

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

OUATAH Salim

HAMMI Hassen

Thème

Convection naturelle transitoire : bifurcation et transition vers le chaos

Soutenu le jeudi 7 octobre 2021 devant le jury composé de :

Mme. ADJOUADI Naima	Présidente
Mr. LAOUCHE Yacine	Examineur
Mr. ADNANI Massinissa	Encadreur

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

Je remercie tout le bon Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la force pour réaliser ce travail. Je remercie Mr ADNANI Massinissa docteur à l'Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, qui a bien voulu accepter de nous prendre en charge pour réaliser ce travail.

Je remercie vivement tous les enseignants de départements de Génie Mécanique qui ont participé de près ou de loin à notre formation. Un merci particulier aux membres de jury, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour,
Son soutien tous les sacrifices qu'elle a faits pour moi et ses
précieux conseils, pour toute son aide et sa présence dans ma*

vie

*A mes chers frères et leurs enfants et à toute ma famille
pour son aide.*

*A tous mes amis chaque 'un a son nom qui m'ont toujours encouragé
A tous ceux que j'aime*

OUATAH Salim

Dédicaces

*Avant tout, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir
Donné le courage et la patience pour réaliser ce travail
Malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère maman et mes sœurs et mes frères, et mes amis,

que dieu

Les garde et les protège, pour leurs encouragements et

Les sacrifices qu'ils ont endurés.

Sans oublier tout ce qui a une main sur le succès de ce

travail.

HAMMI Hassen

Sommaire

Remerciements*	i
Dédicaces*	ii
Sommaire	iv
Liste des figures	vi
NOMENCLATURE	viii
Introduction Générale	1
Généralités Synthèse bibliographique	3
I.1. Introduction	3
I.2. Généralité	3
I.2.1. Définition de transfert de chaleur	3
I.2.2. Définition de la bifurcation	5
I.2.3. Transition vers le chaos	5
I.2.4. Attracteur.....	5
I.3. Synthèse bibliographique	6
I.4. Conclusion.....	22
Modélisation du problème	23
II.1 Introduction	23
II.2. Présentation du problème physique	23
II.3. Hypothèse simplificatrices	24
II.4. L'approximation de Boussinesq	24
II.5. Modèle mathématique et équation dimensionnelles.....	25
II.6. Variables adimensionnelles et écritures adimensionnelles.....	26
II. 7. Conditions aux limites sous forme adimensionnelle ($t > 0$) et condition initiales ($t=0$)	27
II. 8. Transfert de chaleur	27

II.8.1. Nusselt local	28
II. 9. Méthode numérique	28
II. 10. Conclusion	29
Résultats et discussions	30
III. 1. Introduction	30
III. 2. Validation des résultats	30
III.3. Test de maillage	31
III.4. Résultats et discussion.....	33
III.4.1. Ligne de courant.....	33
III.4.2. Ligne isotherme.....	35
III.4.3. Les attracteurs	37
III.5. Conclusion.....	38
Conclusion Générale	39
Références Bibliographiques.....	40
Résumé	43
Abstract	43

Liste des figures

Figure I.1 : Les trois modes de transfert de chaleur [2].....	4
Figure I.2 : Diagramme de bifurcations [3].....	5
Figure I.3 : les trois types d'attracteur [5].....	6
Figure I.4 : model physique a été réaliserez [6].....	6
Figure I.5 : model physique de système réalisée par [7].....	7
Figure I.6 : cavité carre avec la condition limite [9].....	8
Figure I.7 : domaine étudié [4].....	9
Figure I.8 : présentation schématique du domaine de calcul [11].....	10
Figure I.9 : domaine étudié, profile d'écoulement de base pour la température [12].....	10
Figure I.10 : détails de l'enceinte [13].....	11
Figure I.11 : problème de configuration [14].....	12
Figure I.12 : configuration étudiée [15].....	12
Figure I.13: Champs de vitesse `à $Ra = 2,8.10^5(a)$ [16].....	13
Figure I.14 : modes tridimensionnels d'instabilité stationnaire [16].....	13
Figure I.15 : Fonction de flux , contours de température pour $\alpha = 18^\circ$ [17].....	14
Figure I.16 : Fonction de flux et contours de température pour $\alpha = 54^\circ$ [17].....	14
Figure I.17: Fourier spectra et Poincar pour les solutions $Ra= 27000$. [18].....	15
Figure I.18: Courbes de contour de la température [19].....	16
Figure I.19: Schéma du domaine de calcul [20].....	17

Figure I.20: détails de l'enceinte [21].....	17
Figure I.21: diagramme de bifurcation [21].....	17
Figure I.22: Schéma de la cavité thermique [22].....	18
Figure I.23: cavité régulière s'écoule de différentes formes[23].....	19
Figure I.24: Diagramme schématisé de la cellule de convection montrant[24].....	20
Figure I.25: Configuration physique du système[25].....	21
Figure I.26: géométrie du problème [26].....	21
Figure I.27: Model physique et le système de coordonnées[27].....	22
Figure II.1: Model physique.....	24
Figure II.2 : Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude.....	29
Figure III.1 : Comparaison des résultats et ceux de M. Muthtamilselvan et al [27].....	30
Figure III.2 : Nombre de Nusselt moyen en fonction de la grille.....	32
Figure III.3: Structure des lignes de courant de $Ra=10^3$ jusqu'à 10^8	33
Figure III.4 : La structure des isothermes de $Ra=10^3$ jusqu'à 10^8	35
Figure III.5 : les courbes de Nusselt en fonction de θ x, y=0.025m, a $Ra [10^3-10^8]$	37

NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité (SI)
H	Hauteur de l'enceinte	M
T_f	Température de la paroi froide	K
T_c	Température de la paroi chaude	K
x, y	Coordonnées cartésiennes	M
X, Y	Coordonnées cartésiennes adimensionnelles	-
u, v	Composantes de la vitesse	m/s
U, V	Composantes de la vitesse dimensionnelle	-
p	Pression	Pa
P	Pression Adimensionnelle	-
g	L'accélération de la pesanteur	m/s ²
Ra	Nombre de Rayleigh	-
Pr	Nombre de Prandtl	-
α	Diffusivité thermique	m ² /s
t	Temps	s
t'	Temps adimensionnelle	-
h	Coefficient de convection	W .m ⁻² K ⁻¹
λ	Coefficient de conductivité thermique	W .m ⁻¹ K ⁻¹
β	Coefficient d'expansion thermique a pression constant	-

Introduction Générale

Introduction Générale

“ la théorie du chaos a été inventé par les scientifiques qui paniquaient à l'idée que le public commençait à comprendre les anciennes “ Mike Barfield.

Dans la nature y en a différent types pour lesquels le processus de transformer la chaleur soit y existe de façon laisse n'importe quel système évolue au cours du temps selon deux aspects phénoménologiques (Réversible et Irréversible), Dont la géométrie de l'espace de ce système déformé variablement d'après le concept du processus cité précédemment.

On parle sur la théorie de transfert thermique.

En effet, cette théorie est une étude phénoménologique, la façon dont la chaleur se propage d'une région à une autre, sous l'influence de température, ce transfert résulte différentes interactions à l'intérieur d'un milieu, ainsi entre des milieux, lors de la variation de température (gradient de température). Sachant qu'il existe quatre mode de transfert (convection, conduction, rayonnement, changement de phase), qui ont une valeur vitale aussitôt dans le domaine fondamental (cadre théorique) bien que celui des applications (cadre expérimental).

Ce travail est basé sur le transfert tel que (convection) qui a pour le phénomène irréversible, dont le mouvement d'un fluide classique induit lorsqu'un gradient d'une grandeur intensive (dans ce cas étant la température) se produit d'une façon autonome (aucune provocation artificielle), ça ce qu'on appelle la convection naturelle, lorsque y en a des conditions thermiques concernent un régime permanent, l'étude principale dans ce cas-là mène à inclure une théorie mathématique a pour objectif de traiter le désordre du milieu concerné , en changeant un ou plusieurs de ses paramètres , en parle sur la route vers le chaos Lorsque l'un ou plusieurs de ces paramètres changent i.e. (un petit changement dans le paramètre produit un changement majeur dans l'organisation de ce milieu), des aspects dynamique s'apparus on parle sur la bifurcation.

Dans notre étude qui consiste les systèmes dynamiques l'apparition d'un ensemble intuitif qui (désigne une collection des différents paramètres pour ces systèmes) introduite,

dont l'évolution transitoire de ces systèmes soit irréversible en absence de perturbations, ce qui implique l'objectif de cette étude. On parle sur les attracteurs (ensemble-limite).

Il n'est pas toujours possible de calculer finement le comportement d'un système composé d'un très grand nombre d'éléments qui interagissent, l'intérêt principal d'introduire un attracteur réside dans le traitement facile du problème en travaillant sur celui-ci.

La connaissance des attracteurs permet de savoir partiellement ce qui va émerger du chaos, en incluant dans ce cas-là quatre types d'attracteurs (ponctuel, périodique, quasi-périodique, étrange).

Dans le premier chapitre on a abordé généralité sur la convection naturelle et la route vers le chaos comme phénomène étudié. Il commence par quelques définitions, puis une synthèse bibliographique sur les principales thématiques abordées par les chercheurs sur la convection naturelle dans les enceintes fermées. Ce chapitre décrit et analyse les travaux analytiques, numériques et expérimentaux dans ce domaine. Il offre un aperçu très large du domaine et les références sont nombreuses et utiles pour le lecteur

Le deuxième consacré à les formulations mathématique qui servent notre élude. En premier, lieu on explique d'une manière détaillée le problème physique et on a introduit les équations de conservation qui régissent l'écoulement ainsi que les conditions aux limites. Une mise sous forme adimensionnelle des équations gouvernantes (l'équation de continuité, les équations de quantité de mouvement et l'équation d'énergie), et les conditions aux limites.

Le troisième chapitre, et la partie la plus importante de ce mémoire. Elle comporte la génération du maillage et la validation de la référence et notre résultat et la discussion des résultats obtenus. Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité Synthèse

bibliographique

Généralités Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Dans le but de valider la crédibilité de notre travail, on a fait recourir à des documents déjà présentés dans la littérature, d'après avoir consulté certains articles qu'ils sont liés à au transfert de chaleur par convection naturelle transitoire (bifurcation et transition vers le chaos), on a trouvé quelque résultat numérique qui sont similaires à notre travail.

I.2. Généralité

I.2.1. Définition de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus connus d'échange d'énergie, et on définit cette dernière comme de l'énergie thermique en transit à cause d'une différence de température. On peut observer les phénomènes de transfert de chaleur aussi bien dans des situations industrielles (fours, réacteurs, échangeurs de chaleur, colonnes à distiller, chambres froides, presses à injection, coulée des métaux...) que dans notre vie quotidienne (le chauffage et l'isolation de la maison, la cuisson des aliments, les vêtements d'hiver et le facteur de refroidissement éolien, le coup de soleil sur la plage)[1].

Il existe trois modes de transfert :

a. Conduction

La conduction se produit lorsque les flux de chaleur passent d'un corps à un autre, par contact, on parle de convection lorsqu'un corps qui se déplace emmène avec lui, la chaleur qu'il contient ce mode de transfert implique un déplacement de matière dans le milieu.

b. Rayonnement

Tout corps matériel émet et absorbe de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Le phénomène d'émission d'un corps correspond à la conversion d'énergie matérielle (agitation des électrons constituant la matière

dont l'intensité dépend de la température) en énergie radiative. Le phénomène d'absorption est la conversion inverse.

c. Convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le mouvement macroscopique de la matière. Ce phénomène se produit au sein des milieux fluides en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement.

On distingue deux types de convection :

- **Convection naturelle**

Les mouvements sont dus aux variations de la masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de la masse volumique peuvent être générées par des gradients de température (l'air chaud est plus léger que l'air froid) et/ou par des gradients de composition, on s'intéresse dans notre étude.

- **Convection forcée**

Le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...).

- On parlera de convection mixte lorsque les deux types de convection coexistent dans un système [2].

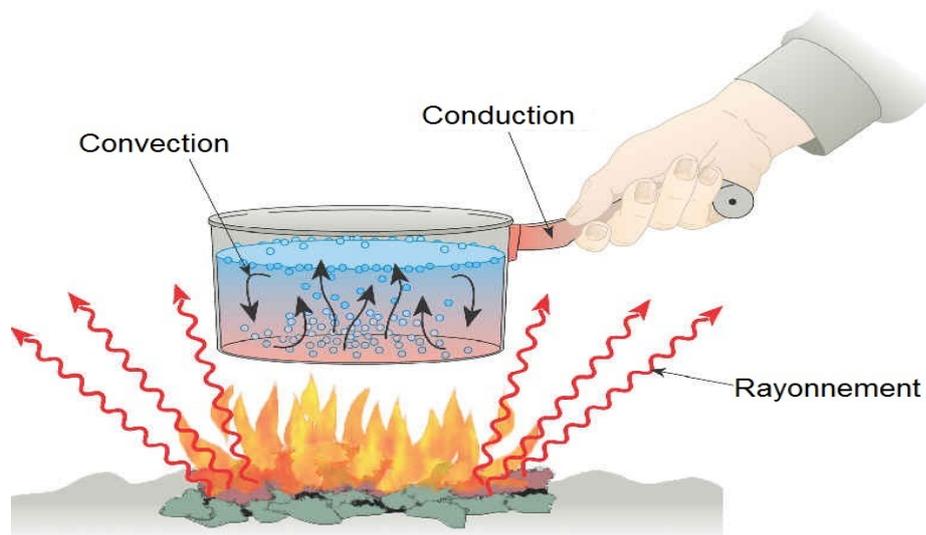


Figure I.1 : Les trois modes de transfert de chaleur [2].

I.2.2. Définition de la bifurcation

La théorie de bifurcation en mathématique et en physique est l'étude de certains aspects des systèmes dynamiques. Une bifurcation intervient lorsqu'un petit changement d'un paramètre physique produit un changement majeur dans l'organisation du système [3].

