

	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	
	People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	
	Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم	
	Abdel Hamid Ibn Badis University – Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا	
	Faculty of Sciences and Technology	
	قسم الهندسة الميكانيكية	
	Department of Mechanical Engineering	

**N° d'ordre : M2...../GM/2024**

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie mécanique**

**Spécialité : Energétique**

### Thème

**Etude de la convection naturelle dans une cavité symétriquement refroidie et chauffée par le bas avec des cloisons**

**Présenté par**

- 1- LOUALAA Mustapha
- 2- GOUACH Mohammed Sofiane

**Soutenu le 25/ 06/ 2024 devant le jury composé de :**

<b>Président(e) :</b>	RETEL Nouredine	<b>Professeur</b>	<b>Université de Mostaganem (UMAB)</b>
<b>Examineurs :</b>	SAHRAOUI Nassim	<b>Maitre de Conférences "B"</b>	<b>Université de Mostaganem (UMAB)</b>
<b>Encadrant (e) :</b>	HOUAT Samir	<b>Professeur</b>	<b>Université de Mostaganem (UMAB)</b>

**Année universitaire 2023 / 2024**

## Remerciement

Tout d'abord, nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour mener à bien ce travail et grâce à lui nous sommes arrivés à ce moment.

Nous tenons à remercier vivement et chaleureusement notre encadreur le Professeur HOUAT Samir, pour sa patience, ses précieux conseils et parce qu'il nous a aidés dans notre chemin et nous a donné la bonne ambiance pour travailler dans ce projet.

Nous tenons à exprimer aussi nos remerciements :

Aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Et à nos familles, avec leur soutien et leurs prières, nous avons pu mener à bien ce travail.

## Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma très chère mère, Pour son soutien, sa patience et ses encouragements.

A mon très cher père que Dieu ait pitié de lui.

A ma sœur et toute ma famille.

A mes amis.

Merci.

LOUALAA Mustapha

Je dédie ce travail :

A ma très chère mère, Pour son soutien, sa patience et ses encouragements.

A mon très cher père, Pour m'assurer d'atteindre ce niveau et Pour son empressement à mener à bien ce travail.

A ma sœur et toute ma famille.

A mes amis.

Merci.

GOUAICH Mohammed Sofiane

## **Résumé :**

Le travail consiste à faire une analyse numérique de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire fermée. Les parois verticales sont supposées froides, celle du haut est adiabatique et celle du bas et supposée chaude avec des obstacles. L'étude paramétrique est suivant la variation du nombre de Rayleigh et la présence des obstacles chauds sur la structure de l'écoulement. L'analyse des résultats englobe l'étude des structures dynamiques et thermiques de l'écoulement, qui sont présentées sous forme des lignes de courant, des isothermes, des profils de température et des profils des vitesses. L'étude est réalisée en utilisant le logiciel Fluent basé sur la méthode des volumes finis. Les résultats ont montré que pour les trois configurations étudiées notamment, la cavité rectangulaire simple, la cavité rectangulaire avec un seul obstacle chaud et la cavité rectangulaire avec trois obstacles chauds, illustre que : la convection naturelle est liée fortement à l'augmentation du nombre de Rayleigh ; et la présence des obstacles chauds dans la cavité engendre une augmentation de la température dans l'enceinte fermée et une accélération des particules fluides.

## **Abstract:**

The work consists of a numerical analysis of the natural convection in a closed rectangular cavity. The vertical walls are supposed to be cold; the top is adiabatic and the bottom is supposed to be warm with obstacles. The parametric study is according to the variation of the Rayleigh number and the presence of hot obstacles on the flow structure. The analysis of the results includes the study of dynamic and thermal flow structures, which are presented in the form of streamlines, isotherms, temperature profiles and velocity profiles. The study is carried out using the Fluent software based on the finite volume method. The results showed that for the three configurations studied in particular, the simple rectangular cavity, the rectangular cavity with a single hot obstacle and the rectangular cavity with three hot obstacles, illustrates that: natural convection is strongly related to the increase in the Rayleigh number; and the presence of hot obstacles in the cavity causes an increase in the temperature in the closed enclosure and an acceleration of the fluid particles.

## ملخص:

يتكون العمل من تحليل عددي للحمل الطبيعي في تجويف مستطيل مغلق. من المفترض أن تكون الجدران الرأسية باردة، والقمة غدية ومن المفترض أن يكون القاع دافئاً مع وجود عقبات. يتم إجراء الدراسة المحورية وفقاً لتباين رقم Rayleigh ووجود عوائق ساخنة على هيكل التدفق. يشمل تحليل النتائج دراسة هياكل التدفق الديناميكي والحراري، والتي يتم تقديمها في شكل خطوط حالية، وخطوط الحرارة، وملامح درجات الحرارة، وملامح السرعة. يتم إجراء الدراسة باستخدام برنامج Fluent بناءً على طريقة الحجم المحدود. أظهرت النتائج أنه بالنسبة للتكوينات الثلاثة التي تمت دراستها على وجه الخصوص، فإن التجويف المستطيل البسيط والتجويف المستطيل مع عقبة ساخنة واحدة والتجويف المستطيل مع ثلاث عوائق ساخنة، توضح أن: الحمل الحراري الطبيعي مرتبط ارتباطاً وثيقاً بزيادة عدد راييلي؛ ووجود عوائق ساخنة في التجويف يسبب زيادة في درجة الحرارة في السياج المغلق وتسارع في جزيئات السائل

