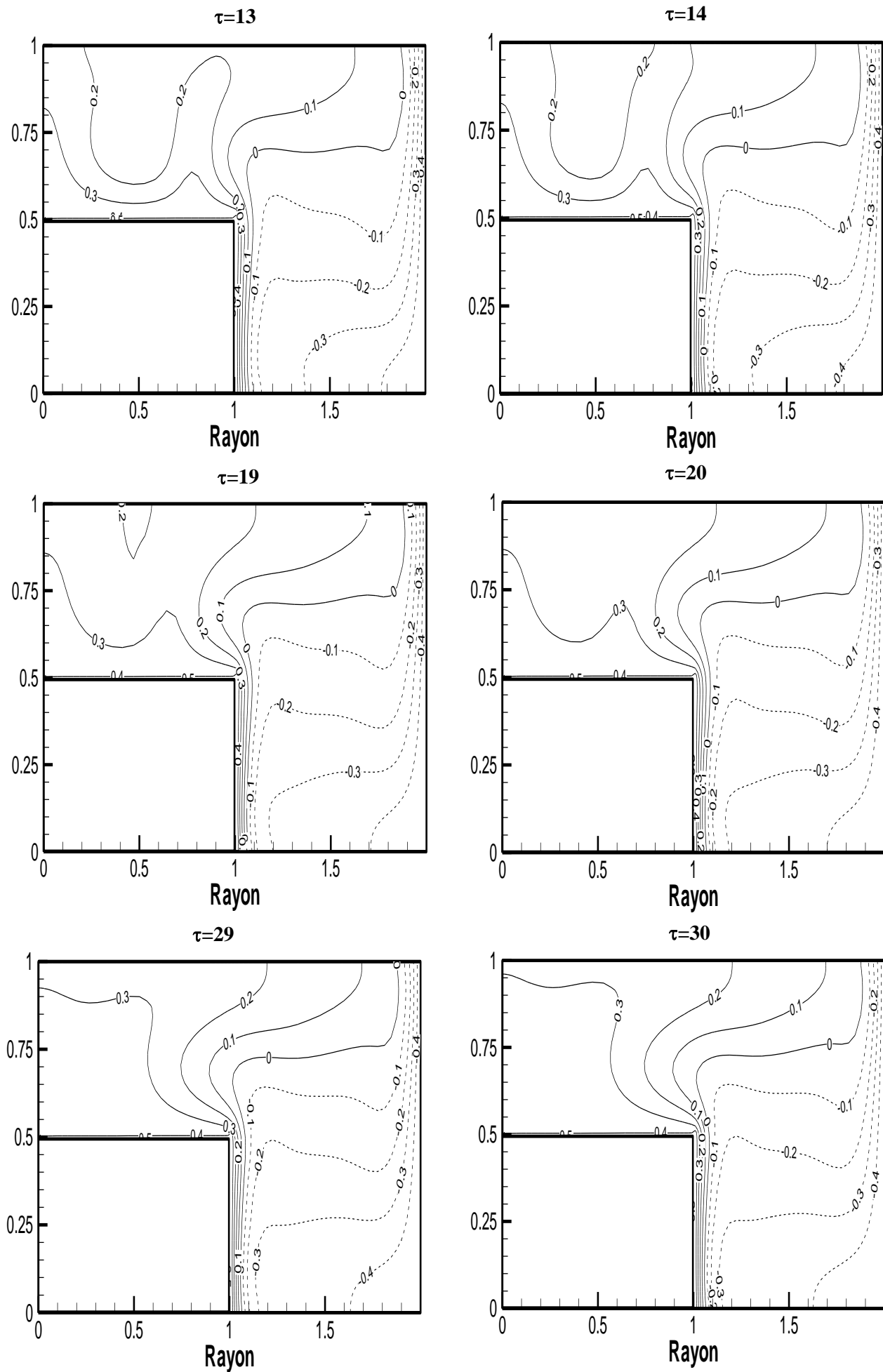
Nous remarquons dans les premiers instants que la température est constante (condition initiale). Lorsqu'on avance dans le temps, la température varie d'une façon importante dans la zone située au-dessus du cylindre intérieur, car cette zone est perturbée par le passage de la vague thermique qui la traverse au cours du temps, par contre on remarque que la zone situé à $R>1$, la température se stabilise rapidement vers l'état stationnaire car celle-ci n'est pas atteinte par la vague thermique. Lorsque $\tau=5$ la température à $R\sim 1$ est maximale par rapport à la température à l'axe de symétrie $R=0$ car la température au point $T(x, y)= (1, 0.8)$ est influencé par écoulement d'un fluide ascendant chauffé par la paroi vertical du cylindre intérieur, plus qu'on avance dans le temps, la température augmente plus en plus au niveau de l'axe symétrique cela est traduit par l'évolution des isothermes en fonction de temps figure (III.28).