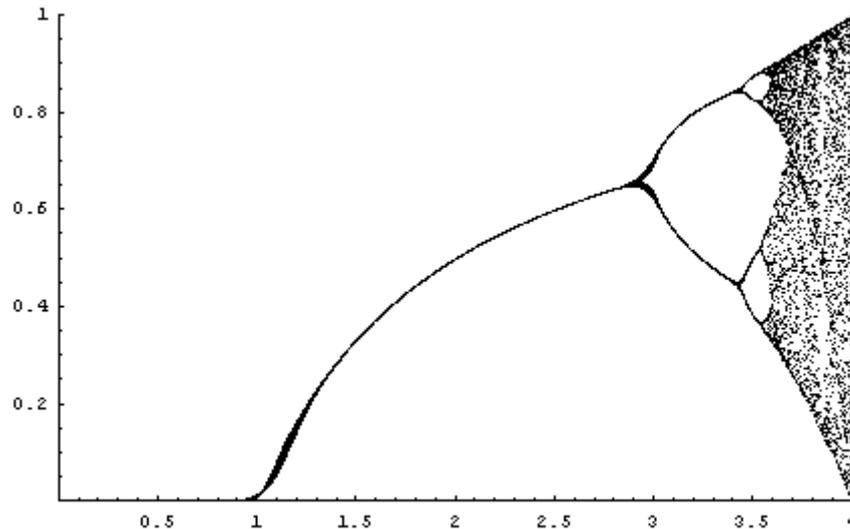


Figure I.2 : Diagramme de bifurcations [3].

I.2.3. Transition vers le chaos

Un système de convection naturelle est étudié autant que fluctuation de son comportement interne (bifurcation) à partir de la sensibilité aux conditions initiales, en parlons d'un système chaotique il aurait besoin d'une analyse mathématique qui s'appelle l'analyse de transition vers le chaos permet d'étudier l'évolution successive de la dynamique de ce système, autrement dit dans le cadre expérimental l'observation est permise uniquement pour un système dynamique non-linéaire.

La sensibilité aux conditions initiales implique que des petites fluctuations peuvent provoquer des variations importantes, ceci dit explicitement que les régions de phase ou bien la trajectoire s'introduisent en termes de probabilité en autorisant des prévisions statistiques [4].

I.2.4. Attracteur

Dans l'étude des systèmes dynamiques, un attracteur (ou ensemble-limite) est un ensemble ou un espace vers lequel un système évolue de façon irréversible en l'absence de perturbation. Les constituants de base de la théorie du chaos, ou moins cinq types sont définis : ponctuel, quasi-périodique, périodique, étrange et spatial. Stephen Smale serait à l'origine du terme attracteur [5].

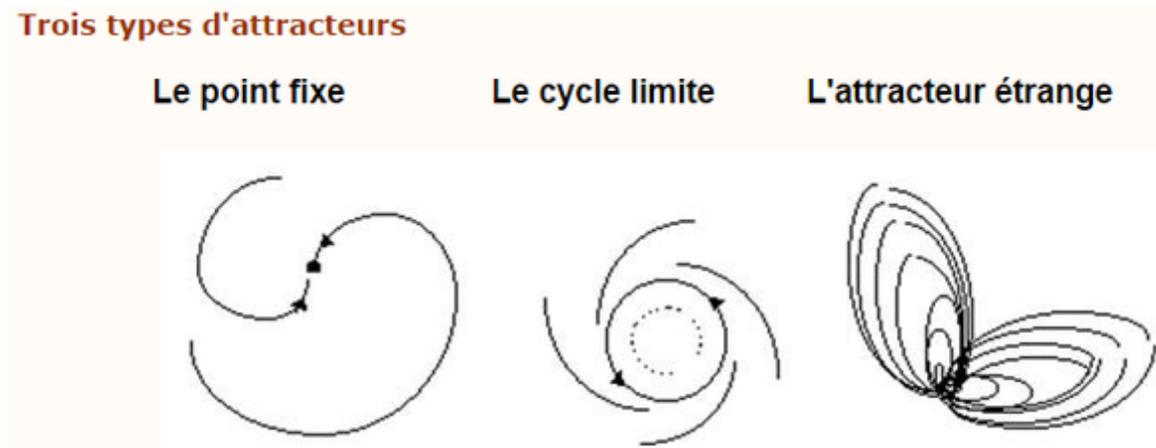


Figure I.3 : les trois types d'attracteur[5].

I.3. Synthèse bibliographique

Une étude numérique de la convection naturelle dans une cavité carrée a différentes valeurs de nombre de Prandtl, a été réalisé par **Adnani et al** [6], Figure I.4. Ils ont constaté que le transfert de chaleur et champ d'écoulement sont les fréquenté avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, et la couche limite thermique tendance à se développer vers les parois latérales pour des nombres de Rayleigh très élevés. A faible nombre de Rayleigh, le champs d'écoulement est légèrement fréquent avec l'augmentation du nombre de Prandtl et diminue avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, de même que le transfert de chaleur n'est pas affecté par les variations du nombre de Prandtl pour les faibles nombres de Rayleigh et est moins fréquenté avec l'augmentation du Prandtl pour les nombres de Rayleigh très élevés.

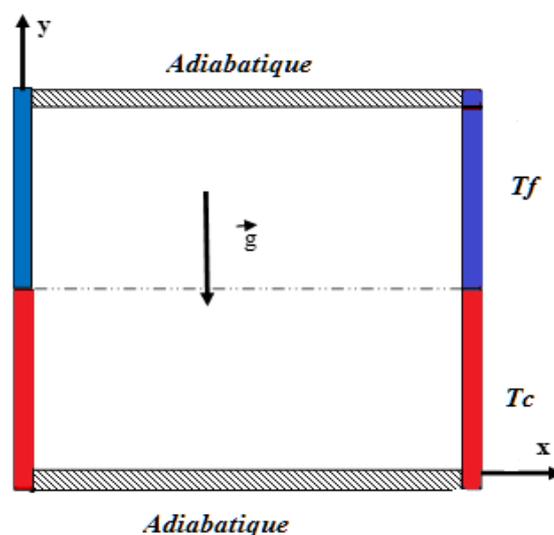


Figure I.4 : model physique [6].

Une étude de la Transition vers la convection naturelle chaotique dans une cavité cubique inclinée remplie d'air, a été réalisée par **Ouédraogo et al** [7], Figure I.5. L'étude prédit différents nombres de Rayleigh critiques pour les deux angles d'inclinaison caractérisant la variation du comportement de l'attracteur et montre que plus le nombre de Rayleigh est grand, plus l'attracteur est sensible au pas de temps et à la taille des mailles. Les routes vers le chaos suivi par l'attracteur sont : point limite, cycle limite, torus T^2 , cycle ajusté sur un torus T^2 , chaos, torus T^2 , cycle ajusté sur un torus T^2 , chaos lorsque le nombre de Rayleigh augmente. L'analyse confirme également la bifurcation de l'attracteur d'un point limite vers un cycle de chaos. L'analyse confirme également la bifurcation de l'attracteur d'un point limite à un cycle limite via une bifurcation de Hopf sur-critique pour un nombre de Rayleigh compris entre 1.95×10^6 et 1.95×10^6 .

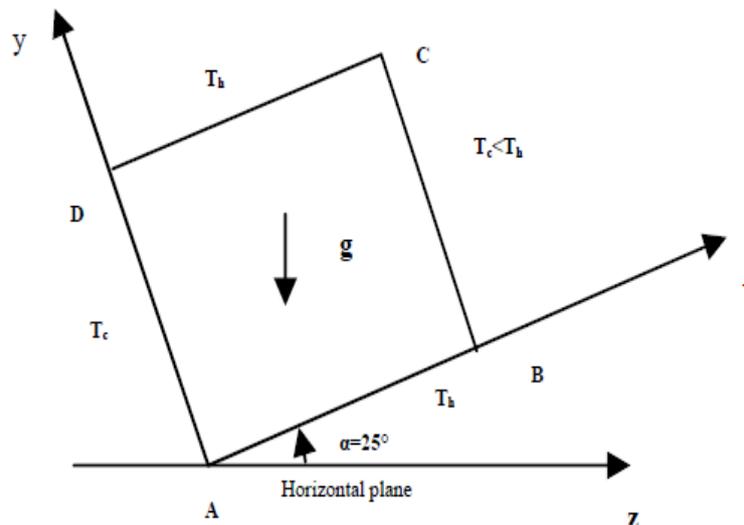


Figure I.5 : model physique de système [7].

L'écoulement de la convection naturelle dans une cavité remplie d'air et chauffées de façon différentielle avec parois horizontales adiabatique est étudié par **Shihe Xin et Patrick Le Quéré** [8]. A été réexaminée à l'aide d'algorithmes d'analyse de stabilité tels que l'itération de Newton (résolution en régime stationnaire), la méthode d'Arnoldi et la méthode de continuation. Ils intéressent particulièrement au calcul des points de bifurcation Hopf caractérisant l'apparition de flux dépendants du temps dans ces cavités.

La Analyse de scénario quasi périodique menant ou chaos dans une cavité carre est étudié par **Laouar et al** [9], Figure I.6.L'augmentation du nombre de Rayleigh, le système transite au régime oscillatoire par une bifurcation super critique de Hopf suivie d'une bifurcation sous le nombre critique de Hopf au nombre critique de Rayleigh de $4,26 \cdot 10^6$. Tout en continuant à augmenter le nombre de Rayleigh, le rapport entre les deux fréquences fondamentales devient rationnel. Dans ce cas, la motion de verrouillage de phase est le principal régime avant le chaos. On observe un état chaotique pour un nombre de Rayleigh supérieur à $1,4 \cdot 10^7$. Le système est sensible aux conditions initiales. Tous les résultats numériques ont été caractérisés par la recherche des sections Poincaré et des portraits de phase. Pour l'état chaotique, le plus grand exposant Lyapunov est positif et la dimension de l'attracteur est fractionnaire.

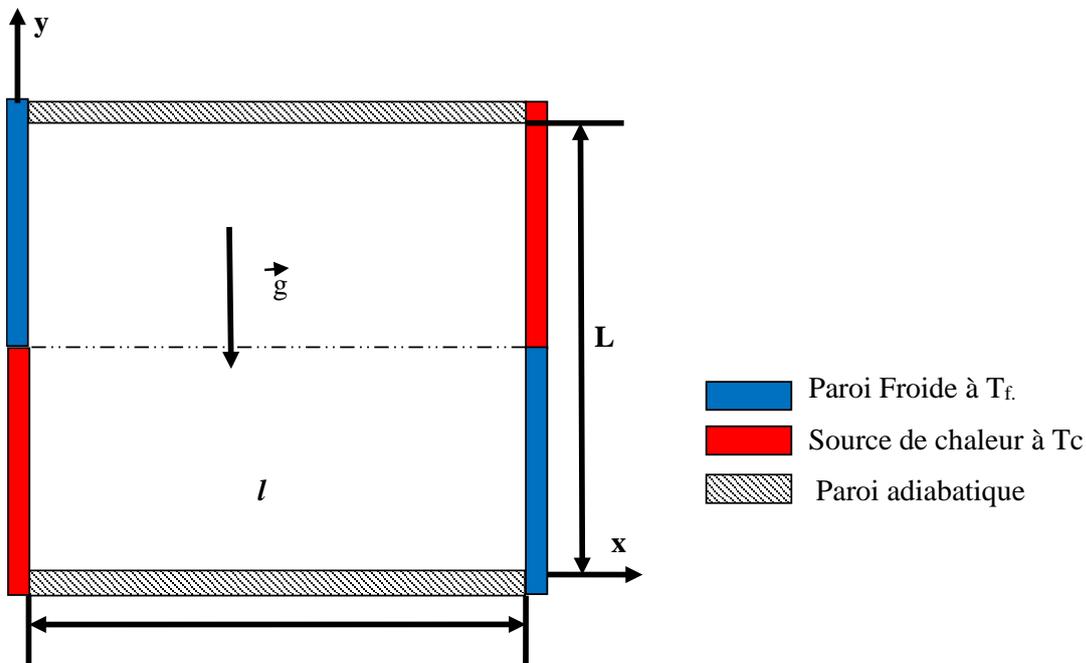


Figure I.6 : la cavité carre avec la condition limite [9].

Bifurcation et solution multiples en cavité 3Ddifferentiellement chauffée et étudié par **Gaetan de Gassawski et al**[10] .Le principe de cette simulation ils ont trouvé les résultant de cette note que l'écoulement redevient stationnaire pour la valeur de Ra ($7 \cdot 10^7$ et 10^8) plus élevées et d'outre part l'écoulement redevient instationnaire ou alentours de $Ra=3 \cdot 10^8$, l'instabilité en jeu dans ce cas étant de type couche limites verticale

Dynamique chaotique d'un rouleau dans une couche fluide hautement confinée, la vertical est chauffée de façon différentielle est étudié par **Zhenlan gao et al** [4], Figure I.7. cette simulation numérique est utilisé le pour étudier l'écoulement d'air entre deux plaque verticale maintenues à des températures différentes pour montrer que le nombre Rayleigh est faible le rouleau et les tresses croissent et rétrécissent alternativement, un processus cyclique et grand Ra augment l'écoulement devient temporellement chaotique , une attracteur apparaitre lorsque le nombre de Rayleigh augment encore ,donc l'oscillation chaotique et l'intermittence peuvent être capturées par modèle d'ordre inférieur.

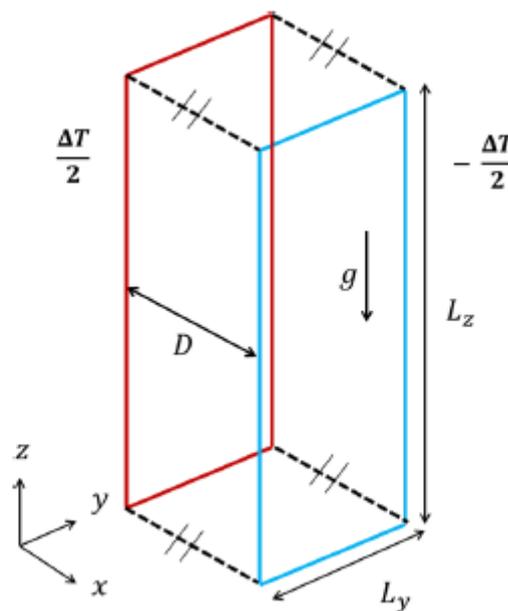


Figure I.7 : domaine étudié [4].