## Liste des figures

<b>Figure.I.1</b> : La configuration physique et condition aux limites .....	15
<b>Figure II.1</b> : interface de gambit.....	23
<b>Figure II.2</b> : menu général de gambit définir la géométrié.....	24
<b>Figure II.3</b> :Fonction principale.....	24
<b>Figure II.4</b> :Définition de la géométrie.....	25
<b>Figure II.5</b> :choix des dimension du domaine de calcule.....	26
<b>Figure II.6</b> :introduire l'équation d'énergie.....	26
<b>Figure II.7</b> :Définitiondes caractéristique du fluide.....	27
<b>Figure II.8</b> :Operting conditions.....	28
<b>Figure II.9</b> :Conduction aux limites.....	28
<b>Figure II.10</b> :L'initialisation.....	29
<b>Figure II.11</b> :Choix de la solution.....	30
<b>Figure II.12</b> :Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence.....	30
<b>Figure II.13</b> :Choix du nombre des itérations.....	31
<b>Figure II.14</b> :Allures de l'évolution de la convergence du calcul de calcul.....	31
<b>Figure III.1</b> : schéma de cavité.....	34
<b>FigureIII.2</b> : Validation de maillage $Nu=f(\text{maillage})$ pour $Ra=10^4$ .....	35
<b>Figure III.3</b> : Profils de température $\theta$ suivant X à Y/2.....	36
<b>Figure III.4</b> : Profils de vitesse V suivant X à Y/2.....	36
<b>Figure III.5</b> : Les isotherme et lignes de courant en fonction de nombre de Rayleigh.....	39
<b>Figure III.6</b> schéma de cavité rectangulaire.....	40
<b>Figure III.7</b> : Validation de maillage $Nu=f(\text{maillage})$ pour $Ra=10^4$ .....	40
<b>Figure III.8.1</b> : Profils de température $\theta$ suivant X à Y/2.....	41
<b>Figure III.8.2</b> : Profils de vitesse V suivant X à Y/2.....	41
<b>FigureIII.9</b> : Les isotherme et lignes pour les différentes valeurs de nombre de Rayleigh.....	43

<b>Figure III.10</b> : Profils de température $\theta$ suivant X à Y/2.....	44
<b>Figure III.11</b> : Profils de vitesse V suivant X à Y/2.....	44
<b>Figure III.12</b> : Configuration physique de la cavité avec un seul obstacle.....	45
<b>Figure III.13</b> : Les isotherme et lignes pour les différentes valeurs de nombre de Rayleigh.....	46
<b>Figure III.14</b> : Profils de température $\theta$ suivant X à Y/2.....	47
<b>Figure III.15</b> : Profils de vitesse V suivant X à Y/2.....	47
<b>Figure III.16</b> : Configuration physique de la cavité avec trois obstacles chauds.....	48
<b>Figure III.17</b> : Les isotherme et lignes pour les différentes valeurs de nombre de Rayleigh.....	49
<b>Figure III.18</b> : Profils de température $\theta$ suivant X à Y/2.....	50
<b>Figure III.19</b> : Profils de vitesse V suivant X à Y/2.....	50
<b>Figure III.20</b> : La variation de Nusselt en fonction du Nombre de Rayleigh .....	51

# Sommaire

## Introduction générale

Chapitre I : .....	11
I-1- Introduction : .....	12
I-2- Le transfert de chaleur par convection : .....	12
I-3- La convection naturelle: .....	
I-4-Etude bibliographique : .....	13
I-5-Hypothèse simplificatrices usuelles: .....	16
I-6 Equations régissant le mouvement : .....	17
I-6-1 Equation de continuité (conservation de la masse) : .....	17
I-6-2 Equation de conservation de la quantité de mouvement: .....	17
I-6-3 Equation d'énergie : .....	18
I-7 Équations adimensionnelles : .....	18
I-8 Hypothèse de boussinesq : .....	18
I-9-Les Nombres sans dimension caractérisant la convection naturelle	
I-9-1-Nombre de Rayleigh : .....	19
I-9-2-Nombre de Grashof : .....	20
I-9-3-Le nombre de Prandtl (Pr) .....	20
I-9-4-Le nombre de Nusselt (Nu): .....	20
I-10-Conclusion .....	21
Chapitre II : Méthode de résolution .....	22
II.1 Introduction : .....	23
II.2 Méthode numérique: .....	23
II.3 Les outils de résolution (Gambit et fluent) : .....	25

II.3.1 Gambit : .....	25
II.3.2 Interface et étapes du logiciel Gambit.....	25
II.3.3 Le code Fluent : .....	27
II.3.4 Les étapes de calcul par Fluent : .....	28
II.4 Conclusion :.....	34
Chapitre III : Résultats et discussion .....	35
III-1-Introduction : .....	36
III-2-Validation numérique et physique :.....	36
III-2-1-Validation numérique (Choix de maillage) : .....	37
III-2-2-Validation de physique :.....	39
III-3- Résultats et discussions.....	42
III-3-1-Etude de la convection dans une enceinte rectangulaire de rapport géométrique égal à 2.....	42
III-3-2-Etude de la convection dans une enceinte rectangulaire de rapport géométrique égal à 2 avec un obstacle chauffé.....	47
III-3-3-Etude de la convection dans une enceinte rectangulaire de rapport géométrique égal à 2 avec trois obstacles chauffés : .....	50
Conclusion : .....	55
Conclusion générale :.....	56

## Nomenclature

Symbole Unité	Définition
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>C<sub>p</sub></b> (J/kg.K)</li> </ul>	La chaleur spécifique à pression constante
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>g</b> (m/s<sup>2</sup>)</li> </ul>	L'accélération de pesanteur
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>H</b> (m)</li> </ul>	Hauteur de canal
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>h</b> (m)</li> </ul>	Hauteur du composant
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>h<sub>c</sub></b> (W/m<sup>2</sup>.k)</li> </ul>	Coefficient de Convection
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>L</b> (m)</li> </ul>	Longueur
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>P</b> (Pa)</li> </ul>	Pression
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>T<sub>f</sub></b> (K)</li> </ul>	Température à l'entrée de canal (Froide)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>T<sub>c</sub></b> (Chaude)</li> </ul>	Température de composant électronique (K)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>u<sub>0</sub></b> (m/s)</li> </ul>	Vitesse à l'entrée de canal
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>u, v</b> (m/s)</li> </ul>	Vitesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>U, V</b></li> </ul>	Composantes adimensionnelles des vitesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>x, y</b></li> </ul>	Coordonnées cartésiennes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>X, Y</b> adimensionnelles</li> </ul>	Coordonnées cartésiennes
<b>Symbole Greek</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>α</b> (m<sup>2</sup>/s)</li> </ul>	La diffusivité thermique
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>β</b> volumétrique</li> </ul>	Coefficient de dilatation thermique (K <sup>-1</sup> )



## Introduction Générale

L'étude de transfert de chaleur est une discipline fondamentale du génie mécanique thermique qui implique la génération, l'utilisation et la conversion et les échanges d'énergie thermique entre systèmes. Elle permet également de prédire la quantité totale d'énergie d'un système échangée avec l'extérieur pour un état d'équilibre [1].