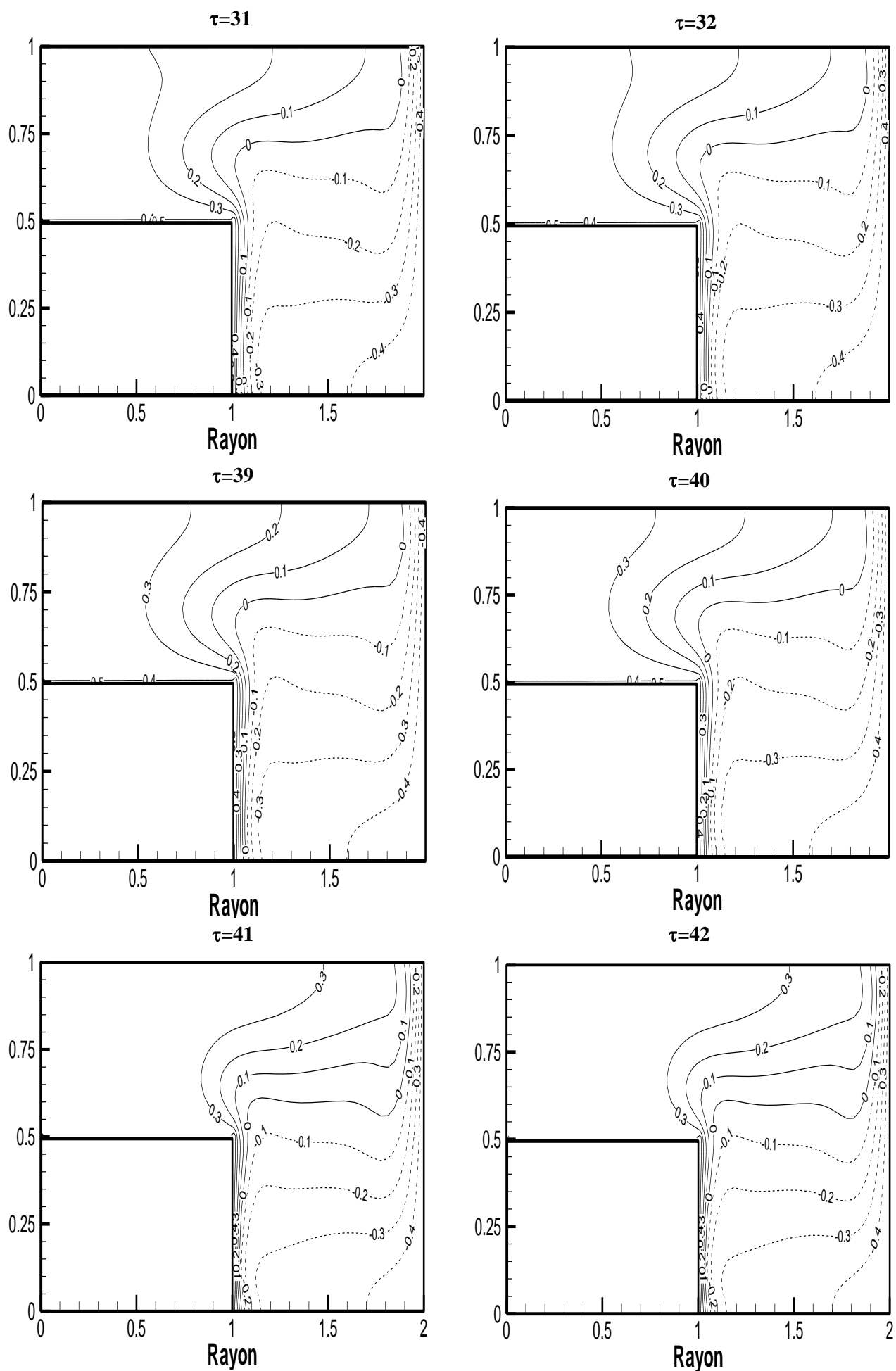
Suite de la figure (III.28)



Suite de la figure (III.28)



Suite de la figure (III.28)

fig III.28: les isothermes pendant 42 pas de temps pour $Ra=10^5$, $K=2$, $X=0.5$, $Pr=7$

- Comparaison des isothermes entre état stationnaire et instationnaire:

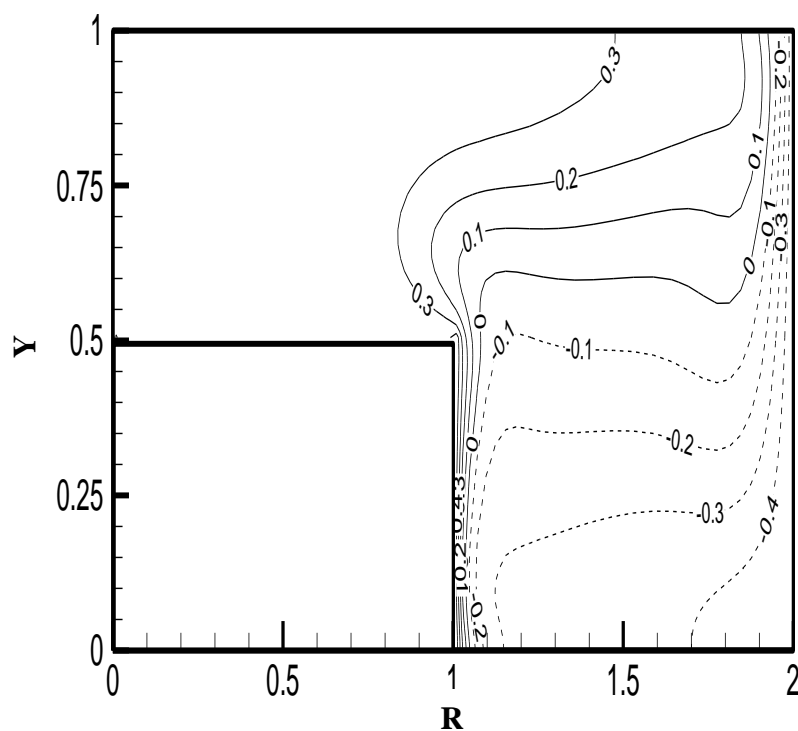


Fig. III.29: les isothermes après 42 pas de temps pour $Ra=10^5$, $K=2$, $X=0.5$, $Pr=7$

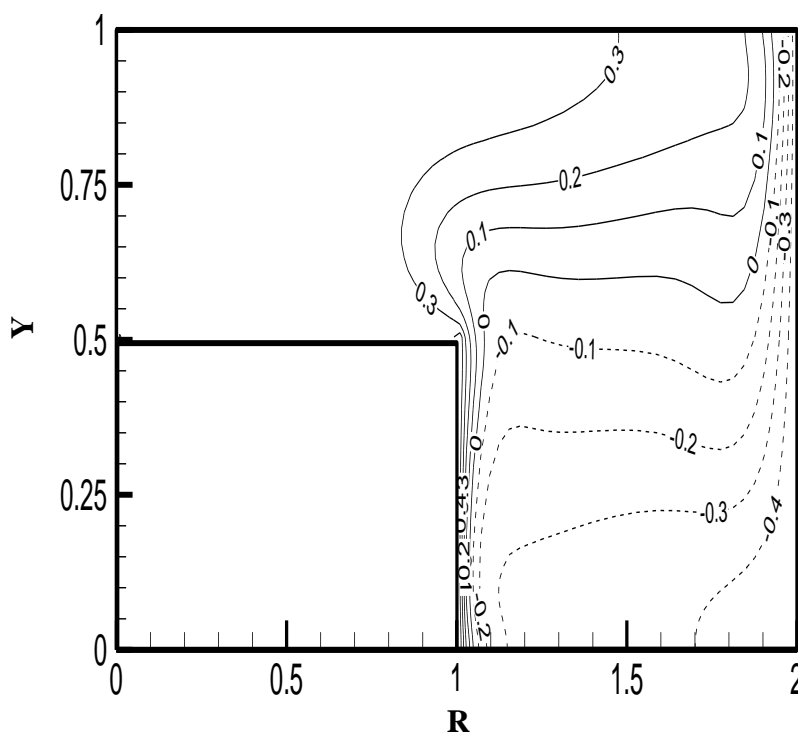


Fig. III.30: les isothermes à l'état stationnaire pour $Ra=10^5$, $K=2$, $X=0.5$, $Pr=7$

La figure (III.32) et figure (III.33) montre l'évolution des vitesses horizontales en fonction du la courbure pour différents pas de temps.

On constate que les vitesses sont faibles dans les premiers pas de temps c'est pour cela que l'écoulement est dominé par la conduction thermique. Lorsqu'on avance dans le temps, les vitesses croient est atteignent une valeur maximale $|U|=0.2$ figure (III.30) pour le cinquièmes pas de temps, après ce pas de temps les vitesses décroît jusqu'à ce qu'elles arrivent à une forme sinusoïdal constante après le 25^{ème} pas de temps (figure III.31).