L'écoulement en cavité avec une paroi verticale chauffée faisant face à une frontière ouverte avec le haut et le bas imperméables et adiabatiques et une stratification de fond présente une bifurcation caractéristique dans la région aval de la couche limite thermique a été étudié par **Armfield et al** [11], Figure I.8. Les résultats qu'ils ont obtenus montrent que le jet de sortie de la couche limite thermique peut être décalé de la limite supérieure lorsqu'on change la stratification ambiante cela implique que la bifurcation ne dépend pas de celle limite supérieure.

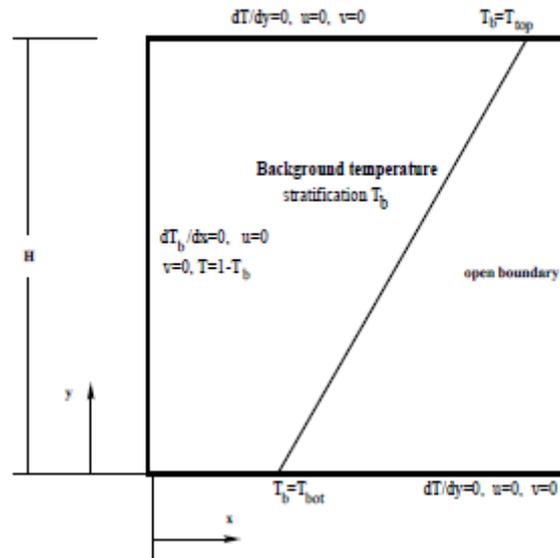


Figure I.8 : présentation schématique du domaine de calcul [11].

Une étude de la transition vers le chaos de la convection naturelle ente deux plaques verticales infinies à chauffée différentiel est étudié par **Zhenlan gao al** [12], Figure I.9. Pour une étude analytique en deux dimension(2D), et numérique en deux et trois dimension (3D) ils ont montré que les rouleaux deviennent instables via une bifurcation de Hopf et pour une gamme limite de nombre de Rayleigh l'écoulement devient quasi – périodique une autre bifurcation en(3D) l'écoulement devient alors dépendant de temps pour un comportement chaotique qui ce produit par le biais de deux mécanismes concurrents.

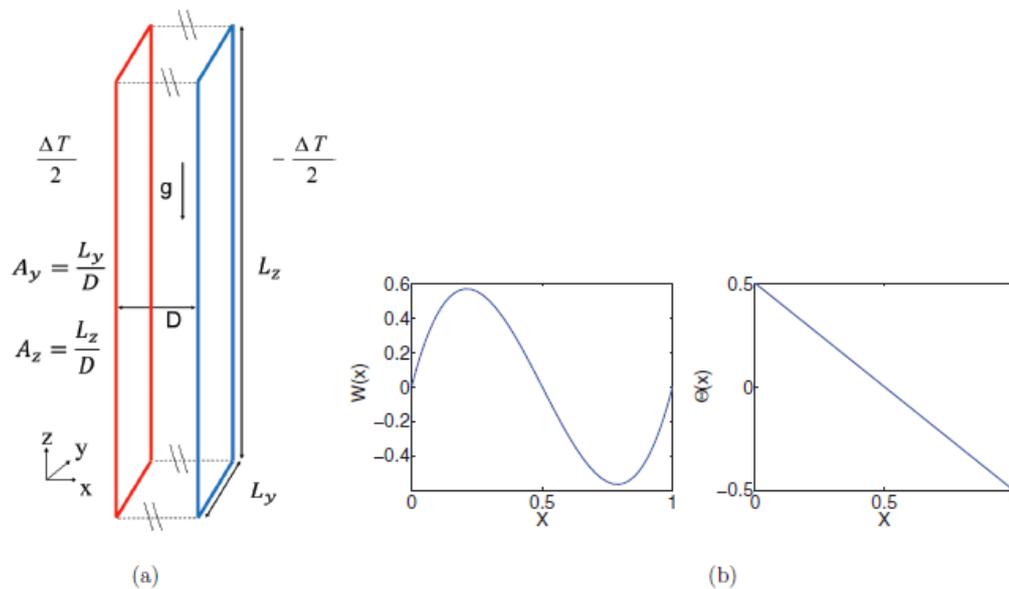


Figure I.9 : (couleur en ligne) (a), domaine d'étude (b) profils d'écoulement de base pour la température (x)et la vitesse vertical W(x) [12].

Cette article explique clairement la convection naturelle transitoire en la simulant vers une enceinte bidimensionnelle carree est étudié par **Salah laouar al** [13], Figure I.10, ils ont observé la transition vers le régime périodique (une seule fréquence à partir d'un nombre de Raleigh (en tant que paramètre de contrôle) $Ra=2,2 \cdot 10^6$ la route vers le chaos observé est de nature quasi-périodique (deux fréquences légèrement différentes) et puis a 3 fréquences incommensurables à partir de $Ra 2 \cdot 10^7$ pour cette valeur le spectre de puissance a laissé supposer qu'il s'agit d'un régime chaotique bien établi.

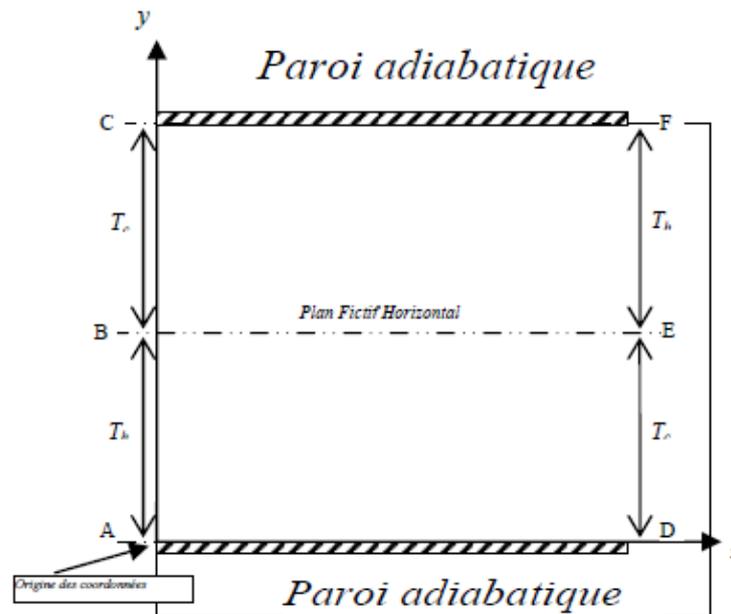


Figure I.10 : détails de l'enceinte [13].

Transition et chaos dans la convection naturelle d'un fluide avec $Pr=0,1$ dans un anneau horizontal a été étudié par **Joo-sik yoo et al**[14], Figure I.11 . Lorsque Ra augmente, une transition d'un écoulement unicellulaire stable à un écoulement multicellulaire oscillant avec un tourbillon contre-rotatif au sommet de l'anneau se produit. Après la première bifurcation de Hopf d'un écoulement stable à un écoulement monopériodique, une solution de période 3 apparaît d'abord. Un écoulement quasi-périodique et deux bifurcations de doublement de période sont enregistrés avant le chaos, et une fenêtre de période 4 est observée entre les états chaotiques.

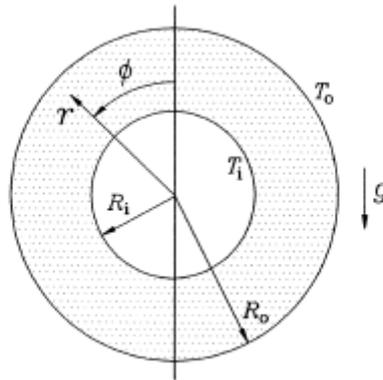


Figure I.11 : problème de configuration [14].

Une étude numérique de la convection naturelle transitoire au sein d'une cavité chauffée périodiquement avec différentes type d'excitation, a été étudié par **lakhali et al** [15], Figure I.12. Ils ont trouvé que le fluide est considéré comme étant de l'air ($Pr=0,72$), ils ont montré que la valeur moyennes du transfert de chaleur et de l'intensité de l'écoulement sont considérablement différentes de celles obtenues en régime stationnaire même ils ont montré que dans certaines conditions, la chaleur évacuée à travers la paroi froide de la cavité entre résonance avec la température imposée.

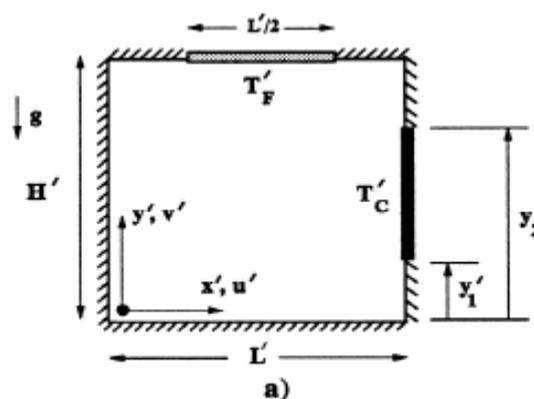


Figure 12 : configuration étudiée [15].

Bouloumou et al [16], Figure I.13 et I.14, ils ont fait la simulation numérique 3D par la méthode spectacle d'un écoulement de convection naturelle en approximation faible nombre de Mach, ils ont démontré en particulier que contrairement à la convection Boussinesq (BO) les solutions 3D sont plus instable que les solutions 2D, hystérésis et la solution multiples sont obtenus.

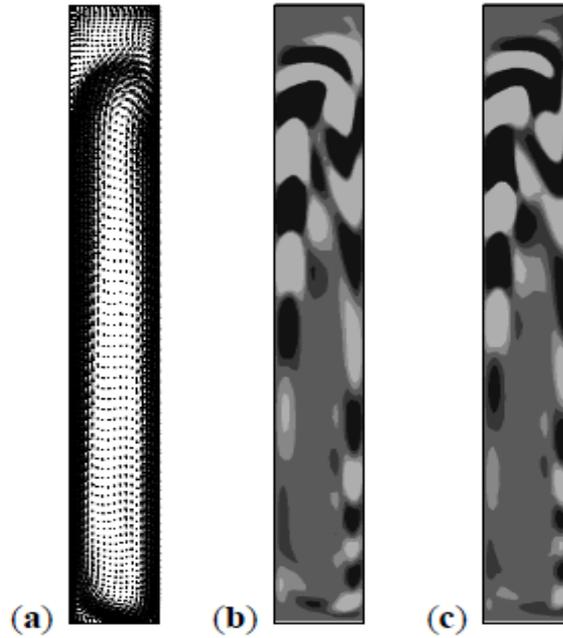


Figure I.13 : Champs de vitesse à $Ra = 2,8 \cdot 10^5$ (a). Fluctuations de température à $Ra = 2,9 \cdot 10^5$ (b) et $Ra = 3,4 \cdot 10^5$ (c) [16].

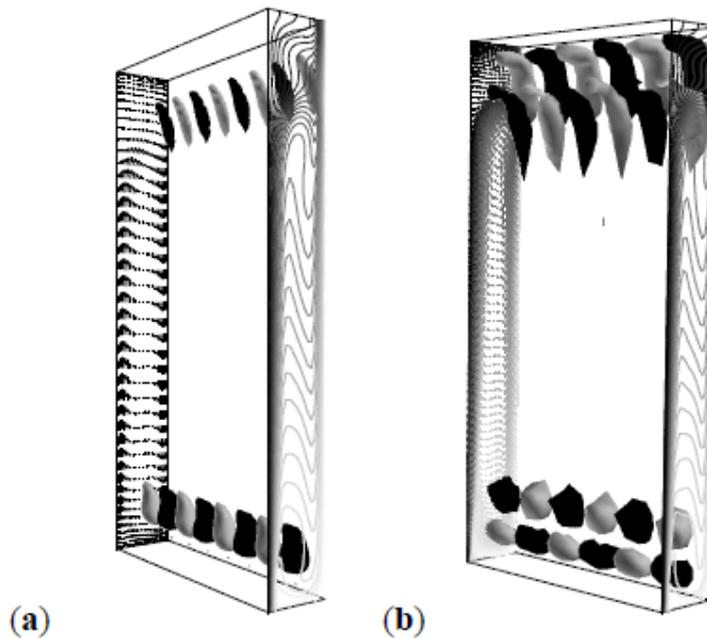


Figure I.14 : modes tridimensionnels d'instabilité stationnaire. (a) mode $k = 4$ à $Ra = 1,8 \cdot 10^5$ et mode $k = 3$ à $Ra = 2,35 \cdot 10^5$ (b). Champs de température et de vitesse dans les deux plans verticaux en $x = 0$ et $x = Ax$. Iso-verticité $w = \pm 0,16$ (a) et iso- $u = \pm 0,01$ (b) [16].

Wenxian Lin et al [17], Figure I.15 et I.16, ils ont étudié l'évolutivité du nombre de Nusselt dans une cavité carrée inclinée différemment chauffée. Pour démontrer que la structure

de l'écoulement de base est modifiée lorsque la cavité est inclinée pour un angle d'inclinaison spécifique l'écoulement subite une bifurcation de sorte que le flux entièrement développé est instable, le nombre de Nusselt est obtenu pour déterminer l'effet de l'inclinaison sur le Transfer thermique total de la cavité par conduction.

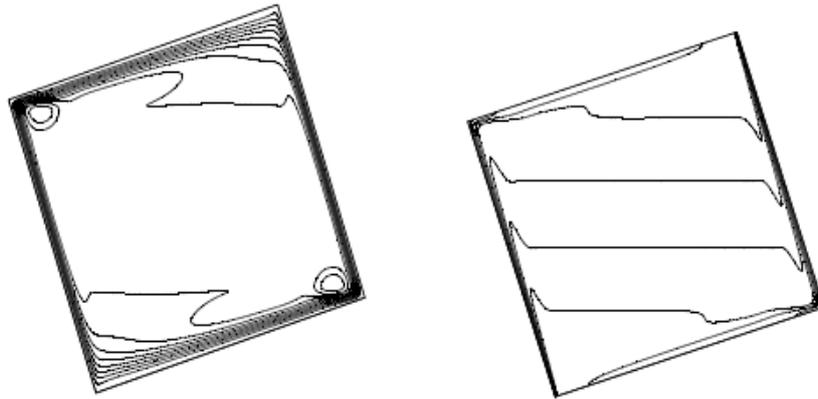


Figure I.15 : Fonction de flux (à gauche) et contours de température (à droite) pour $\theta = 18^\circ$ [17].