Le transfert de chaleur est aussi l'étude de l'échange d'énergie thermique à travers un corps ou entre corps qui se produit lorsqu'il existe une différence de température. De ce fait, c'est la chaleur est l'énergie qui fait bouger les molécules.

La chaleur bouge toujours Si nous avons deux objets ou substances qui ont des températures différentes, la chaleur se déplacera toujours hors de l'objet ou de la substance la plus chaude vers l'objet ou la substance la plus froide. Ce transfert de chaleur se poursuivra jusqu'à ce que les objets soient à la même température.

On distingue en général trois modes de transfert de chaleur de base : la conduction, la convection et le rayonnement.

Dans ce mémoire, on s'intéresse à la modélisation et simulation de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire munie d'obstacles chauffés. La méthode de résolution utilisée dans ce travail est la méthode des volumes finis. Elle est utilisée généralement pour résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles à l'aide d'un maillage constitué des volumes finis. Les logiciels Gambit et Ansys Fluent sont utilisés pour mener ce travail.

Le travail est présenté en trois chapitres : dans le premier chapitre, une recherche bibliographique est effectuée pour la convection naturelle dans des cavités carrées et rectangulaires. Cela a permis de distinguer les paramètres influents dans ces types d'échanges, notamment le nombre de Rayleigh et de Prandtl. La configuration physique de la convection naturelle pure à étudier dans ce travail est présentée également ainsi que les équations bidimensionnelles qui s'appliquent au problème.

La procédure de résolution avec les deux logiciels utilisés est présentée dans le deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre les résultats sont exposés et discutés en étudiant l'impact du nombre de Rayleigh et le nombre d'obstacle chauffé dans la cavité. Le travail est terminé par une conclusion générale.

**Chapitre I :**  
**Etude bibliographique**  
**Et modélisation**

## **I-1- Introduction :**

Lors d'un échange de l'énergie thermique entre deux objets ou substances qui ont des températures différentes, la chaleur se déplacera toujours hors de l'objet ou de la substance la plus chaude vers l'objet ou la substance la plus froide. Ce transfert de chaleur se poursuivra jusqu'à ce que les objets soient à la même température.

Ces échanges d'énergie thermique englobent divers mécanismes, On distingue :

La conduction thermique qui se passe au sein du même système (en générale solide) ; la convection thermique qui se passe entre un fluide et un solide ; le rayonnement thermique ou l'échange se fait par entre deux systèmes par déplacement des ondes électromagnétiques et le transfert d'énergie via des changements de phase soit entre solide -liquide, ou liquide-gaz ou solide gaz.

Dans cette présente étude, on s'intéresse beaucoup plus au transfert de chaleur par convection naturelle.

## **I-2- le transfert de chaleur par 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. La convection est généralement la forme dominant de transfert de chaleur dans les liquides et les gaz [2].

On peut distinguer trois types de convection :

- Convection naturelle
- Convection mixte
- Convection forcée

Dans ce travail on s'intéresse au transfert de chaleur par convection de type naturel.

### **I-3-Convection naturelle :**

La convection naturelle, également connue sous le nom de convection libre, est un mécanisme, ou type de transport de masse et de chaleur, dans lequel le mouvement du fluide est généré uniquement par les différences de densité dans le fluide se produisant en raison des gradients de température, et non par une source externe (comme une pompe), ventilateur, dispositif d'aspiration, etc.).

En convection naturelle, le fluide entourant une source de chaleur reçoit de la chaleur, devient moins dense et monte par dilatation thermique. La dilatation thermique du fluide joue un rôle crucial. En d'autres termes, les composants plus lourds (plus denses) tomberont, tandis que les composants plus légers (moins denses) monteront, entraînant un mouvement massif du fluide. La convection naturelle ne peut se produire que dans un champ gravitationnel ou en présence d'une autre accélération propre, telle que :

- accélération
- force centrifuge
- Force de Coriolis

La convection naturelle ne fonctionne essentiellement pas sur l'orbite terrestre. Par exemple, dans la Station spatiale internationale en orbite, d'autres mécanismes de transfert de chaleur sont nécessaires pour empêcher la surchauffe des composants électroniques. [3]

### **I-4-Etude bibliographique :**

Le transfert de chaleur par convection dans les enceintes fermées a été largement étudié par les scientifiques notamment sur la convection naturelle dans les cavités carrées et rectangulaires. Dans cette section, nous présentons une étude bibliographique sur quelques travaux menés dans ces configuration physiques.

Ostrach [4]. Cependant, la convection naturelle dans une cavité carrée chauffée par le bas et refroidie par un côté a été étudiée par Anderson et al. [5]. Yao [6] a été le premier à étudier la convection naturelle le long d'une surface ondulée ; on remarque

une diminution du transfert de chaleur le long de la surface ondulée par rapport à la surface plane. L'un de leurs principaux résultats est la réduction des échanges thermiques entre la paroi ondulée de la cavité et le fluide.

Chu et coll. [7] ont étudié expérimentalement et numériquement la convection naturelle dans une enceinte avec chauffage localisé en dessous pour simuler le transfert de chaleur par convection dans une chambre de magma.