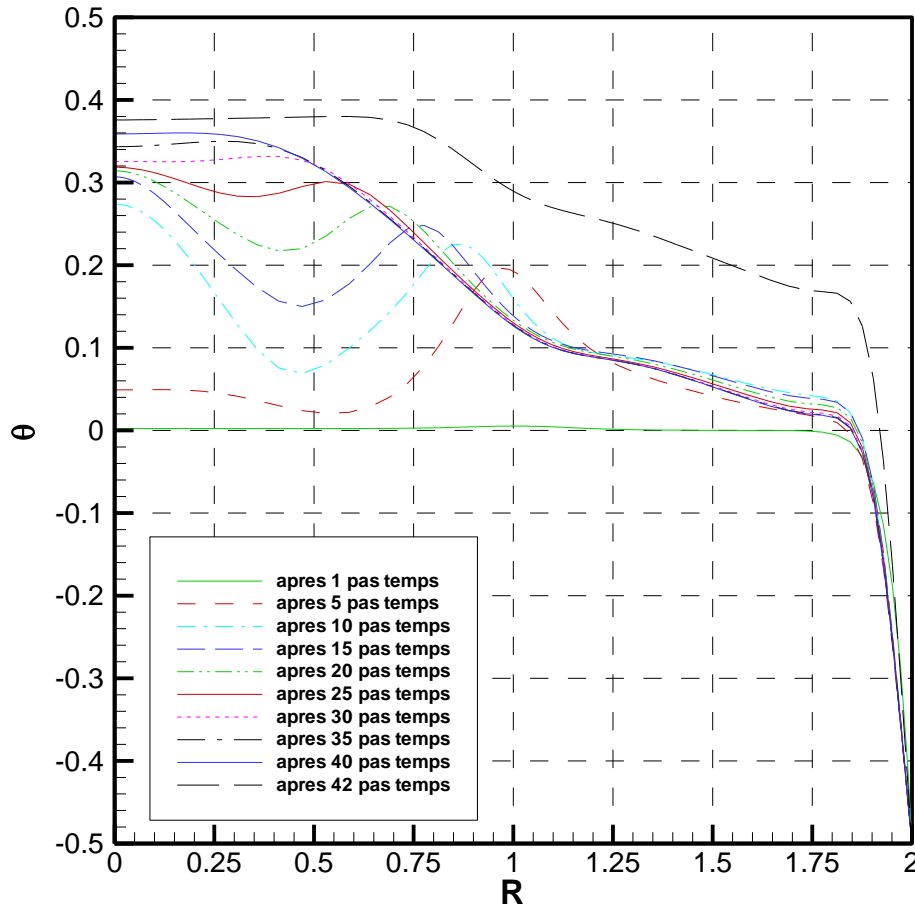


Fig III.31: profil de la température instationnaire à $Y=0.8$, $Ra=10^5$, $X=0.5$, $K=2$ pour différents pas de temps jusqu'a état stationnaire (pas de temps=42)

De la même façon, la figure (III.34) et figure (III.35) montre l'évolution des vitesses verticales pour différents pas de temps.

On remarque également que les vitesses verticales sont faibles puisque le régime est conductif dans les premiers pas de temps, lorsqu'on avance dans le temps, les vitesses croient est atteignent une valeur maximale $|V|=0.2$ (figure III.34) pour le cinquième pas de temps. Mais, après ce pas temps les vitesses décroissent d'une façon oscillatoire jusqu'à ce qu'elles arrivent à une forme constante après le 25^{ème} pas de temps figure (III.35).

Pour le cinquième pas de temps la vitesse à $R \sim 1$ est maximale par rapport à la vitesse à l'axe de symétrie $R=0$ parce que la vitesse V au point $(x, y) = (1, 0.8)$ est accéléré par un écoulement de fluide ascendant chauffé par la paroi vertical du cylindre intérieur, mais plus on avance dans le temps un équilibre thermique s'installe et les accélérations du fluide s'atténuent progressivement vers un état stationnaire.

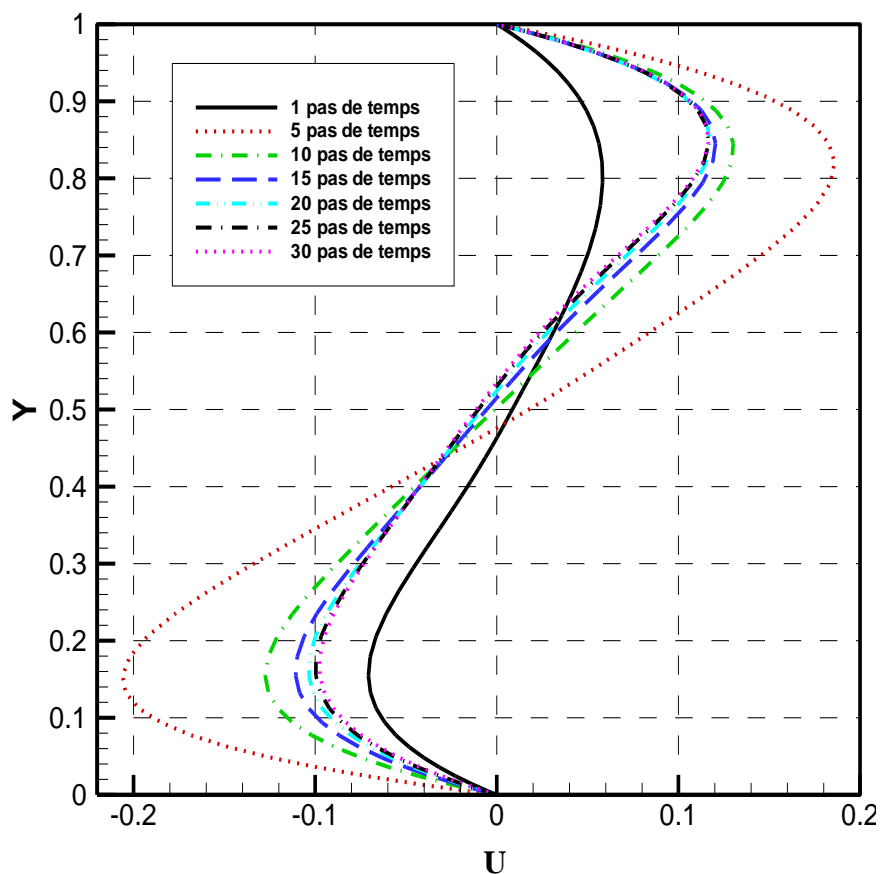


Fig III.32: profil de la vitesse moyenne (U) à $R=1.65$, $Ra=10^5$, $X=0.5$, $K=2$ pour différents pas de temps