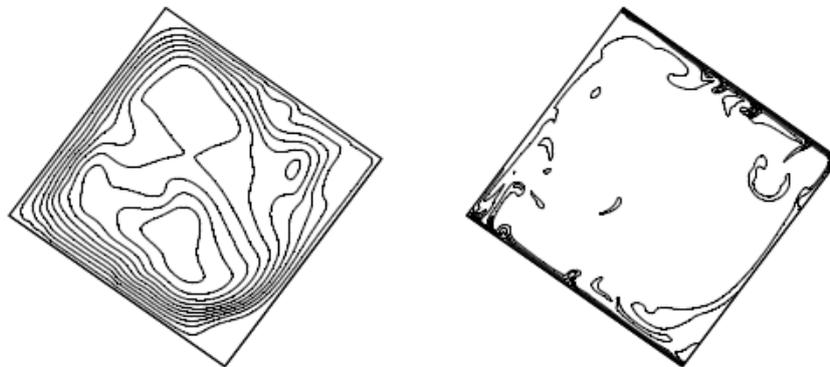


Figure I.16 : Fonction de flux (à gauche) et contours de température (à droite) pour $\theta = 54^\circ$ [17].

Une cavité verticale bidimensionnelle soumise à un gradient thermique latérale contient un fluide en écoulement convectif pour un nombre de Prandtl petit, est étudié numériquement par **Mercade et al** [18], Figure I.17 pour des nombres de Raleigh croissant. Ils ont trouvé que la transition de l'écoulement stable ayant des solutions périodiques à travers la bifurcation de Hopf supercritique qui maintient d'antisymétrie de la circulation de base une branche quasi-périodique a lieu pour un nombre Ra plus grand dix fois celui de la bifurcation de Hopf dans ce cas-là la solution périodique perd sa stabilité, une branche de solution chaotique obtenue.

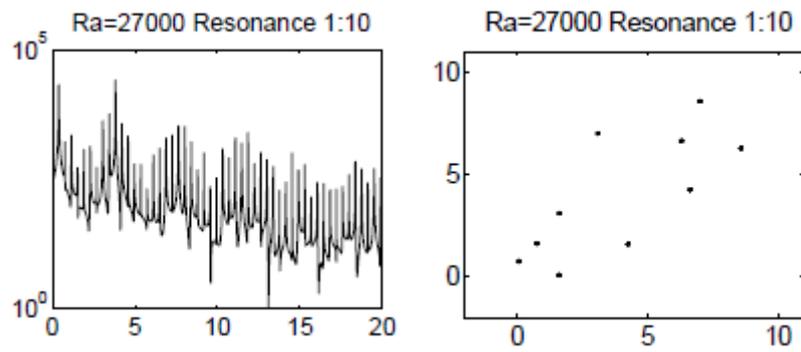


Figure I.17 : Fourier spectra (à gauche) et Poincaré (à droite) pour les solutions $Ra= 27000$ [18].

La bifurcations et chaos dans la convection naturelle à un rouleau avec un nombre Prandtl faible est analysé par **Mercader et al** [19], Figure I.18. Les écoulements convectifs d'un petit liquide de nombre de Prandtl contenus dans une cavité bidimensionnelle soumise à un gradient thermique, ce système est initié un scénario complexe de bifurcation et des solutions périodique de base, conduisant à la coexistence stable de trois fréquence incommensurable et enfin ou chaos, dans tous les cas le comportement complexe dépendant de temps ne rompt pas la structure de base d'un sel rouleau.

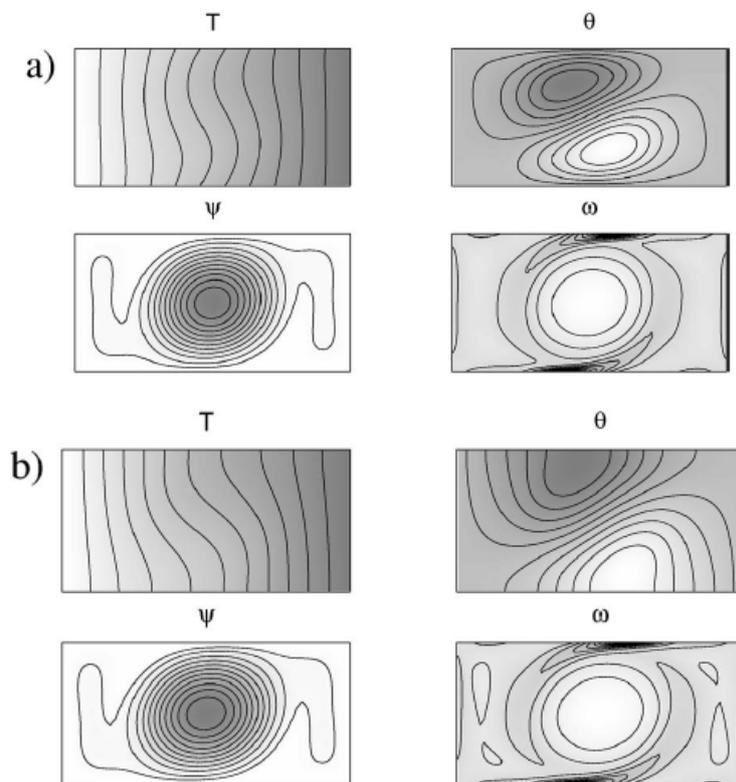


Figure I.18 : Courbes de contour de la température T , déviation de la température T , la fonction V et la verticité w , pour les solutions stables correspondant à (a) le cas parfaitement conducteur ($Ra=1950$) et (b) le cas adiabatique [19].

Le dispositif ci-dessous, représente une cavité rectangulaire haute, avec un rapport d'aspect de nombre de Rayleigh 10, étudié par **Heather Dillon et al** [20], la solution de l'équation de Navier-Stokes faiblement compressible est calculée, pour un intervalle de Rayleigh comprise entre (2 et 2.2) pour un nombre de Nusselt est 0.71. Une analyse spectrale détaillée montre un comportement dynamique du système au-delà de la bifurcation de Hopf. La gamme de Rayleigh la plus large révèle un nouveau comportement dynamique du système pour cette géométrie rectangulaire, Néanmoins un retour à un comportement oscillatoire stable qui n'était pas prévu dans les travaux antérieurs soit lieu. En effet, une décomposition Orthogonale Propre (DOP) a été utilisée pour analyser les résultats de calcul. Ils ont obtenu 5 modes de valeurs propres, en fait ont été nécessaires pour capturer correctement la structure de base de l'écoulement. La POD n'a pas réussi à saisir les aspects subtils de la structure de l'écoulement à des nombres de Rayleigh élevés. Ce qui indique qu'un POD pour plusieurs nombres de Rayleigh seront nécessaires pour reproduire le comportement complexe du système.

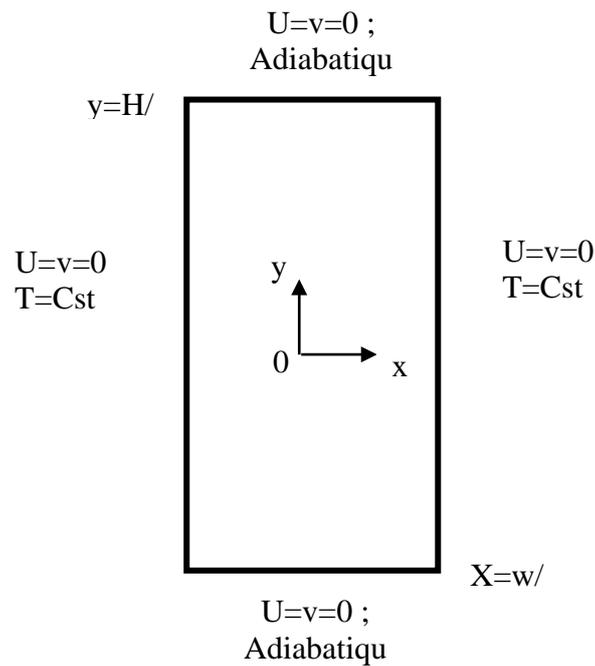


Figure I.19 : Schéma du domaine de calcul [20].

Une convection naturelle instationnaire dans une enceinte Bidimensionnelle carrée (Bifurcation vers le chaos) a été étudiée par **Salah LAOUARET al** [21], Figure I.20 et I.21. Ils ont essayé d'identifier la route vers le chaos d'une cavité carrée contenant de l'Air. Les parois verticales sont différentiellement non uniformément chauffées et les parois horizontales sont adiabatique ils ont étudié le comportement thermique du système par variation du nombre de Rayleigh, les équations sont en formulation et intégrées à l'aide des différences finies.

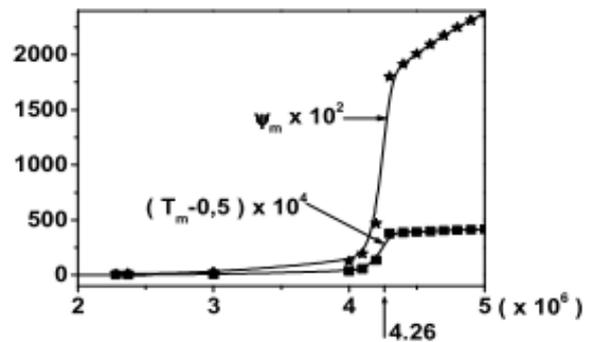
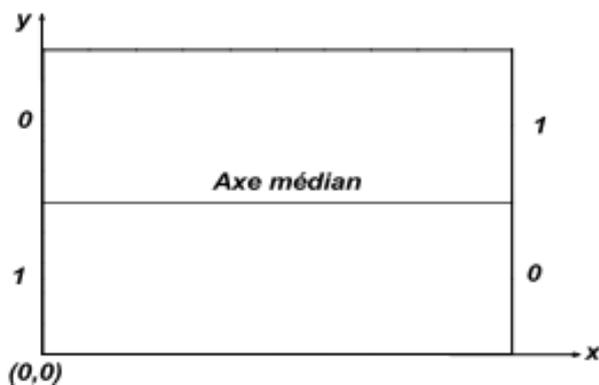


Figure I.20 : détails de l'enceinte [21].

Figure I.21 : diagramme de bifurcation [21].

Tony W et al [22], ils ont étudié numériquement multiples états, topologie et bifurcations de la convection naturelle dans une cavité cubique, Figure I.22. Grâce à l'étude numérique de Tony w qui été menée pour explorer le débit constant non linéaire de faible nombre Prandtl transition thermique dans une cavité cubique chauffée différetiellement ils ont trouvé qu'une seul solution symétrique l'Etat stationnaire, le système de bifurque estime une solution à point fixe vers les deux solutions fixe et les résultats obtenue ont été corroborees par des preuves numérique et l'existence de valeur critique de Ra.

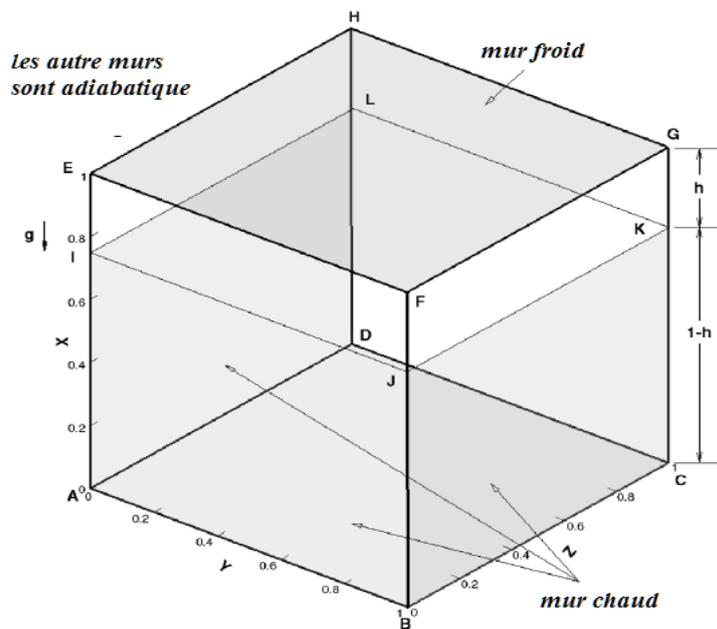


Figure I.22 : Schéma de la cavité thermique étudiée, où ($h = 0,75$ m) et g indiquent respectivement la hauteur des parois chaudes et la gravité [22].

Dans une cavité triangulaire, des écoulements bidimensionnels dans une série de cavités de formes différentes sont étudiées, par **Shunsuke Mizumi et al** [23], Figure I.23. Certaines indications de bifurcation de Hopf sont observées en utilisant l'énergie cinétique totale à un nombre de Reynolds relativement grand. Numériquement, l'équation de Navier-Stokes est décrite par la méthode des éléments finis pour traiter les problèmes reliés aux termes spatiaux, ainsi la méthode de seconde ordre pour résoudre le problème transitoire de terme temporaire de cette équation.