Sharif et coll. [8] ont étudié la convection naturelle dans une enceinte rectangulaire, en utilisant une méthode de volumes finis. Ils ont considéré un chauffage inférieur constant et un refroidissement isotherme des parois latérales tandis que la paroi supérieure est adiabatique. La longueur de la source de chaleur variait de 20% à 80% de la longueur inférieure de l'enceinte pour la plage de nombre de Grashof de 10 à 106. Ils ont constaté que le nombre de Nusselt moyen et la température maximale sont fonctions de l'allongement de la source de chaleur. Enceinte et de la longueur de la source de chaleur. Calcagni et al [9] ont étudié numériquement et expérimentalement le développement du phénomène de transfert de chaleur dans une enceinte carrée partiellement chauffée par le bas. La source de chaleur est située sur la surface inférieure de la cavité et sa longueur varie de 1/5 à 4/5 du côté, les deux parois latérales sont refroidies tandis que les autres surfaces sont considérées comme adiabatiques. En outre, convection naturelle laminaire à l'intérieur d'enceintes rectangulaires remplies d'air, chauffées par le bas et refroidies par le haut, les parties inférieures des deux parois latérales étant maintenues à la température de la paroi inférieure et les parties supérieures restantes des parois latérales étant maintenues à la température de la paroi latérale supérieure.

Caronna et al. [10]. Alors qu'une convection naturelle en enceinte cubique avec géométrie de surface chaude et cloisons partielles a été analysée par Zemani et al. [11]. La géométrie est un cube avec une surface chaude ondulée (trois ondulations) et trois cloisons. Les résultats obtenus montrent que la géométrie des parois chaudes avec cloisons affecte le débit et le taux de transfert de chaleur dans la cavité. Il a également été constaté que le nombre de Nusselt moyen diminue par rapport au transfert de chaleur dans la cavité cubique ondulée sans cloisons. Il a été constaté que le modèle d'écoulement observé dans l'enceinte 3D est très similaire dans le cas 2D déjà étudié

dans la référence [12] pour lequel ils ont traité une cavité similaire dans une étude bidimensionnelle. Yigit et al. [13] basé sur des simulations numériques. Il a été constaté que le nombre de Nusselt moyen  $Nu$  augmente avec les valeurs nominales du nombre de Rayleigh en raison du renforcement du transport adjectif pour les fluides amincissants par cisaillement, newtoniens et épaississants par cisaillement. Cependant, le nombre de Nusselt moyen s'avère insensible au changement du nombre de Prandtl pour toutes les valeurs de  $Ra$ .

Torabi et al. [14] ont réalisé une étude approfondie de la convection naturelle à l'intérieur d'une cavité partiellement chauffée de manière différentielle avec une fine ailette en utilisant des fonctions de distribution de Boltzmann à deux réseaux. Les résultats ont indiqué qu'en choisissant la position appropriée pour l'ailette, le Nusselt moyen pouvait être augmenté de plus, que 150 %.

Mebarek-Oudina [15] a étudié la stabilité du transfert de chaleur par convection naturelle dans un anneau cylindrique avec une source de chaleur iso flux discrète de différentes longueurs. Il a constaté que l'augmentation du rapport de longueur de la source de chaleur diminue le nombre de Rayleigh critique et que la stabilité de l'écoulement et le taux de transfert de chaleur peuvent être contrôlé en faisant varier la longueur de la source de chaleur.

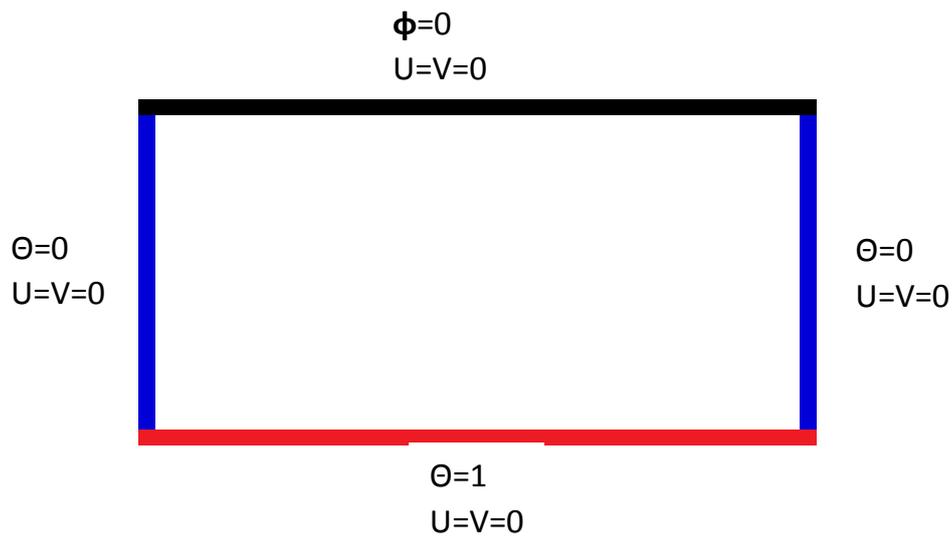
Zaim et al. [16] ont analysé un élément fini Galerkin de convection naturelle magnétohydrodynamique de nano liquide Cu eau dans une enceinte déflectrice en forme de U, ils ont déterminé que le taux de transfert de chaleur augmente avec le nombre de Rayleigh et la fraction volumique et que lorsque la fraction volumique des nanoparticules diminue, la moyenne Nombre de Nusselt augmenté là où  $Ra > 10^5$ .

R. Zarrit et al. [17] ont étudié une enceinte rectangulaire remplie de fluide et chauffée par le côté, la convection Naturelle est déclenchée dès que la différence de température entre les deux parois verticales est établie. Pour Une enceinte rectangulaire chauffée par le bas, La convection naturelle se produire que dès que la différence de température entre les parois actives est Supérieure à une valeur critique. Si la différence de température n'est pas suffisante pour amorcer la convection naturelle, le mécanisme de transfert thermique dans le fluide est la conduction. La

condition de l'apparition de la convection naturelle peut être exprimée en termes de nombre de Rayleigh critique. Dans le cas d'une enceinte de rapport de forme infini, le critère pour l'apparition de la convection naturelle est :  $Ra_c > 1708$  [23, 40 et 48]. Les paramètres principaux suivants : le nombre de Rayleigh  $Ra$  variant entre  $10^3$  et  $5 \times 10^5$ .

### I-5 Description de la configuration physique :

Il s'agit d'une cavité rectangulaire fermée, chaude dans la base et froide sur les parois verticales et adiabatique au paroi supérieur (**Figure.I.1**).