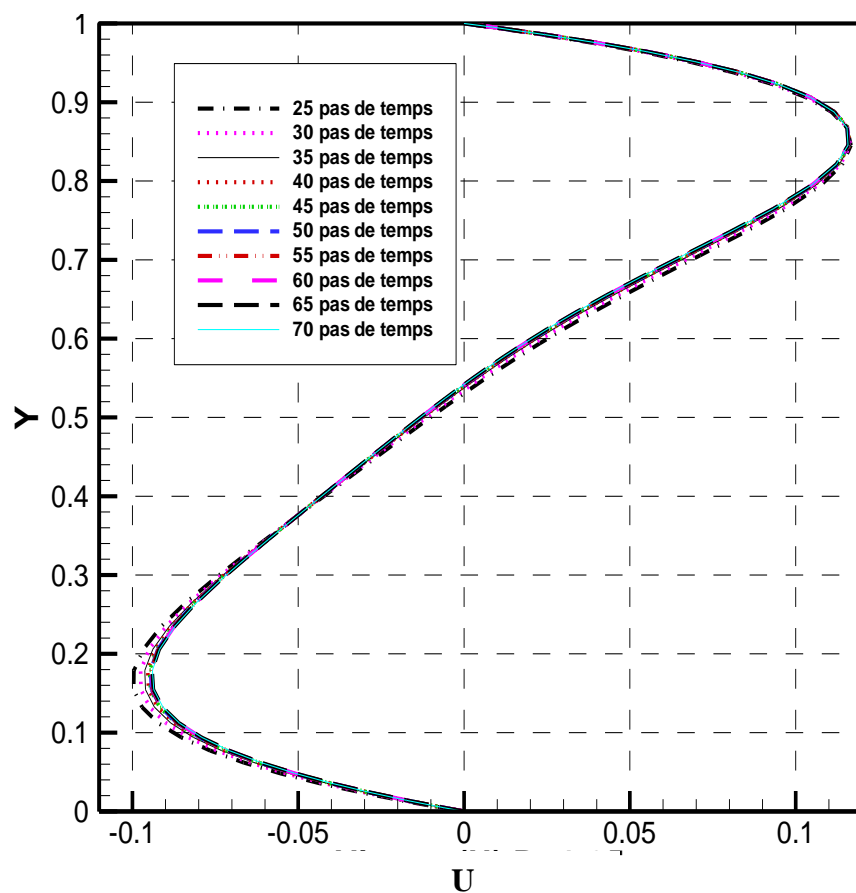


Fig III.33: profil de la vitesse moyenne (U) à $R=1.65$, $Ra=10^5$, $X=0.5$, $K=2$ pour différents pas de temps jusqu'à état stationnaire (pas de temps=42)

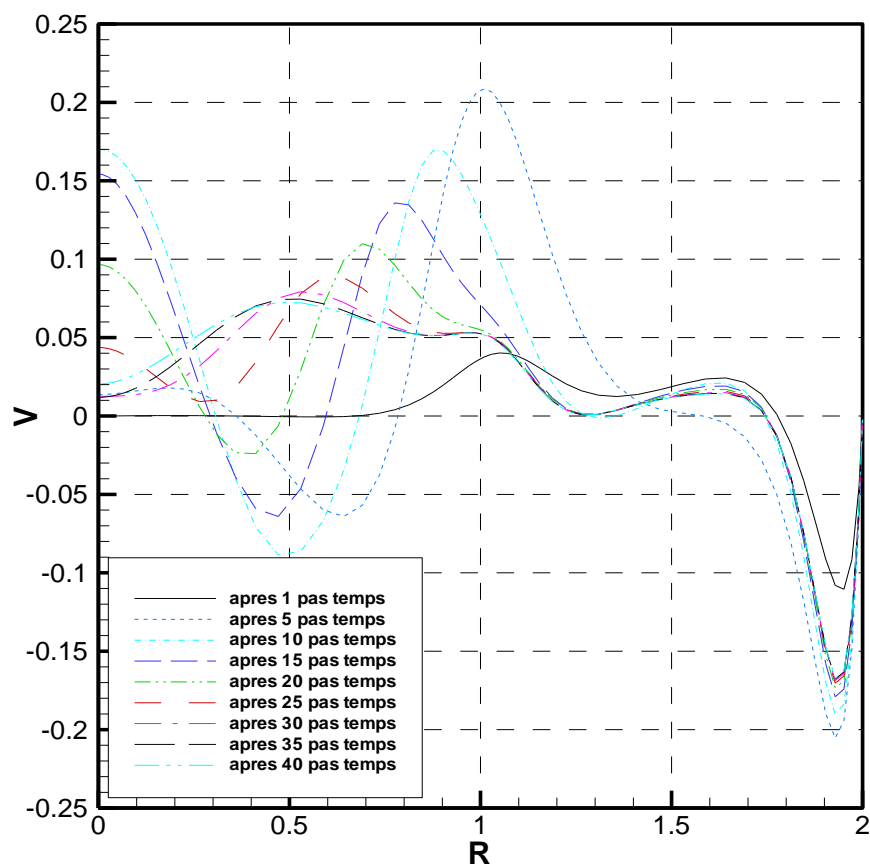


Fig III.34: profil de la vitesse moyenne (V) à $Y=0.8$, $Ra=10^5$, $X=0.5$, $K=2$ pour différents pas de temps