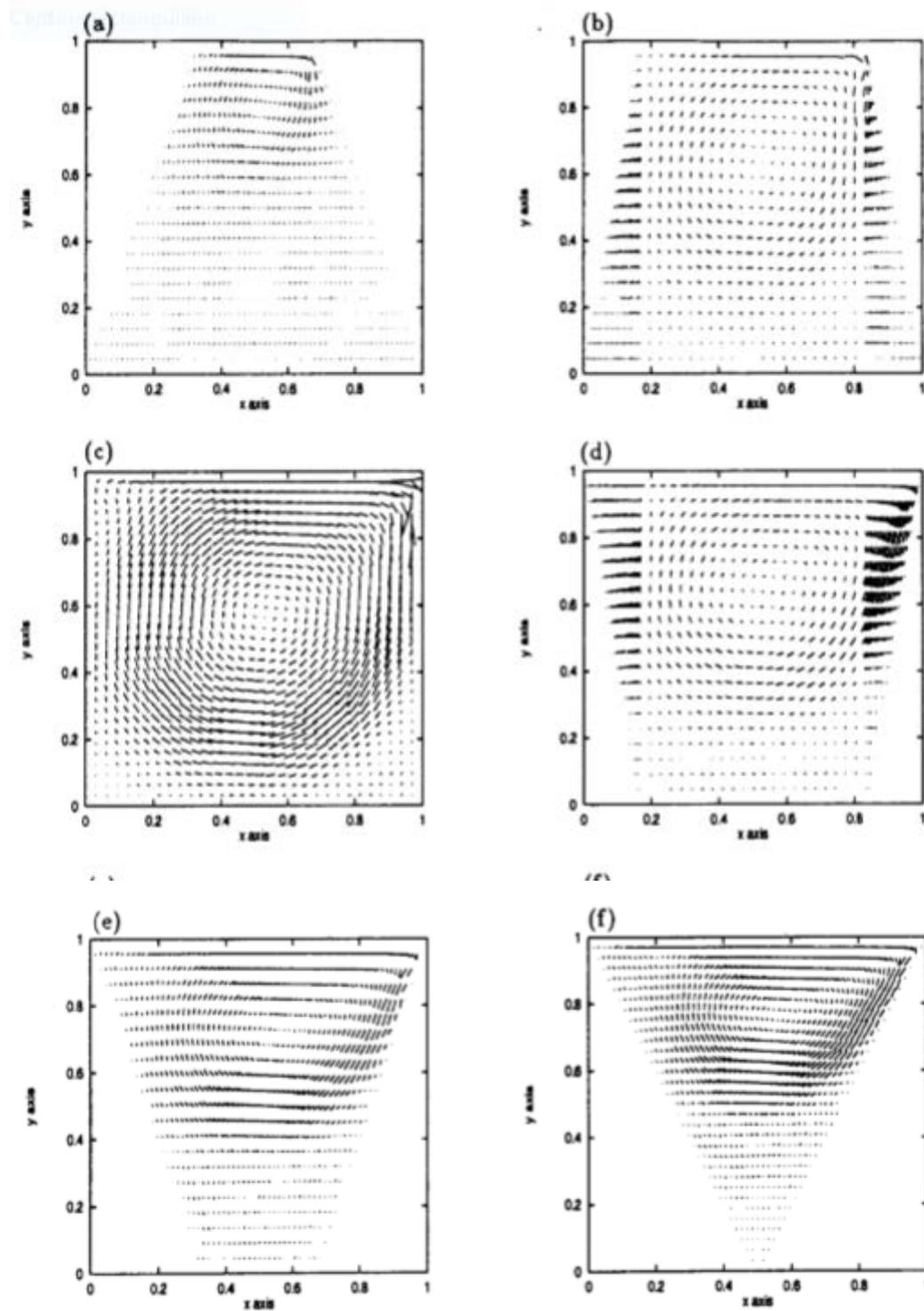


Figure I.23 : cavité régulière s'écoule de différentes formes [23].

Nombreuses voies de convection turbulente ont été menés de la part de **Gollub et al** [24], Figure I.24. d'après les utilisations automatisent des méthodes de laser-doppler ils ont on arrive à mener plusieurs voies à la convection turbulente, le processus de ces méthodes permet à distinguer quatre séquence principale et différents de l'instabilité (le fluide concerne) qui

sont nombre de Prandtl (valeurs faible), c'est des petite perturbations surfaciques sont lieu sur les fluide le cas stationnaire et nombre de Rayleigh des débite stable sont lieu sur un intervalle de valeur de Ra ,et nombre d'itinéraire (géométrie) ayant un mouvement non périodique, grâce à la variation des chemins des particules de ce fluide , et le mouvement quasi-périodique conduit vers l'apparition des perte d'entraînement du système lorsque la bifurcation est augmenté successivement.

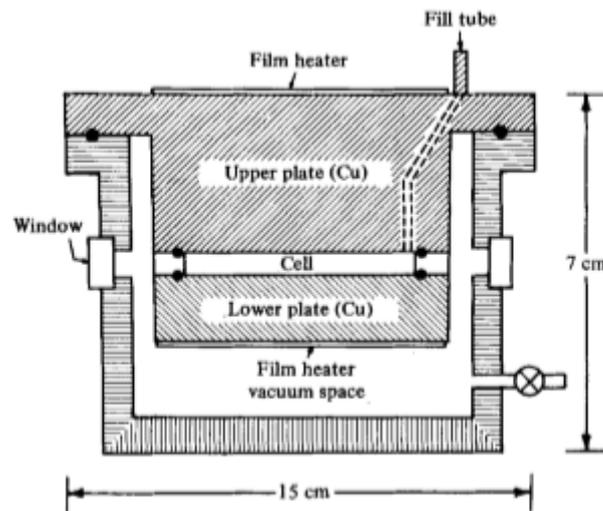


Figure I.24 : Diagramme schématique de la cellule de convection montrant l'espace sous vide et l'accès optique [24].

Simulation numérique de la convection naturelle (en régime laminaire et transitoire) dans une cavité carré est étudié par **aklouché –benouaguel al** [25], Figure I.25. Ils ont constaté les effets de l'augmentation de nombre de Rayleigh sur le transfert de chaleur ainsi que la route vers le chaos emprunté par le flux convectif, la structure de l'écoulement passe de quatre cellules à trois cellules oscillant.

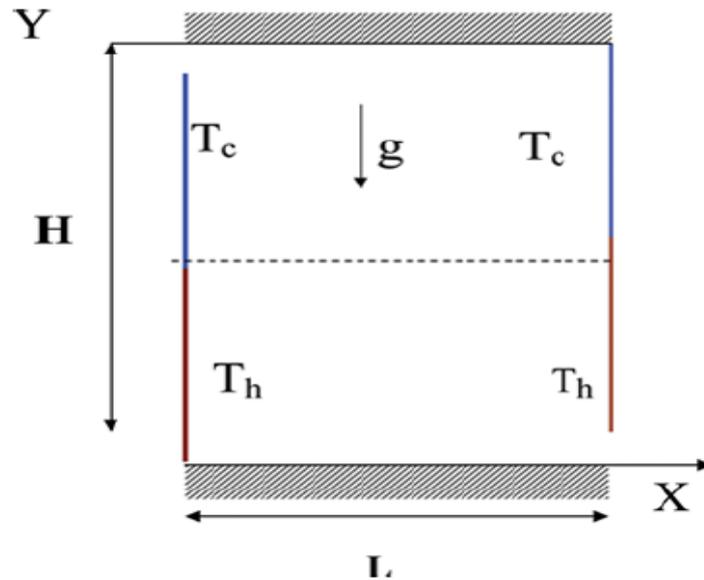


Figure I.25 : Configuration physique du système (figure en disponible en ligne) [25].

Application de la méthode des volumes finis à l'étude de la convection naturelle dans une cavité est étudié par **adnani Massinissa et al** [26], Figure I.26. Les résultats désignent que le transfert de chaleur est élevé avec l'augmentation du nombre de Rayleigh pour les cas prises en considération par la suite, les résultats indiquent que le transfert de chaleur se diffèrent d'un cas à un autre, l'efficacité se donne favorablement au premier cas de chauffage.

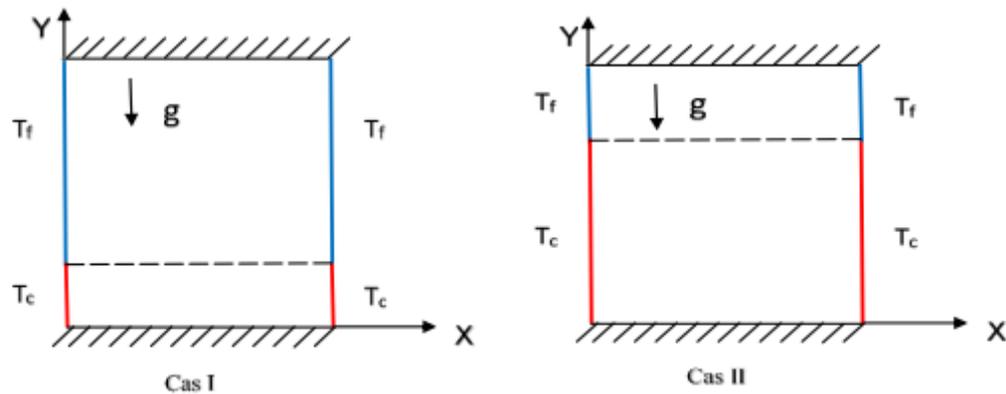


Figure I.26 : géométre du problème [26].

L'effet du rayonnement thermique et de la dissipation visqueuse sur la convection naturelle magnétohydrodynamique d'un fluide micro polaire dans une cavité carrée avec une plaque mince chauffée uniforme et non uniforme est étudié numériquement par **M. Muthamilselvan et all** [27], Figure I.27. Les résultant sont discuté pour différent combinaison de paramètre physique, ils ont constaté que la source est observée que le taux de

transfert augment avec l'augmentation du l'angle d'inclinaison du champ magnétique et la dissipation visqueuse et trouve que le taux global de transfert de chaleur d'un fluide micro polaire et inférieur à celui d'un fluide newtonien.

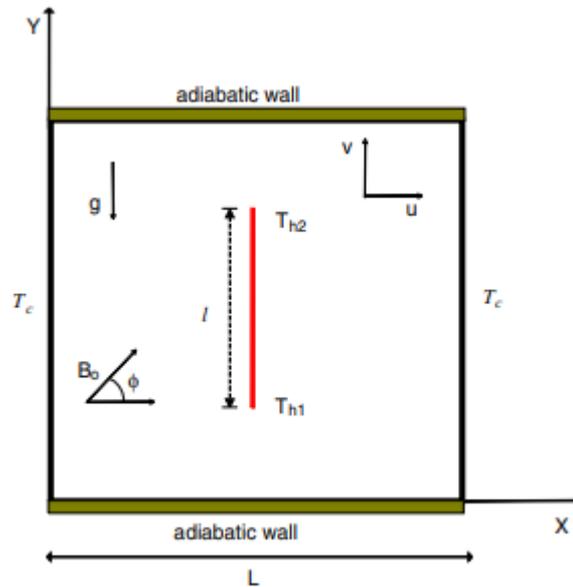


Figure I.27 : Model physique et le système de coordonnées [27].

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a donnée quelque nature de base sur le transfert de chaleur et définition sur les trois modes (conduction, rayonnement, convection).

Suit à cette thèse bibliographique on a constaté que la revue de la littérature est riche par les travaux accumulés au cours de cas dernière année et ayant conduit à une imposante bibliographique riche et spécialisée.

Chapitre II

Modélisation du problème

Modélisation du problème

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va entamer un modèle qui sert à unifier ce qu'on a vu dans le premier chapitre (brèves définitions), notre but maintenant c'est de pouvoir de décrire le mouvement d'un fluide situé dans une cavité carrée verticalement froide selon les deux parois de l'axe(OY). Et horizontalement ayant des conditions rappelées ci-dessous, pour cette raison et d'après la disponibilité des informations on aurait besoin d'intégrer le théorème de Navier-Stokes, et ses équations sont très importantes, en particulier l'équation de la continuité pour avoir étudié le fluide comme étant sa masse soit conservée. Autrement dit cela nous permet d'établir les équations du mouvement selon (OX) et (OY). Et enfin d'avoir extraire l'équation de l'énergie sachant qu'elle est très importante pour connaître l'évolution de notre système, cela implique de savoir deux nombres importants (Ra et Pr) en intégrant la méthode de variables adimensionnelle dans les équations précédentes, en les ajoutant l'hypothèse de Boussinesq, tout ça pour but d'extraire les nombres précédents, puis on va transformer ces nombres vers des paramètres, on aurait besoin de la méthode numériques, c'est la modélisation.

En fin cette modélisation on va l'utiliser dans le chapitre suivant pour étudier les concepts de bifurcation chaotique.

II.2. Présentation du problème physique

Dans ce travail nous étudions la convection naturelle en régime transitoire dans une cavité carrée remplie d'air, les parois verticales maintenue à une température froide, la paroi horizontal supérieure conserve adiabatiquement, est la paroi inferieur maintenue à une température chaude, Figure II.1.

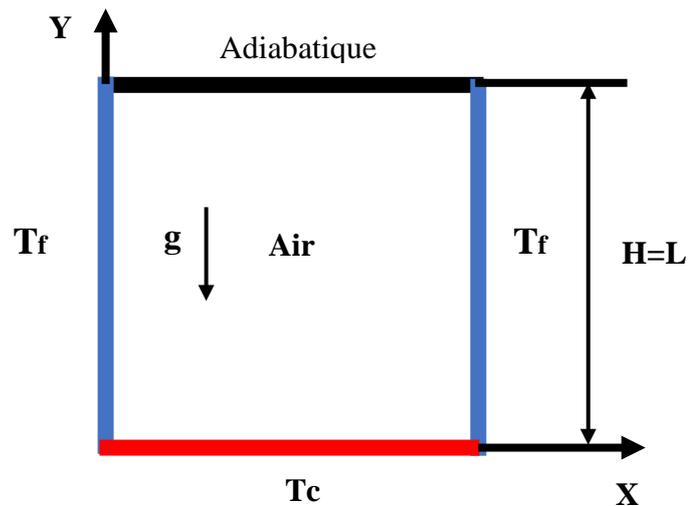


Figure II.1 : Model physique.

II.3. Hypothèse simplificatrices

Toute simulation repose sur une modélisation de problème, donc il est nécessaire d'établir un certain nombre d'hypothèse afin de simplifier les équations de mouvement (Navier-stokes), continuité et l'énergie.

- Le fluide est supposé l'air et incompressible.
- Le régime d'écoulement est transitoire.
- Ecoulement bidimensionnel (suivant les coordonnées cartésiennes x et y).
- Absence de source de chaleur.
- Le rapport de l'énergie rayonnement est négligé

II.4. L'approximation de Boussinesq

Elle consiste à considérer que la variation de la masse volumique est négligeable aux niveaux de tous les termes des équations de quantité de mouvement ($\rho = \rho_0$), à l'exception dans le terme de gravité.