**Figure.I.1** : La configuration physique et condition aux limites

### I-5-Hypothèse simplificatrices :

Les hypothèses simplificatrices seront utiles dans la modélisation mathématique pour traiter le problème général de la convection naturelle dans une enceinte fermée carrée ou rectangulaire. De ce fait les plus usuelles qui seront utilisées dans notre problème :

- 1- Fluide Newtonien, visqueux et incompressible.
- 2- Ecoulement bidimensionnel (suivant les coordonnées cartésiennes  $x$  et  $y$ ).
- 3- Régime laminaire et stationnaire.
- 4- La dissipation visqueuse dans l'équation d'énergie est négligeable.

5- Les propriétés physiques du fluide ( $\rho$ ,  $\nu$ ,  $C_p$ ,  $k$ ) sont supposées constantes.

6- L'approximation de Boussinesq est valide, elle consiste à considérer que les variations de la masse volumique sont négligeables aux niveaux de tous les termes des équations de quantité de mouvement ( $\rho = \rho_0$ ), sauf au niveau du terme de gravité. La variation de  $\rho$  en fonction de la température est donnée comme suit (Bejan, 2004) [20]:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (1)$$

## I-6 Equations régissant le mouvement :

### I-6-1 Equation de continuité (conservation de la masse) :

L'équation de continuité traduit le principe de conservation de la masse sur un volume élémentaire de fluide

Donné, cette équation peut être exprimée par la formule suivante :

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

### I-6-2 Equation de conservation de la quantité de mouvement :

L'équation de conservation de quantité de mouvement pour un écoulement 2D in stationnaire, aux équations régissant le mouvement du fluide dans les directions x et y :

#### Suivant X :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

#### Suivant Y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_0) \quad (4)$$

### I-6-3 Equation d'énergie :

Le principe de conservation de l'énergie pour un écoulement 2D in stationnaire donne l'équation d'énergie

Suivante :

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

### I-7 Équations adimensionnelles :

En utilisant les variables adimensionnelles indiquées ci-dessous :

$$X = \frac{x}{H} \quad Y = \frac{y}{H} \quad U = \frac{u}{\alpha} \quad V = \frac{v}{\alpha} \quad \alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$
$$\theta = \frac{T - T_f}{T_c - T_f} \quad P = \frac{p - P_2}{\rho \left( \frac{\alpha}{H} \right)^2} \quad (6)$$

Les équations sans dimensions deviennent :

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

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + Pr \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (8)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Ra Pr \theta \quad (9)$$

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

### I-8 Hypothèse de Boussinesq :

-En 1903 ; à l'époque même ou Rayleigh s'intéresse à la convection ; Boussinesq propose une simplification de ces équations de façon à ne conserve que les ingrédients nécessaires et suffisant à la convection thermique.

Les hypothèses de Boussinesq consistent à supposer que les différentes propriétés thermodynamiques et de transport de fluide sont indépendantes de la pression.

Elles supposent aussi que le fluide est incompressible mais il conserve bien entendu le terme de poussée D'Archimède << le moteur de la convection >> directement lié à la dilatation ou à la contraction thermique du fluide. Cette approximation est valable lorsque l'écart de la température entre les parois chaudes et les parois froides est

Inférieure à 30 °C ( $\Delta t < 30^\circ\text{C}$ ). L'hypothèse essentielle de Boussinesq est  $\rho$  est constant sauf dans le terme de poussée D'Archimède.

Les propriétés thermo physique du fluide sont supposées constantes et calculées à la température de référence  $T_0$  ; à l'exception de la masse volumique  $\rho$  dans ce terme la masse volumique varie linéairement avec la température :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)]. \quad (11)$$

$\beta$ : le coefficient d'expansion thermique

## **I-9 Les Nombres sans dimension caractérisant la convection naturelle**

### **I-9-1-Nombre de Rayleigh :**

Le nombre de Rayleigh est un nombre sans dimensions, ce nombre porte le nom de "LORD Rayleigh, physicien anglais, en utilisé en mécanique des fluides et caractéristiques sans le transfert de chaleur, on peut définir le nombre de Rayleigh (Ra) comme le produit du nombre de Grashof, reliant les effets de la force gravifique de fluide, et du nombre de Prandtl :

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} = (\beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot H^3) / \alpha \cdot \nu \quad (12)$$

Avec:

$\beta$  : coefficient de dilatation thermique

$\alpha$ : La diffusivité thermique

### **I-9-2-Nombre de Grashof :**

Le nombre Grashof est un nombre sans dimensions utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection libre dans fluides, il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses il permet de caractériser le transfert thermique par convection du au déplacement naturel d'un fluide par intermédiaire du calcul du nombre de Nusselt. Ce nombre porte le nom de Franz Grashof ingénieur allemand.

On définit le nombre de Grashof de la manière suivante :

$$Gr = \frac{\beta \Delta T g H^3}{\nu^2} \quad (13)$$

### **I-9-3-Le nombre de Prandtl :(Pr)**

Est un nombre sans dimension, ainsi nommé en hommage au physicien allemand Ludwig Prandtl. C'est le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement (viscosité cinétique) et celle de la chaleur (diffusivité thermique).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (14)$$

### **I-9-4-Le nombre de Nusselt (Nu):**

Est un nombre à dimensionnel utilisé pour caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et une paroi il met en rapport le transfert par convection par rapport le transfert par conduction. Il est d'autant plus élevé que la convection prédomine sur la conduction.

La détermination du nombre de Nusselt permet de calculer le coefficient de convection thermique à l'aide d'une corrélation généralement obtenu expérimentale qui le lie au nombre de Rayleigh en convection naturelle.

$$Nu = f(Ra, Pr) = f(Gr, Pr) \quad (15)$$

## **I-10-Conclusion**

Nous avons présenté le long de ce chapitre une revue bibliographique sur quelques travaux de recherche sur le sujet de l'étude de la convection naturelle dans une cavité fermée de forme carrée ou rectangulaire. Nous avons aussi discuté les hypothèses et les équations gouvernantes régissant du problème de la convection naturelle.

Dans ce chapitre suivant, nous introduirons des méthodes numériques de résolution notamment, la méthode des volumes finis et les outils information utilisés dans cette étude (Gambit et fluent).