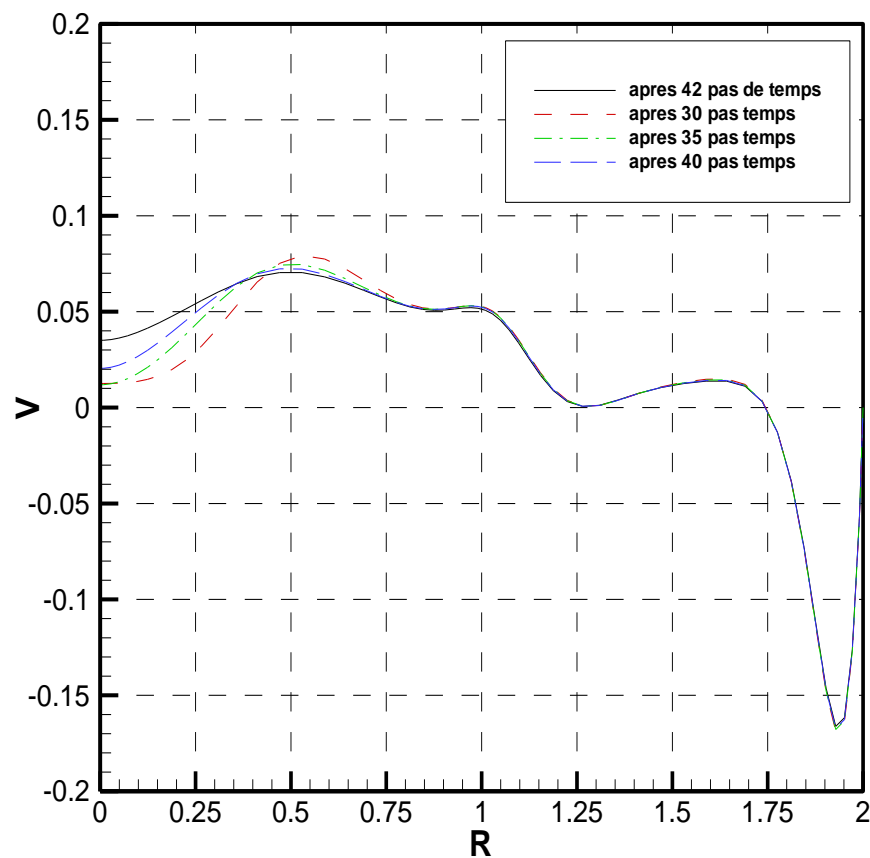


Fig III.35: profil de la vitesse moyenne (V) à $Y=0.8$, $Ra=10^5$, $X=0.5$, $K=2$ pour différents pas de temps jusqu'à état stationnaire (pas de temps=42)

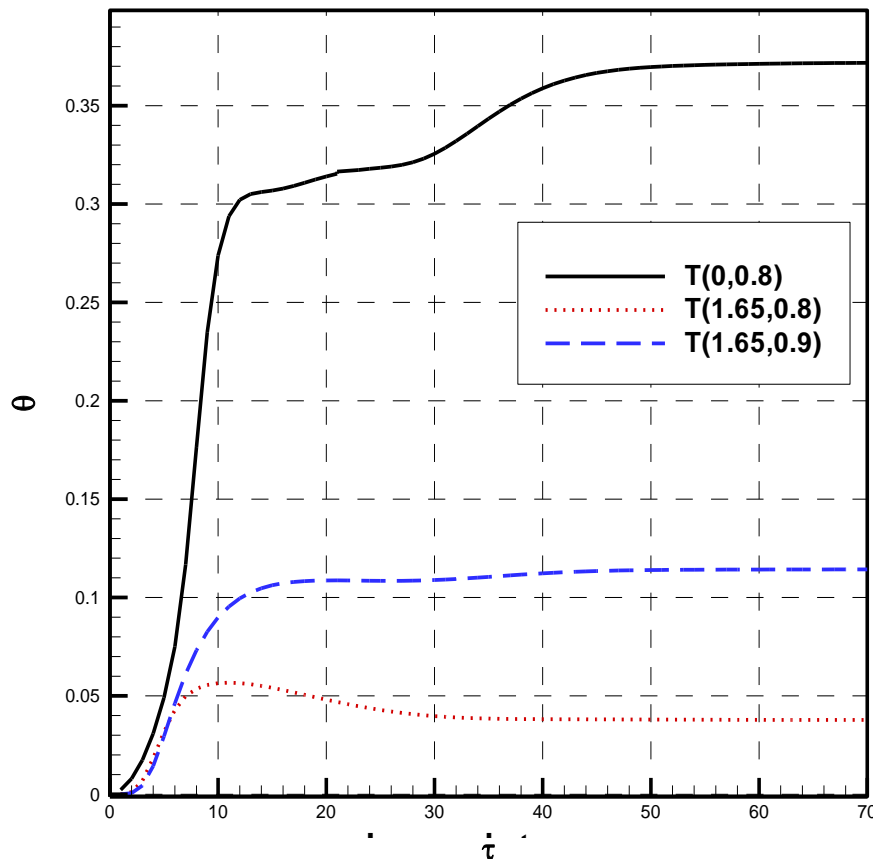


Fig III.36: profil de la température instationnaire à $Ra=10^5$, $X=0.5$, $K=2$ pour 3 points différents au cours de pas de temps

La figure (III.36) montre l'évolution de température pour trois points différents, un point sur l'axe de symétrie de coordonnée ($R=0, Y=0.8$), deux points dans la partie supérieure, l'une au dessus de l'autre de coordonnée ($R=1.65, Y=0.8$), ($R=1.65, Y=0.9$).