L'hypothèse de Boussinesq suppose que la densité du fluide dans le terme des forces de volume, varie linéairement avec la température, ce qui amène à la relation suivante :

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_c)) \quad (\text{II.1})$$

II.5. Modèle mathématique et équation dimensionnelles

Les équations régissant sur l'écoulement sont les équations de continuité, Navier-stokes et l'équation de l'énergie, qui expriment respectivement, la conservation de la masse, la quantité de mouvement et de l'énergie.

En tenant du compte des hypothèses simplificatrices et l'approximation de Boussinesq cites précédemment, le système d'équations relatif, a un système de coordonnées s'exprime comme suit :

➤ Equation de conservation de la masse (Continuité) :

Le principe de la conservation de la masse mène à l'équation de continuité. Pour un écoulement à deux-dimensions d'un fluide incompressible, l'équation de continuité est :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.2})$$

➤ Equation de la quantité de mouvement :

Le bilan de la quantité de mouvement aboutit, pour un écoulement 2D instationnaire, aux équations régissant le mouvement du fluide dans les directions x et y :

-Equation de quantité de mouvement suivant x :

$$\rho_0 \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.3})$$

-Equation de quantité de mouvement suivant y :

$$\rho_0 \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho_0 g (1 - \beta(T - T_C)) \quad (\text{II.4})$$

➤ Equation d'énergie :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.5})$$

II.6. Variables adimensionnelles et écritures adimensionnelles

Dans le but de généraliser la solution du problème considéré dans cette étude nous procédons à l'adimensionnallisation normalisation consiste à transformer les variables dépendantes et indépendantes en des variables sans dimensions, c'est-à-dire qu'elles seront normalisées par rapport à certaines dimensions caractéristiques. Cela permet de spécifier les conditions d'écoulement avec un nombre restreint de paramètres de façon à rendre la solution plus générale.

Des équations gouvernent régissant le phénomène de la convection naturelle en régime transitoire dans une cavité carrée ont été adimensionnées en utilisant des variables caractéristiques.

$$X = \frac{x}{H}; Y = \frac{y}{H}; U = u \frac{H}{\alpha}; V = v \frac{H}{\alpha}; P = p \frac{H^2}{\rho \alpha^2}; t' = t \frac{H^2}{\rho \alpha}; \theta = \frac{T - T_f}{T_c - T_f} \quad (\text{II.6})$$

Les équations prennent la forme suivant :

➤ **Equation adimensionnelle de conservation massique (continuité) :**

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (\text{II.7})$$

➤ **Equation adimensionnelle de mouvement :**

-Equation de quantité de mouvement suivant X :

$$\frac{\partial U}{\partial t'} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + Pr \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

-Equation de quantité de mouvement suivant Y :

$$\frac{\partial V}{\partial t'} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + PrRa\theta \quad (\text{II.9})$$

➤ **Equation de l'énergie :**

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.10})$$

II. 7. Conditions aux limites sous forme adimensionnelle ($t > 0$) et condition initiales ($t=0$)

➤ **Condition aux limites**

- Parois horizontales : $0 < X < 1$

$$Y=0 \quad U=V=0 ; \theta=1$$

$$Y=1 \quad U=V=0 ; \theta=0$$

- Parois verticales : $0 < Y < 1$

$$X=0 \quad U=V=0 ; \theta=0$$

$$X=1 \quad U=V=0 ; \theta=0$$

➤ **Conditions initiales :**

A $t=0$ on a :

Toute la vitesse égale à 0 et la température adimensionnelle égale à 0,5.

II. 8. Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est le processus par lequel de l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux aux températures différentes, La chaleur peut être transmise par conduction, par convection ou par rayonnement.

En caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et la paroi, grâce à nombre adimensionnelle Nusselt, il met en rapport le transfert par convection par rapport à transfert par conduction.

II.8.1. Nusselt local

Le nombre de Nusselt est une grandeur mathématique adimensionnelle qui caractérise le type de transfert thermique qui se fait entre la paroi et le fluide étudié, tel qu'il met en rapport le transfert par convection sur celui par conduction donc le nombre de Nusselt local caractérise le type de transfert thermique ou niveau régional (endroit à l'intérieur du système que l'on veut étudier) à partir d'une longueur caractéristique (L_c)

Une fonction $f(x)$ définit de 0 vers l'infini

$x \in [0, \infty]$, par analogie

$x \Rightarrow L_c$, $f(x) \Rightarrow Nu(L_c)$

Par définition on a : $Nu = \frac{h}{\lambda} L_c$

Lorsqu'on détermine le nombre de Nusselt on peut déduire le transfert de convection ou conduction à l'aide d'une corrélation [28].

II. 9. Méthode numérique

Est une discipline à l'interface des mathématiques et de l'informatique, elle s'intéresse tant aux fondements qu'à la mise en pratique des méthodes permettant de résoudre, par des calculs purement numériques, des problèmes d'analyse mathématique plus formellement, l'analyse numérique est l'étude des algorithmes permettant de résoudre numériquement par discrétisation les problèmes de mathématiques continues (distinguées des mathématiques discrètes) cela signifie qu'elle s'occupe principalement de répondre de façon numérique à des questions à variable réelle ou complexe comme l'algèbre linéaire numérique sur les champs réels ou complexes, la recherche de solution numérique d'équations différentielles et d'autres problèmes liés survenant dans les sciences physiques et l'ingénierie, branche des mathématiques appliquées, son développement est étroitement lié à celui des outils informatiques.

Le champ de l'analyse numérique est divisé en différentes méthodes suivant le type de problème à résoudre, parmi ces méthodes on trouve la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies, la méthode des différences divisées et la méthode des volumes finis.

Nous avons adopté la méthode des volumes finis, puisque qu'elle est facile à concevoir contrairement à la MEF et à implémenter surtout avec des géométries présentant la variation de quelques paramètres physiques à savoir la permittivité et la masse effectives

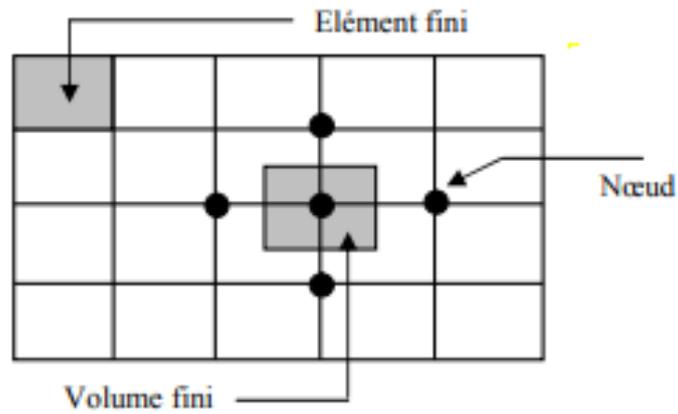


Figure II.2 : Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel.

II. 10. Conclusion

Dans ce chapitre on a vu la modélisation du fluide en le considérant comme étant une problématique similaire au système qui décrit par les équations de Navier-Stokes pour but paramétrer les nombres (Ra et Pr) à partir des méthodes mathématiques et numériques (les variables adimensionnelles et la méthode numérique), donc on a sorti ces paramètres-là.

Chapitre III

Résultats et discussions

Résultats et discussions

III. 1. Introduction

Dans le but de validé la crédibilité de notre travail on a fait recoure à des documents déjà présents dans la littérature, après avoir consulté certains articles qui parlons sur le transfert de chaleur par convection naturelle transitoire (bifurcation et transition vers le chaos) a défèrent nombre de Prandtl, on a trouvé certain résultat numérique qui similaire à notre travail qui s'intéresse à la comparaison et comprendre l'effet de variation de chaque paramètre.

III. 2. Validation des résultats

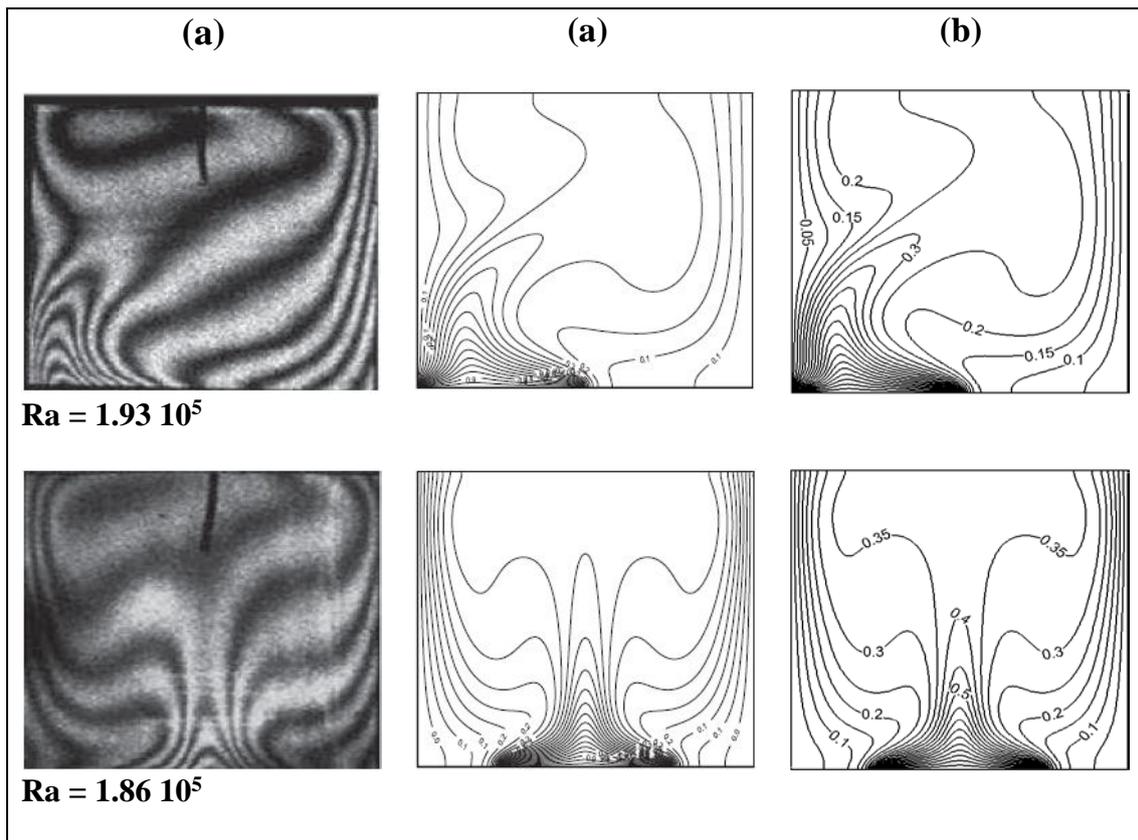


Figure III.1 : Comparaison des résultats (b) et ceux de **M. Muthtamilselvan et al [27](a)**.

Afin de vérifier l'authenticité de l'étude numérique actuelle et le modèle mathématique utilisé, ainsi que la méthode de calcul est validés en comparant les résultats numériques a ceux de **M. Muthamilselvan et all**[27].

La **Figure (III.1)** montre un rapprochement de la distribution des champs dynamique et thermique à travers les résultats obtenus par simulation et les résultats dans la référence, pour des nombres de Rayleigh égal à $Ra = 1.93 \cdot 10^5$ et $Ra = 1.86 \cdot 10^5$.

On a observé que les résultats de nos simulations numériques sont en bon accord à celle de référence.

III.3. Test de maillage

Le choix de maillage est une étape majeure sur les résultats obtenu dans la simulation numérique, cella nécessaire de choisir le meilleur maillage qui servir le problème physique, ça va assurer la précision des résultats.

Nous avons accompli une série de simulation en utilisant des géométries différentes nombres de maille, pour choisir un maillage adapte à notre problème physique.

Les tests ont été accomplis pour des grilles (20x20,40x40, 60x60, 80x80, 100x100, 120x120, 140x140,160x160, 180x180, 200x200 et 220x220) pour un nombre de Rayleigh 10^4 et Prandtl 0,71,

D'après les résultats présents dans la Figure III.2 on a remarqué de 20x20 a 120x120 une augmentation da Nusselt moyenne et à partir de 120x220 en remarque une démunissions du croisement

On a calculé la pente dans le début de la démunissions du croisement a 120x120 en trouve une pente de 2,2% il est inférieur à 4% a cette raison on a choisi les 120x120 nœuds pour la suite du travail.

$$NU = \frac{\Phi * H}{\Lambda * \Delta T} \quad (III.1)$$

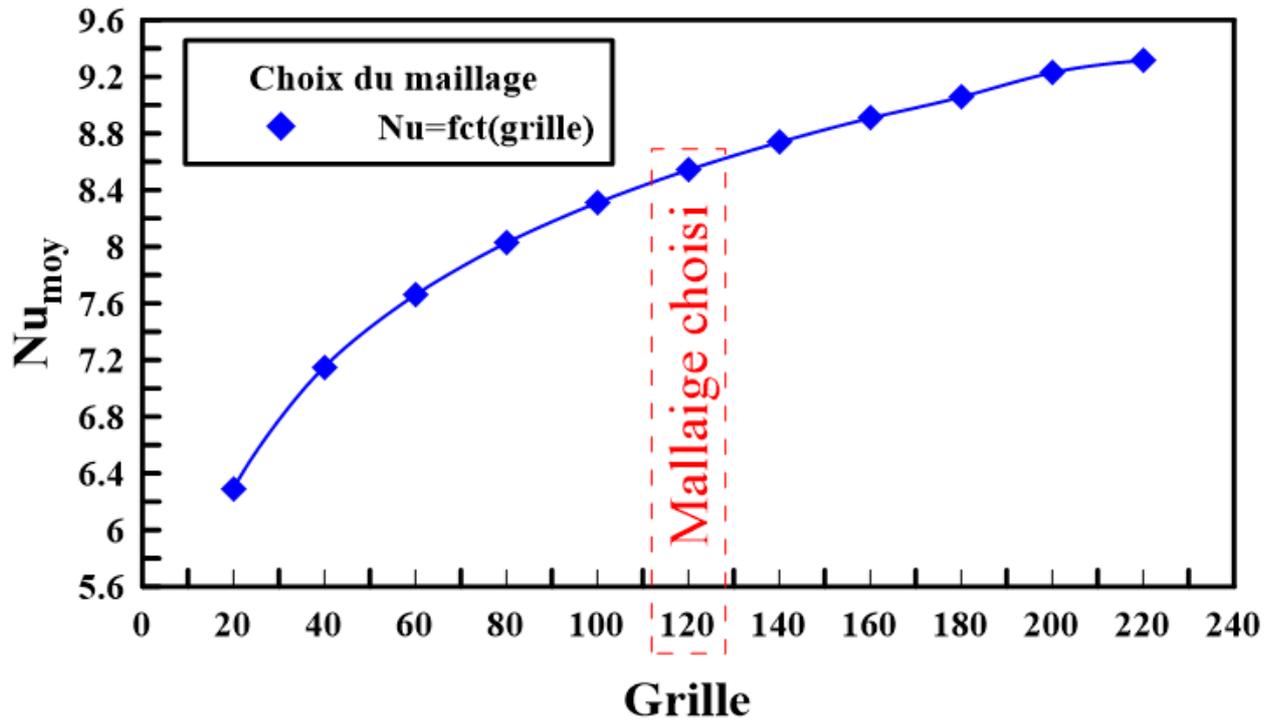


Figure III.2: Nombre de Nusselt moyenne en fonction de la Grille.