# **Chapitre II :**

## **Méthode de résolution**

## **II.1 Introduction :**

La simulation numérique des écoulements est maintenant considérée comme des véritables expériences numériques lorsque les simulations sont faites avec soin.

L'avantage des méthodes numériques est que toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (surface libre, champ de vitesse, champ de pression, contraintes, ...) sont immédiatement obtenues. Dans une expérience, l'obtention de ces quantités en tous les points du champ est souvent impossible ou très difficile à réaliser.

La première partie de ce chapitre porte sur les démarches d'utilisation d'un code de calcul numérique de dynamique des fluides pour modéliser la convection naturelle dans cavités. Nous présentons le logiciel de CFD (Computational Fluid Dynamics) choisi pour cette modélisation et qui se base sur la méthode des volumes finis.

## **II.2 Méthode numérique :**

En général, la formulation mathématique d'un problème physique implique une ou plusieurs équations différentielles aux dérivées partielles qui doivent être résolues pour trouver une solution au problème en question. Cependant, celle-ci ne peut être déterminée dans le cas général sauf dans certains cas classiques et simples. Dans ce cas, le seul chemin qui pourra nous fournir une solution appropriée consiste en l'approche numérique. A cet effet, pour résoudre n'importe quel problème par une approche numérique, la formulation mathématique doit être transformée au moyen d'un processus de discrétisation pour aboutir à un format facile pour le fournir ensuite au processus numérique. Cela veut dire que les équations mathématiques doivent être transformées et simplifiées en une forme équivalente à un système d'équations algébriques résolues par des approximations aux points discrets du domaine de calcul, on procède donc à la discrétisation de ce domaine.

Parmi les techniques et/ou les méthodes de discrétisation les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulements et de transferts thermiques, on peut citer la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis.

Pour notre présente étude, nous avons choisi la méthode des volumes finis, car elle présente des avantages considérables du fait qu'elle soit simple, qu'elle garantisse la conservation de masse et de quantité de mouvement dans chaque volume de contrôle et dans tout le domaine de calcul, et qu'elle soit applicable pour les géométries complexes. Elle est aussi avantageuse, parce qu'elle facilite la linéarisation des termes sources s'ils ne le sont pas et permet un traitement plus facile des milieux hétérogènes (Patankar, 1980). [21]

### **La méthode des volumes finis : (FVM)**

Est une technique de discrétisation pour les équations aux dérivées partielles, en particulier celles qui découlent des lois physiques de conservation, utilise une formulation intégrale en volume du problème avec un ensemble de partitionnement fini de volumes pour discrétiser les équations, est couramment utilisé pour discrétiser les équations informatiques de la dynamique des fluides. Ici, nous considérons des équations elliptiques.

Les méthodes des volumes finis ont été parmi les premières à atteindre un stade de développement avancé pour les calculs d'écoulements stationnaires et instationnaires. Elles ont permis une prise en compte complète des effets de non linéarité et de compressibilité ainsi que les effets de viscosité à l'aide des équations de Navier-stoker, et de turbulence.

Les méthodes aux volumes finis ont supplanté les méthodes classiques basées sur les différences finies dans le traitement des problèmes complexes notamment tridimensionnels [22].

La technique comprend deux étapes importance :

- Le maillage : il consiste à diviser le domaine en plusieurs intervalles réguliers appelés volumes de contrôle.
- La discrétisation : lors de cette étape les équations sont intégrées dans les volumes de contrôle.
-

## **II.3 Les outils de résolution (Gambit et fluent) :**

Les logiciels fluent et gambit sont des logiciels qui permettent des simulations 2D ou 3D en mécanique des fluides et le transfert de chaleur. Elles permettent de traiter numériquement les équations de Navier Stokes en se basant sur la méthode des volumes finis. Ils sont largement utilisés dans la résolution des problèmes en industrie (automobile, aéronautique, aérospatiale, etc.). Et ce en raison de leur interface graphique puissante et de leurs options riches, qui permettent de traiter tous types de géométries complexes (fixes ou mobiles) avec des maillages fixes relatifs ou adaptatifs avec des divers modèles physiques.

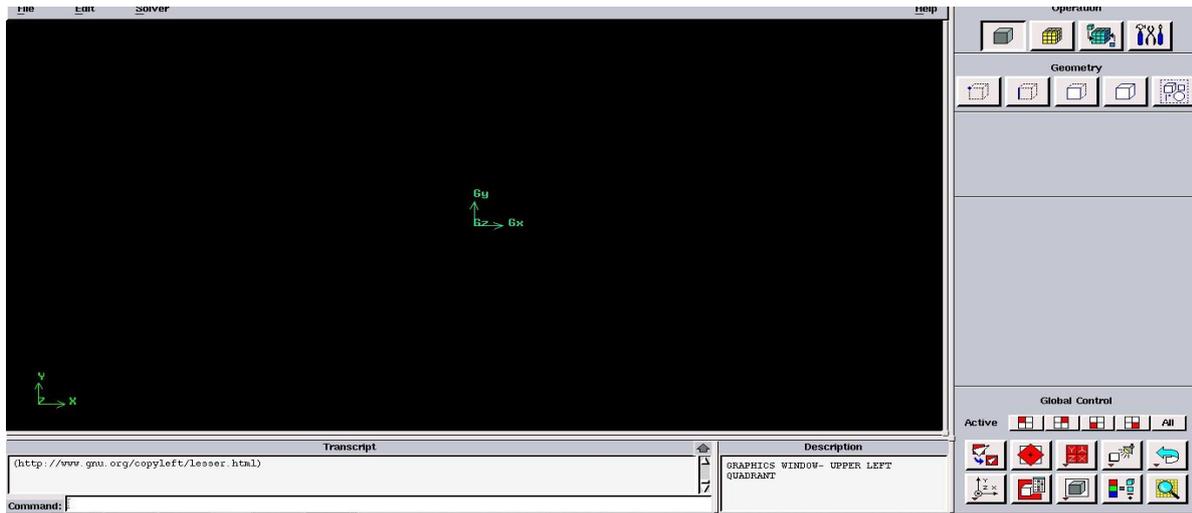
### **II.3.1 Gambit :**

Gambit est un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'édition historique du logiciel était la société Fluent). Ce mailleur permet de créer géométries et maillages avec un grand degré de liberté et une grande précision. Le domaine géométries peut aussi depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique des surfaces et des volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un mailleur de référence par les modélisateurs utilisant Fluent. Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D ; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD. Il génère des fiches pour fluent.