On remarque que dans les premiers pas de temps la température augmente rapidement puis elle stabilise après le 20^{èmes} pas de temps dans le cas des deux points (1.65,0.8), (1.65,0.9), par contre dans point T (0,0.8) la température augmente rapidement pendant les dix premier pas de temps, après ce pas temps elle augmente lentement puis elle se stabilise après le 40^{ème} pas de temps, car ce dernier point se situe sur la parcoure de la vague thermique généré par la paroi verticale chaude.

L'augmentation rapide de température est provoquée par l'excitation thermique provoqué par les deux parois thermique, cette excitation génère une accélération des vitesses qui sont maximales dans les premiers pas de temps, cette accélération engendre un échange convectif très importants, après ce pas de temps les vitesses redeviennent constantes (figure III.37) et ces pour cela on constate une stabilisation de température. L'augmentation de température de point qui se situe dans l'axe de symétrie (0,0.8) jusqu'à le seuil de température égale à 0.38 est due aux vitesses verticales (V) de fluide, car elles sont stabiliser après le 50^{èmes} pas temps figure (III.38) et aussi d'un flux de chaleur vertical causer par surface horizontal du cylindre intérieur.

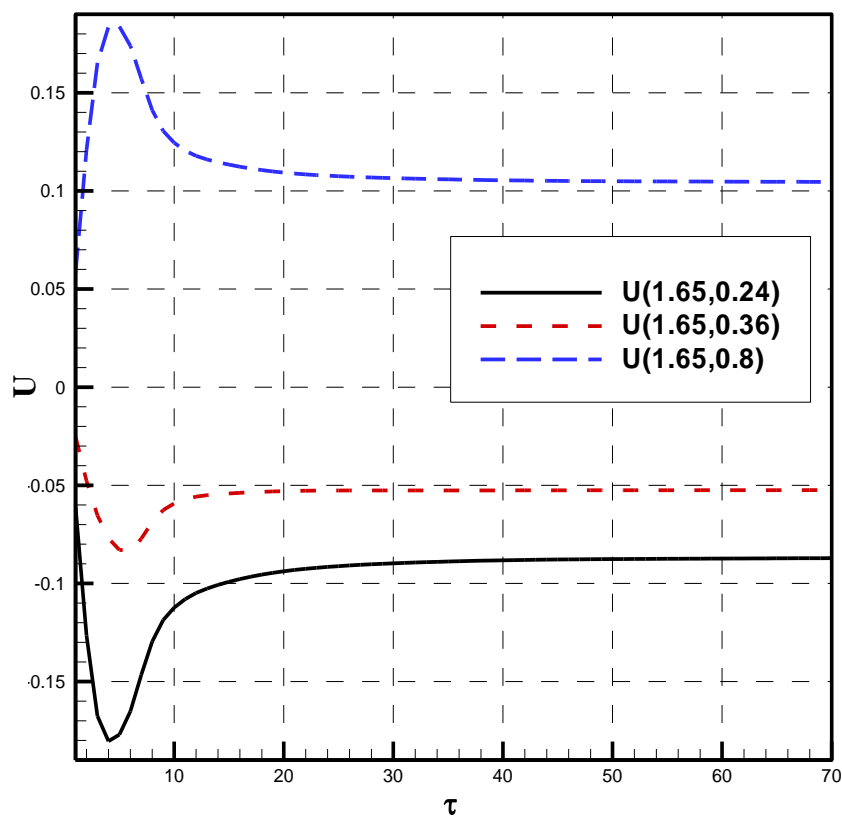


Fig III.37: profil de la vitesse horizontale (U) instationnaire à $Ra=10^5$, $X=0.5$, $K=2$ pour 3 points différents au court de pas de temps