III.4. Résultats et discussion

III.4.1. Ligne de courant

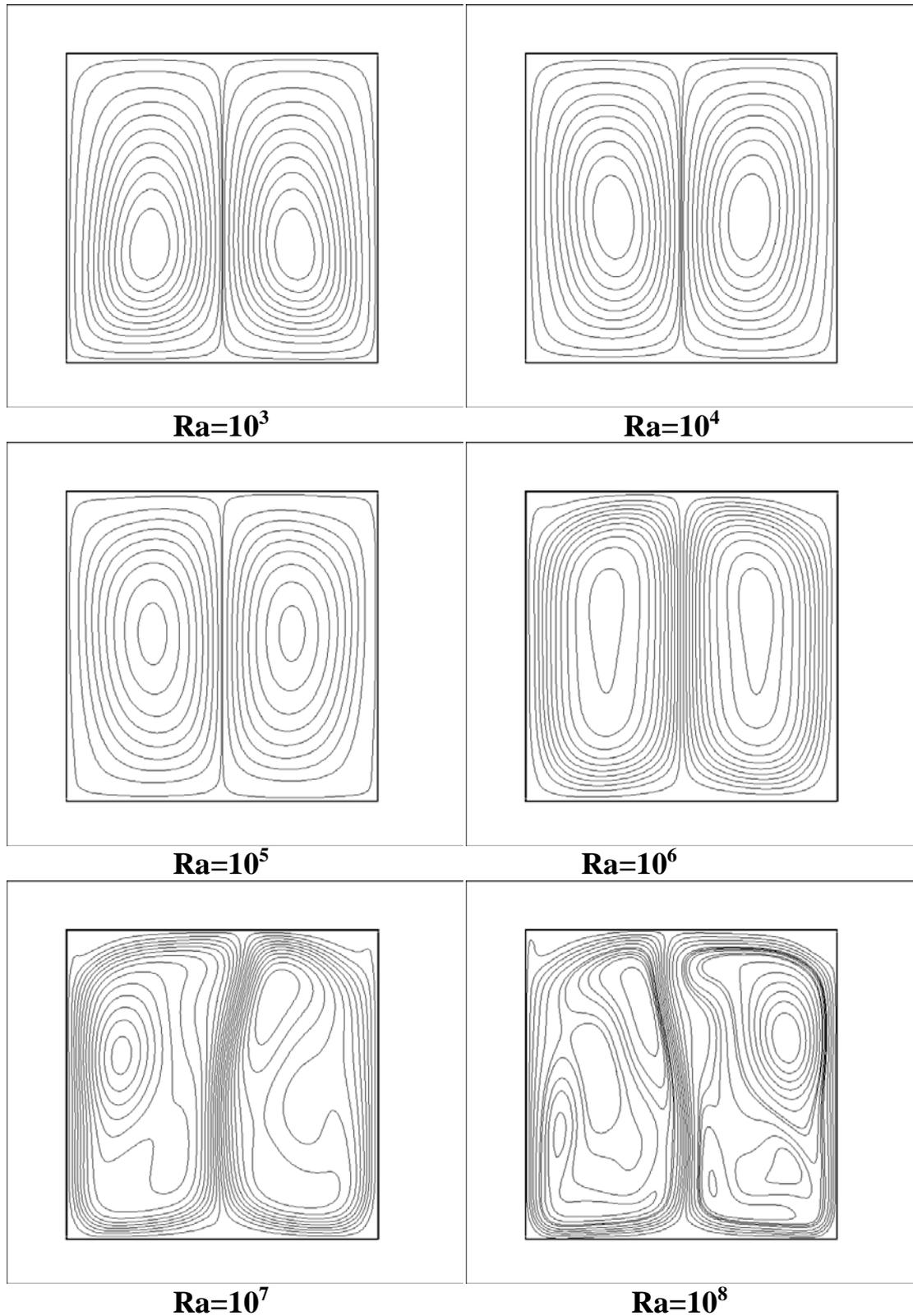


Figure III.3 : Structure des lignes de courant de $Ra=10^3$ jusqu'à 10^8 .

Ce champ est représenté par les contours des lignes de courant dans la **Figure III.3** On remarque la formation de deux cellules contrarotatives dont l'une tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et la deuxième tourne dans le sens contraire. Cette observation est valable pour toutes les valeurs de **Ra**, Le fluide qui est chauffé par la paroi inférieure se déplace vers la paroi supérieure adiabatique, où il se divise en deux flux, l'un se dirige vers la paroi froide verticale gauche et l'autre se dirige vers la paroi froide verticale droite, les deux cellules sont presque égales. Donc la solution présente un écoulement symétrique caractérisé par deux cellules contrarotatives identiques car les conditions aux limites sont symétriques.

Pour le nombre de Ra qui varie entre 10^3 et 10^8 on remarque qu'avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, l'intensité de la recirculation à l'intérieur de l'enceinte augmente et les centres des lignes de courant se déplacent vers le haut.

III.4.2. Ligne isotherme

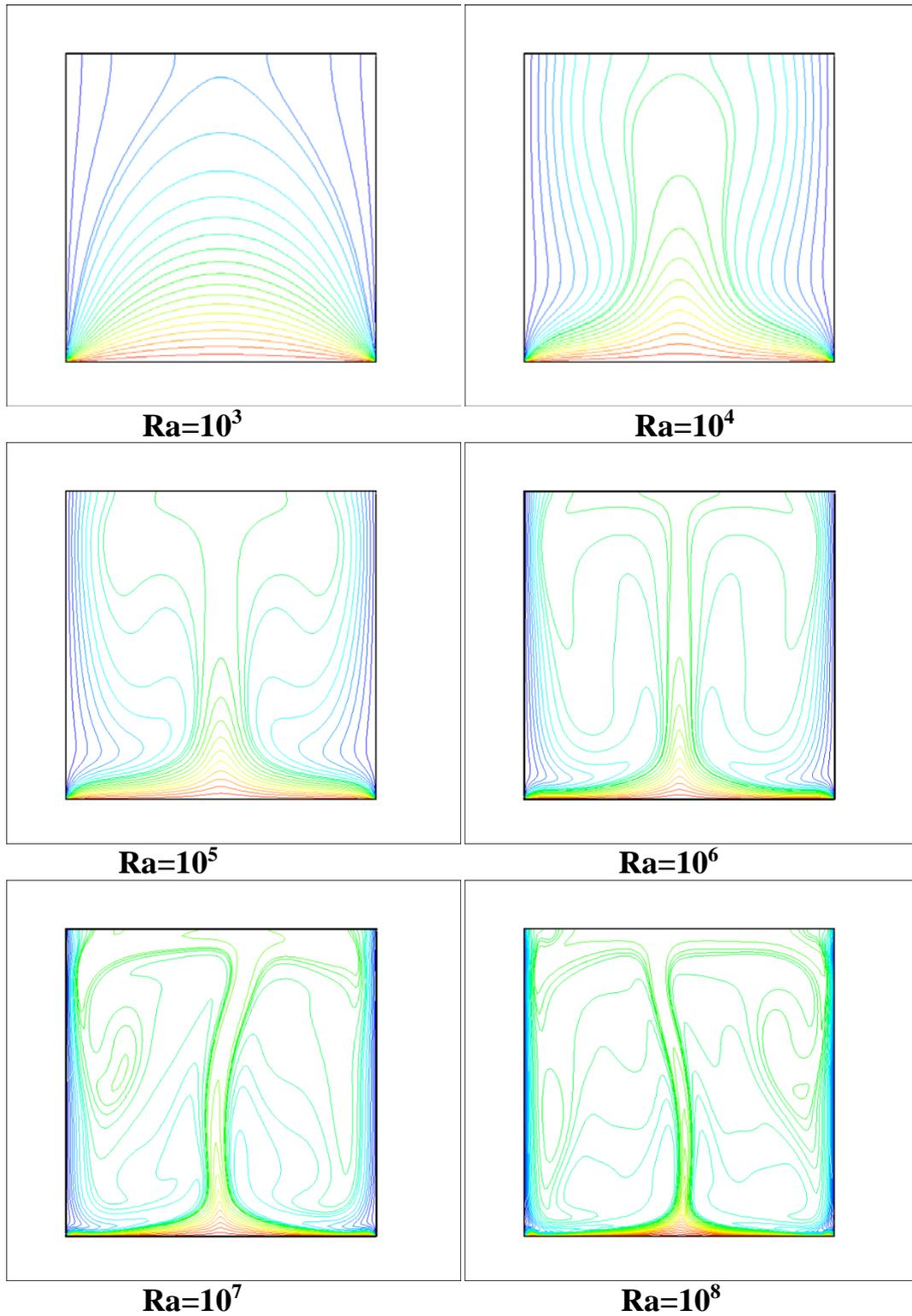


Figure III.4 : La structure des isothermes de $Ra=10^3$ jusqu'à 10^8 .

Ce champ est représenté par les contours des températures dans la **Figure III.4** pour un nombre de Rayleigh qui varie dans l'intervalle $[10^3-10^8]$, la chaleur récupérée de la paroi chaude est transportée par convection vers le haut au milieu de l'enceinte, C'est ce qui explique les températures relativement élevées dans la partie centrale de l'enceinte, La chaleur est évacuée de façon équitable à travers les deux parois latérales. Dans le cas de $Ra > 10^3$ la **Figure III.4** montre que les isothermes changent surtout en fonction de Ra .

Si on compare les isothermes dans la **Figure III.4** pour différentes valeurs de Ra , on peut noter que lorsque le Ra augmente, les isothermes se rapprochent les unes des autres dans la zone située près du mur inférieur chauffé que les gradients de la température deviennent plus élevés à proximité de la paroi inférieure chauffée. Ceci implique une augmentation du transfert thermique à travers la paroi inférieure de l'enceinte pour un plus haut nombre de Ra . Donc on peut dire que les températures les plus élevées sont celles du fluide qui circule parallèlement à la paroi chauffée, tandis que les températures les plus basses sont celles du fluide qui circule parallèlement aux parois froides. Ainsi le fluide s'échauffe en contact de la région chauffée, se refroidit en contact des parois froides.

III.4.3. Les attracteurs

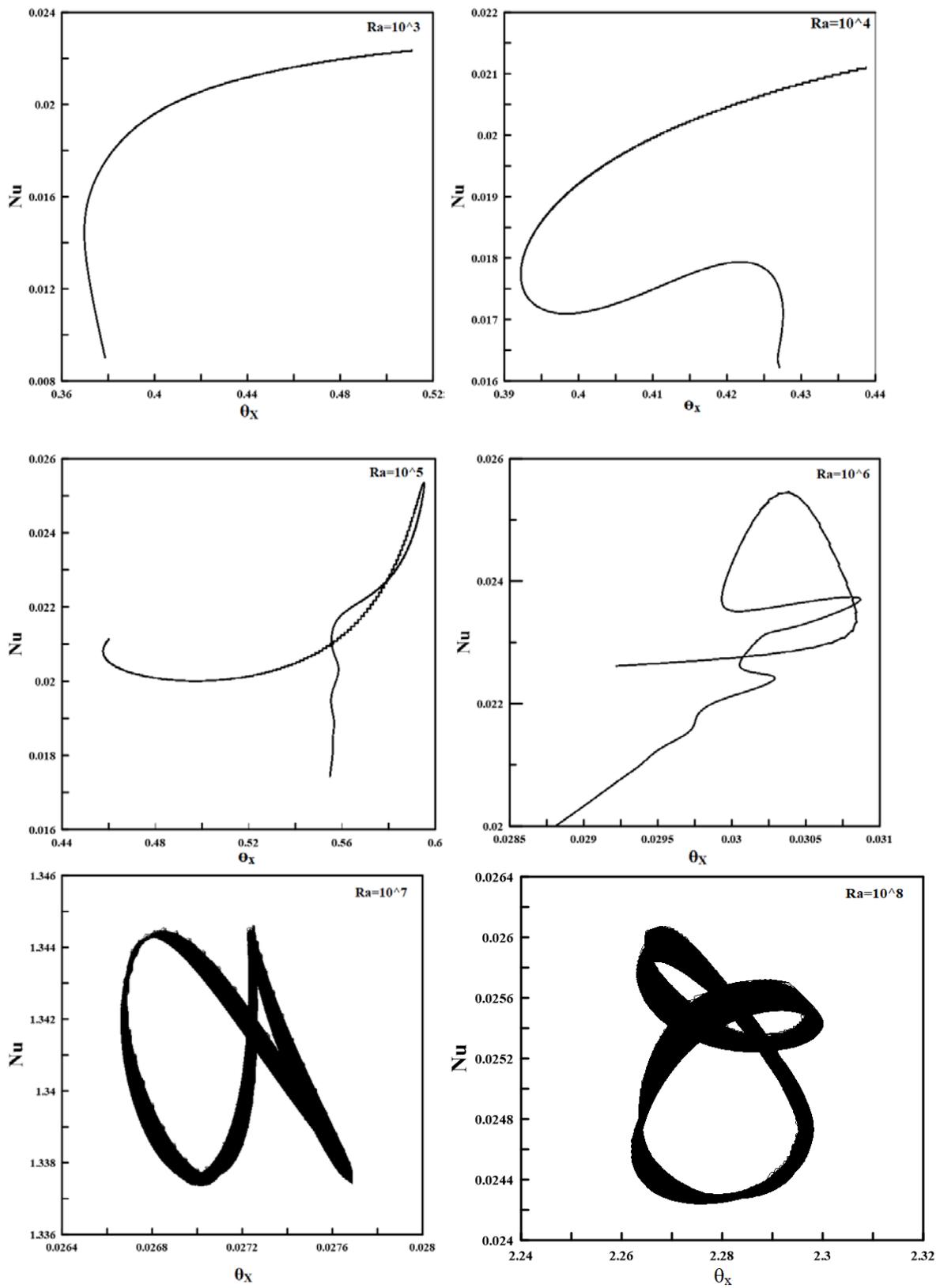


Figure III.5 : les courbe de Nusselt en fonction de téta x, y=0.025m, a Ra [10³-10⁸].