### **II.3.2 Interface et étapes du logiciel Gambit**

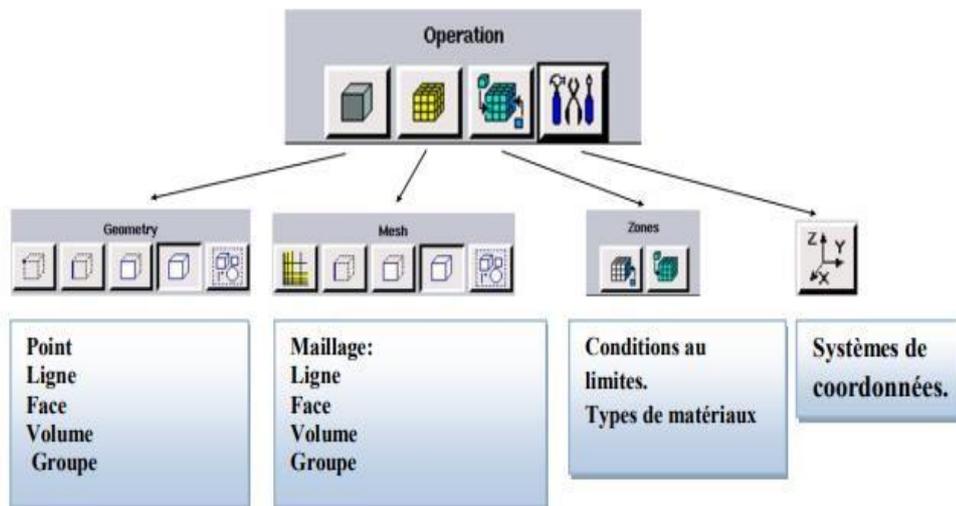
#### **II.3.2.1 Lance Gambit**

Après lancement du logiciel, l'interface d'utilisation



**Figure II.1** :accueil de gambit

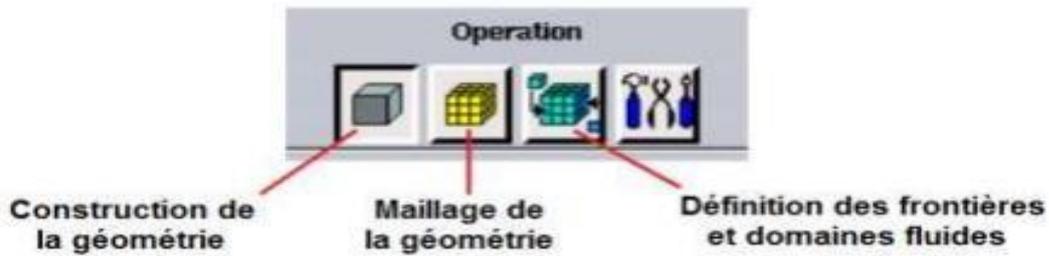
Pour dessiner les géométries et les maillage on va utiliser le menu générale (opération).



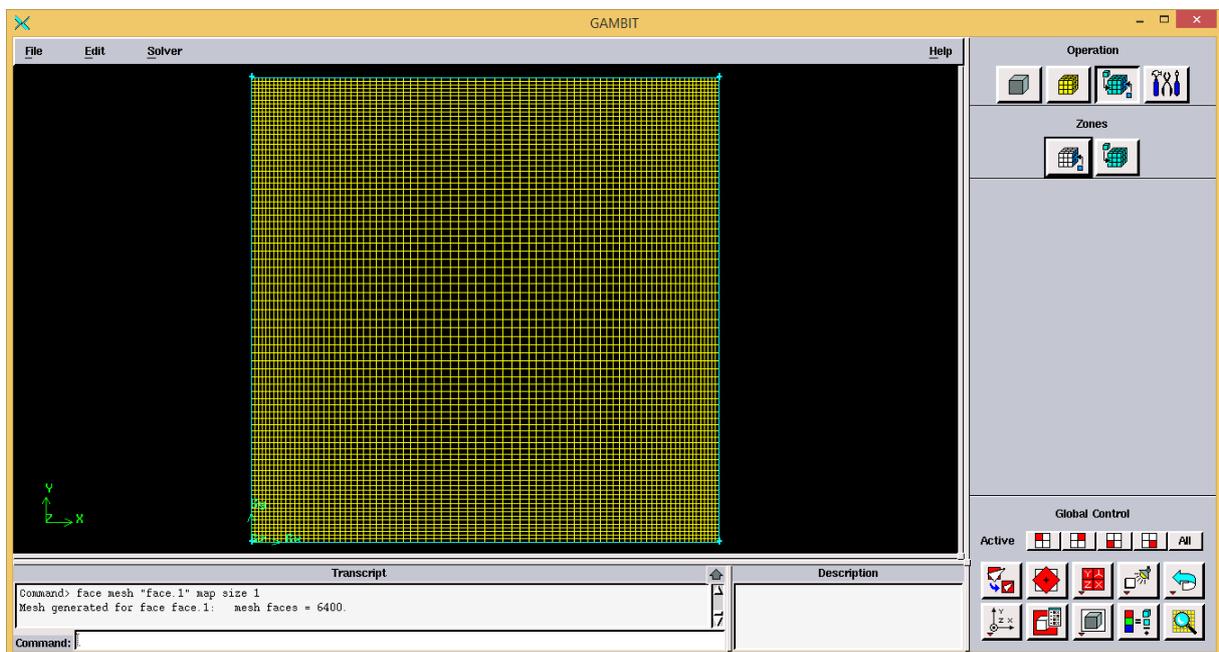
**Figure II.2** :menu général de gambit Définir la géométrie

D'abord, pour la construction de la géométrie on va dessiner le maillage sur Gambit en 2D avec la méthode de point par point, et relier dans toutes les directions, après sa on a créé les surfaces comme nous l'avons utilisé le type de « bi-exponent » avec 0.6 ratio de mailles d'intervalle de différent sur la couche limites, et en a ajouté les conditions aux limites, et c'est toute pour d'obtenir la géométrie voulue.