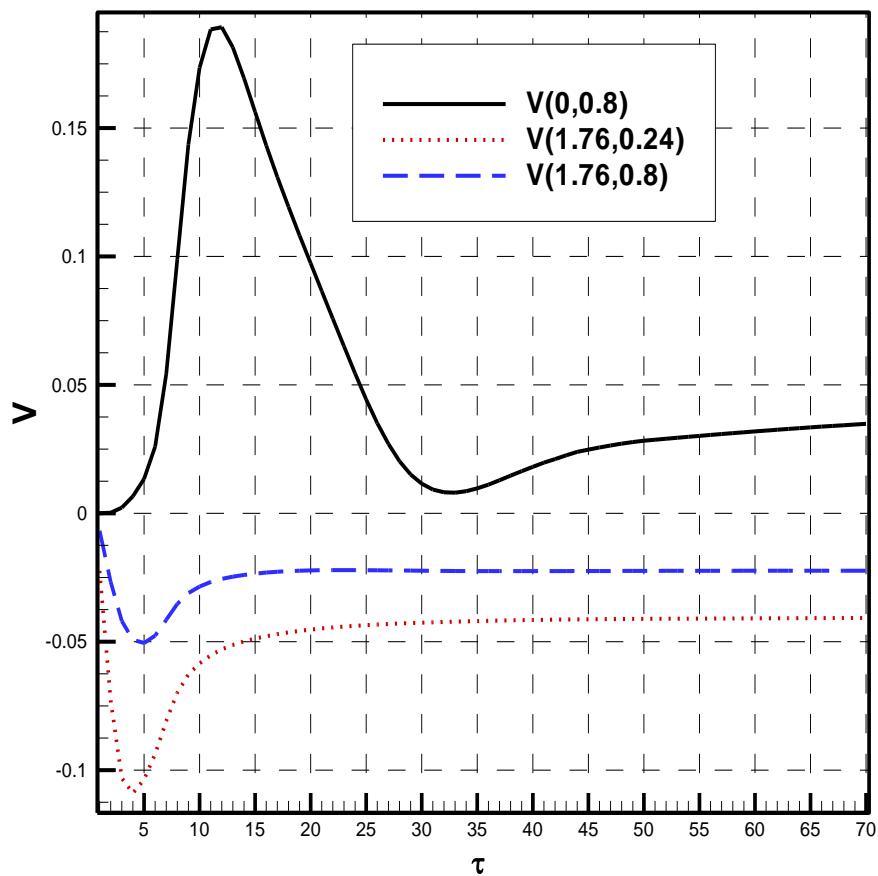


Fig III.38: profil de la vitesse verticale (V) instationnaire à $Ra=10^5$, $X=0.5$, $K=2$ pour 3 points différents au court de pas de temps

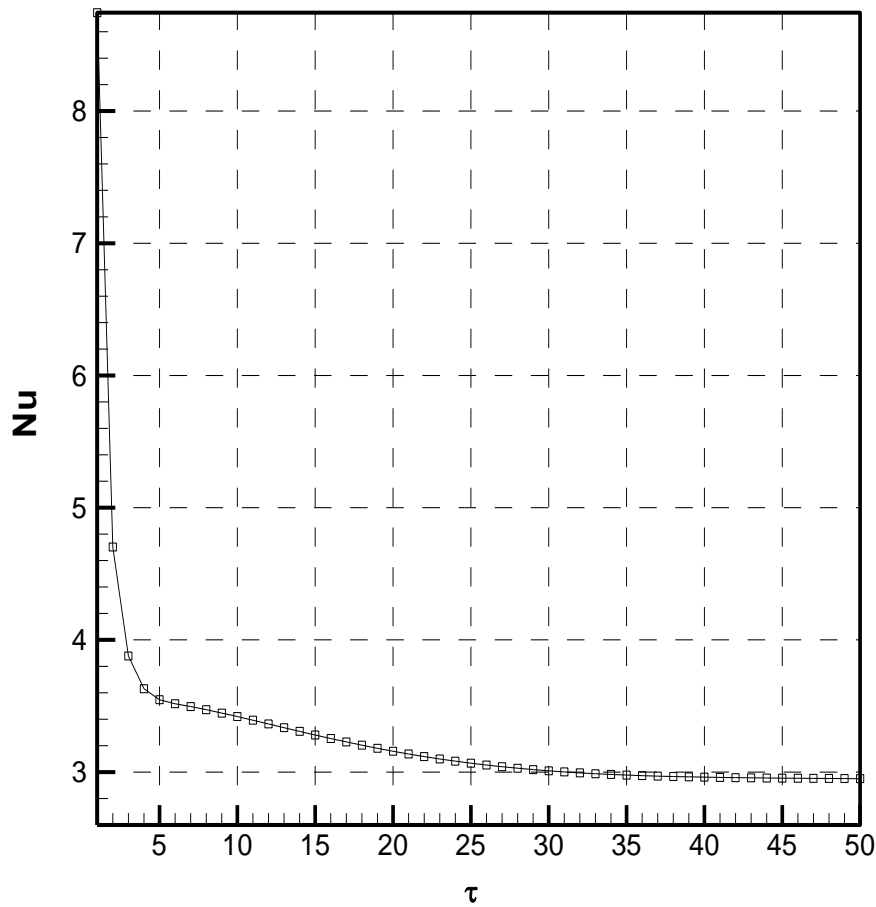
Transfert de chaleur:

Fig III.39: variation du nombre de Nusselt en fonction du pas de temps pour $Ra=10^5$, $X=0.5$, $K=2$

La figure (III.39) montre variation du nombre de Nusselt en fonction du temps. Nous remarquons que le nombre de Nusselt est important pendant les premiers instants car le gradient de température est important entre les parois isothermes ($\theta=-0.5, 0.5$) et le fluide à la température ($\theta=0$). Au fur et à mesure qu'on avance dans le temps, la température du fluide évolue vers valeur d'équilibre, ce qui provoque une diminution du gradient de température et donc le transfert de chaleur diminue également. Cette diminution continue jusqu'à l'instant $\tau=30$ pour une valeur de $Nu=3.0$.