La figure III.5 montre qu'à chaque fois on augmente le nombre de Rayleigh (Ra), les courbes concernées changent radicalement d'un type d'attracteur vers un autre.

Tel que

À Ra égale 10^3 on remarque que le régime est laminaire de type (ponctuel), et à Ra= 10^4 on remarque le régime et le type restent les mêmes que le précédent, Mais à 10^5 le changement commence à s'apparuer, et le régime devient périodique, et puis à Ra= 10^6 le régime devient quasi-périodique, Ra= 10^7 l'effet papillon s'apparue avec un régime de type (étrange), Ra= 10^8 la route vers le chaos domine avec le régime (strange).

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les résultats numériques de la convection naturelle transitoire, et on présente des effets de différents paramètres sur la structure des lignes de courant et les lignes isotherme et l'évolution de nombre de Nusselt, et d'après la validation de notre travail et que les résultats obtenus sont similaires à ceux de l'article de référence.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail présente nous a permis à étudier de façon numérique le transfert thermique pour un phénomène irréversible au régime transitoire de convection naturelle en déduire la bifurcation et transition vers le chaos pour un fluide classique (air) confiné dans une cavité carrée, en ayant les conditions permanentes de la température.

Premièrement, on a défini les dévers type du transfert thermique sous forme générale.

Deuxièmement, on a modélisé notre problème physique, en commençant par la schématisation du notre système, et puis on a établi quelques hypothèses qui nous permet de simplifier l'analyse différentiel, et par la suite on a déduit le mouvement.

En utilisant l'approximation de Boussinesq pour but négliger la variation interne de la masse volumique, et laisse uniquement la variation de température.

On a défini les équations différentielles de Navier-Stokes pour déduire le type du mouvement et pouvoir démontrer le principe de conservation (énergétique, massique et impulsion) ce qui implique l'équation de continuité.

La discussion de validation et les résultats concernés ; on a validé notre travail à un article scientifique qui traite la convection naturelle (conviction of micropolarfluid in à square cavitywith an insideheater).

On a le pouvoir d'avoir des résultats précis en faisant le teste du maillage pour un choix efficace dans la simulation numérique. Après on arrive à déterminer la géométrie thermique de notre système à partir des lignes du courant et les lignes iso-thermiques à l'intérieur.

En effet, l'objectif de notre étude c'est de savoir le lien entre le transfert classique et le concept du chaos, le fait qu'une transition chaotique soit lieu, la méthode utilisée c'est (ensemble-limites) ou les attracteurs.

- Cette étude nous a enseigne qu'une petite modification dans n'importe quel milieu dynamique dans tout l'univers mène à sortir avec des résultats giga-géants, tout ça aide l'humanité à prédire tous les résultats pour des processus concernés.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] F. Penot, “cour Transfert de chaleur,” *Solutions*, vol. 15, pp. 207–212, 1980.
- [2] M. Odule and S. Mergui, “cours de transferts thermiques” 2017, université SORBONNE, licence de mecanique 2eme annee
- [3] I. SAADI., “Théorie de Bifurcations et Applications”,mémoire, université mohamed khider, biskra, Juin 2019.
- [4] Z. Gao, B. Podvin, A. Sergent, and S. Xin, “Chaotic dynamics of a convection roll in a highly confined, vertical, differentially heated fluid layer,” *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 91, no. 1, pp. 1–14, 2015, doi: 10.1103/PhysRevE.91.013006.
- [5] A. Djerrai, “ études des systèmes dynamiques tridimensionnels ” ,thèse de doctorat Université Badji Mokhtar Annaba, Faculté des Sciences département de mathématiques ,2017.
- [6] M. Adnani, B. Meziani, O. Ourrad, and M. Zitoune, “Natural convection in a square cavity: Numerical study for different values of Prandtl number,” *Fluid Dyn. Mater. Process.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–14, 2016, doi: 10.3970/fdmp.2016.012.001.
- [7] F. Kieno, A. Ouedraogo, O. M. Zongo, J. D. Bathiebo, and B. Zeghmati, “Numerical Study of the Routes toward Chaos of Natural Convection within an Inclined Enclosure,” *J. Sci. Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 105–117, 2012, doi: 10.3329/jsr.v5i1.10709.
- [8] S. Xin and P. Le Quéré, “Natural-convection flows in air-filled, differentially heated cavities with adiabatic horizontal walls,” *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 50, no. 5, pp. 437–466, 2006, doi: 10.1080/10407780600605039.
- [9] S. Laouar, E. Mezaache, and M. Daguene, “Analysis of the Quasi Periodic Scenario Leading to Chaos in a Square Cavity,” *Int. J. Heat Mass Transf. - Theory Appl.*, vol. 3, no. 2, p. 38, 2015, doi: 10.15866/ireheat.v3i2.8199.
- [10] G. De Gassowski, S. Xin, and O. Daube, “Bifurcations et solutions multiples en cavité 3D différentiellement chauffée,” *Comptes Rendus - Mec.*, vol. 331, no. 10, pp. 705–711, 2003, doi: 10.1016/S1631-0721(03)00145-1.
- [11] A. Javam and S. W. Armfield, “Stability and transition of stratified natural convection

- flow in open cavities,” *J. Fluid Mech.*, vol. 445, no. December 2001, pp. 285–303, 2001, doi: 10.1017/s0022112001005614.
- [12] Z. Gao, A. Sargent, B. Podvin, S. Xin, P. Le Quéré, and L. S. Tuckerman, “Transition to chaos of natural convection between two infinite differentially heated vertical plates,” *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 88, no. 2, pp. 1–18, 2013, doi: 10.1103/PhysRevE.88.023010.
- [13] S. Laouar *et al.*, “Convection naturelle instationnaire dans une enceinte bidimensionnelle carrée - Bifurcation vers le chaos -,” pp. 1–6,, 52 Avenue de Villeneuve, 66860 Perpignan Cedex, France, 2007.
- [14] J. S. Yoo and S. M. Han, “Transitions and chaos in natural convection of a fluid with $Pr = 0.1$ in a horizontal annulus,” *Fluid Dyn. Res.*, vol. 27, no. 4, pp. 231–245, 2000, doi: 10.1016/S0169-5983(00)00004-6.
- [15] E. K. Lakhal, M. Hasnaoui, and P. Vasseur, “ Etude numérique de la convection naturelle transitoire au sein d'une cavité chauffée périodiquement avec différents types d'excitations,” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42 (1999) 3927±3941 vol. 42, 1999.
- [16] E. S. M.-G. O. BOULOUMOU, “Simulation numérique 3D par méthode spectrale d'un écoulement de convection naturelle en approximation faible e nombre de Mach Abstract :,” pp. 1–6, MSNM-GP UMR 6181. 38 rue F. Joliot-Curie. 13451 Marseille cedex 20 ,2009.
- [17] S. W. Armfield, N. Williamson, W. Lin, and M. P. Kirkpatrick, “Nusselt number scaling in an inclined differentially heated square cavity,” *Proc. 19th Australas. Fluid Mech. Conf. AFMC 2014*, no. December, 2014.
- [18] I. Mercader, O. Batiste, X. Ruiz, and C. Nord, “Quasi-Periodicity and Chaos in Differentially Heated Cavity ,” Dep. Fisica Aplicada. Universitat Politècnica de Catalunya. M`odul B4, Campus Nord, 08034 Barcelona, Spain. Lab. Fisica Aplicada Facultat de Ci`encies Qu`imiques Univesitat Rovira i Virgili. 43005 Tarragona, Spain.
- [19] I. Mercader, O. Batiste, L. Ramírez-Piscina, X. Ruiz, S. Rüdiger, and J. Casademunt, “Bifurcations and chaos in single-roll natural convection with low Prandtl number,” *Phys. Fluids*, vol. 17, no. 10, pp. 1–13, 2005, doi: 10.1063/1.2107907.
- [20] H. Dillon, A. Emery, and A. Mescher, “Analysis of chaotic natural convection in a tall rectangular cavity with non-isothermal walls,” *Front. Heat Mass Transf.*, vol. 4, no. 2, 2013, doi: 10.5098/hmt.v4.2.3004.
- [21] S. Laouar *et al.*, “Convection naturelle instationnaire dans une enceinte

- bidimensionnelle carrée - Bifurcation vers le chaos -,” no. January 2015, 2007.
- [22] T. W. H. Sheu, H. P. Rani, T. C. Tan, and S. F. Tsai, “Multiple states, topology and bifurcations of natural convection in a cubical cavity,” *Comput. Fluids*, vol. 37, no. 8, pp. 1011–1028, 2008, doi: 10.1016/j.compfluid.2007.11.003.
- [23] S. Mizumi, “Cavity Flows in Different Domains and Bifurcation,” no. July, 1995.
- [24] J. P. Gollub and S. V. Benson, “Many routes to turbulent convection,” *J. Fluid Mech.*, vol. 100, no. 3, pp. 449–470, 1980, doi: 10.1017/S0022112080001243.
- [25] S. Akluouche-Benouaguef, B. Zeghmati, and K. Bouhadeh, “Numerical simulation of chaotic natural convection in a differentiated closed square cavity,” *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 65, no. 3, pp. 229–246, 2014, doi: 10.1080/10407782.2013.826113.
- [26] A. Massinissa, M. Bachir, and O. Ouerdia, “Application de la méthode des volumes finis à l'étude de la convection naturelle dans une cavité,” *CFD & Tech* 2016.
- [27] M. Muthamilselvan, K. Periyadurai, and D. H. Doh, “Convection of micropolar fluid in a square cavity with an inside heater,” *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 31, no. 4, pp. 817–831, 2017, doi: 10.2514/1.T5075.
- [28] M. Gdp and P. Marty, “TRANSFERTS THERMIQUES CONVECTIFS Master 2 GdP Ph. Marty 2012-13,” 2012.

Résumé

Dans ce mémoire de fin du cycle, une étude numérique de la convection naturelle transitoire (bifurcation et transition vers le chaos) pour un système d'une cavité carrée remplie de fluide classique (air) caractérisée par le nombre de Prandtl (0,71) faite, les deux parois parallèles verticalement sont froides, tandis que la paroi horizontale inférieure maintenue est chaude, et l'autre paroi supérieure est adiabatique. L'étude est réalisée pour un nombre de Rayleigh ($10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8$), les résultats obtenus déduisent que l'augmentation du nombre de Rayleigh fait réagir notre fluide d'une façon fluctuante du régime interne.

En effet cette étude mène à exploiter les concepts qui concernent la route vers le chaos, en sauvegardant les conditions permanentes pour les différentes températures qui existent dans les quatre parois citées.

Mots clés : convection naturelle transitoire, bifurcation, transition vers le chaos, la route vers le chaos.

Abstract

In this thesis, a numerical study of the transient natural convection (bifurcation and transition to chaos) for a system of a square cavity filled with classical fluid (air) characterized by the Prandtl number (0.71) is made, the two vertically parallel walls are cold, while the lower horizontal wall maintained is hot, and the other upper wall is adiabatic, the study is carried out for a Rayleigh number (103,104,105,106,107,108), the results obtained deduce that the increase of Rayleigh number makes our fluid react in a fluctuating way of the internal regime.

In fact, this study leads to exploit the concepts that concern the road to chaos, saving the permanent conditions for the different temperatures that exist in the four walls mentioned.

Keywords: transient natural convection, bifurcation, transition to chaos, the road to chaos

Résumé

Dans ce mémoire de fin de cycle, une étude numérique de la convection naturelle transitoire (bifurcation et transition vers le chaos) pour un système d'une cavité carrée remplie de fluide classique (air) caractérisée par le nombre de Prandtl (0,71) faite, les deux parois parallèles verticalement sont froides, tandis que la paroi horizontale inférieure maintenue est chaude, et l'autre paroi supérieure est adiabatique. L'étude est réalisée pour un nombre de Rayleigh ($10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8$), les résultats obtenus déduisent que l'augmentation du nombre de Rayleigh fait réagir notre fluide d'une façon fluctuante du régime interne.

En effet cette étude mène à exploiter les concepts qui concernent la route vers le chaos, en sauvegardant les conditions permanentes pour les différentes températures qui existent dans les quatre parois citées.

Mots clés : convection naturelle transitoire, bifurcation, transition vers le chaos, la route vers le chaos.

Abstract

In this thesis, a numerical study of the transient natural convection (bifurcation and transition to chaos) for a system of a square cavity filled with classical fluid (air) characterized by the Prandtl number (0.71) is made, the two vertically parallel walls are cold, while the lower horizontal wall maintained is hot, and the other upper wall is adiabatic. The study is carried out for a Rayleigh number (103,104,105,106,107,108), the results obtained deduce that the increase of Rayleigh number makes our fluid react in a fluctuating way of the internal regime.

In fact this study leads to exploit the concepts that concern the road to chaos, saving the permanent conditions for the different temperatures that exist in the four walls mentioned.

Keywords: Keywords transient natural convection, bifurcation, transition to chaos, the road to chaos