Enfin, nous allons définir le maillage dans le menu (msh).



**Figure II.3 :**Fonction principale



**Figure II.4 :**Définition de la géométrie

### II.3.3 Le code Fluent:

Fluent utilise une méthode de discrétisation des équations différentielles initiales de type volumes finis. Sur chaque volume élémentaire obtenu après maillage, les équations de conservation sont appliquées sous leur forme intégrale. Les variables inconnues du système d'équations (pression, vitesse, etc...) sont définies au centre de chaque cellule (volume élémentaire).

Fluent offre une grande variété de possibilités pour la modélisation en mécanique des fluides ; qu'il s'agisse d'une simulation 2D ou 3D, interne ou externe, stationnaire ou instationnaire, compressible ou incompressible.

### II.3.4 Les étapes de calcul par Fluent :

#### -Démarrage de Fluent :

Le premier chose pour le démarrage le logiciel Fluent on a choisi le domaine Bidimensionnel(2D) double pression (2ddp).

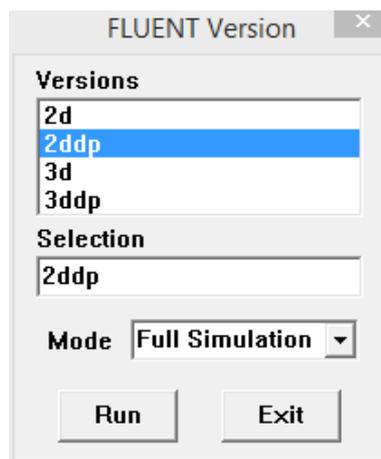


Figure II.5 :choix des dimension du domaine de calcule

#### -Importation de ma géométrie :

Pour commence la sumulation il faut importe le fichier (\*.msh) généré sour Gambit.

File→ Read→ Case

#### -L'équation de l'énergie :

D'oit etre activée énergie pour l'étude du champ thermique.

Define→ Models → Energy

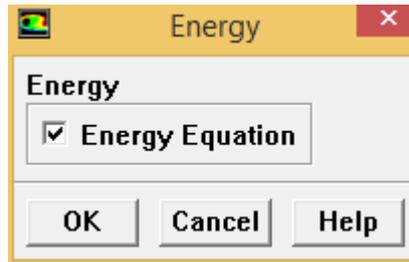


Figure II.6 :introduire l'équation d'énergie

### Définition des caractéristiques du fluide :

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de Flunet.

Define ———> Materials

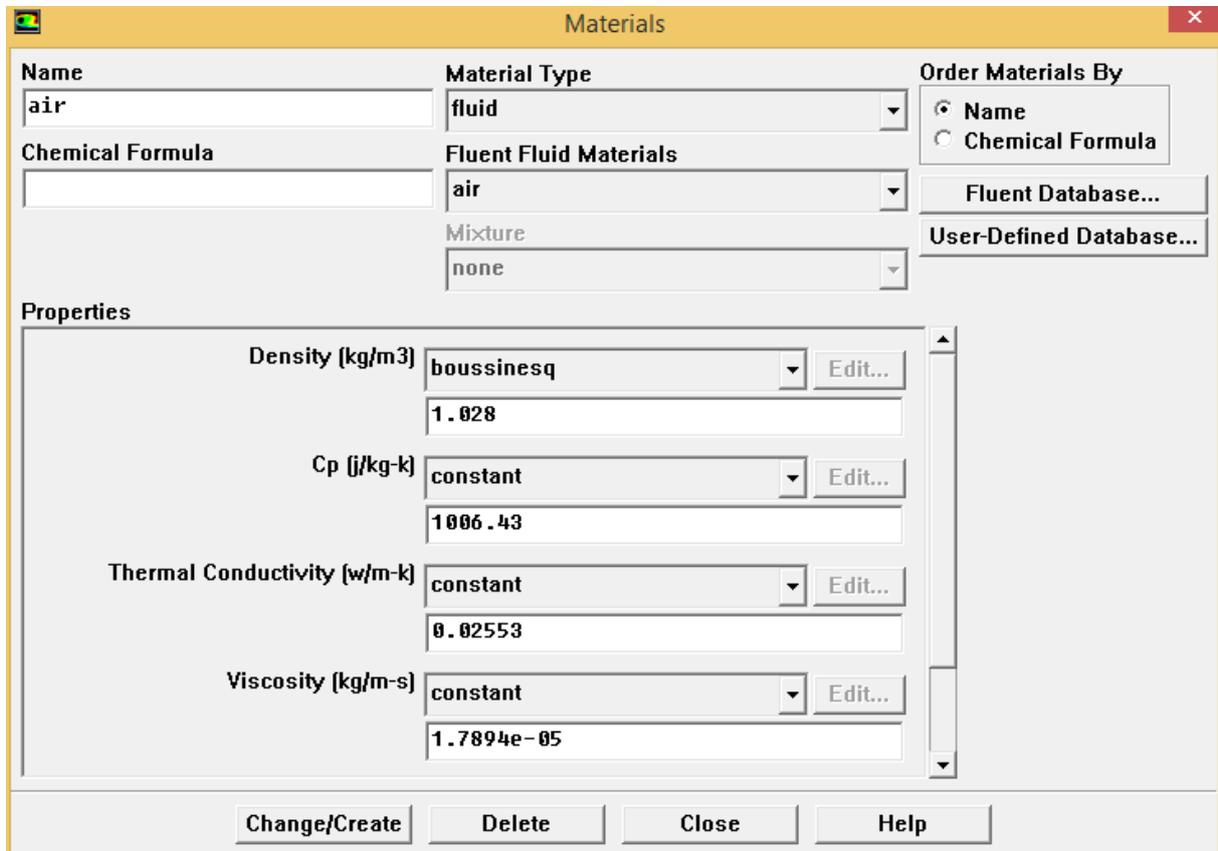
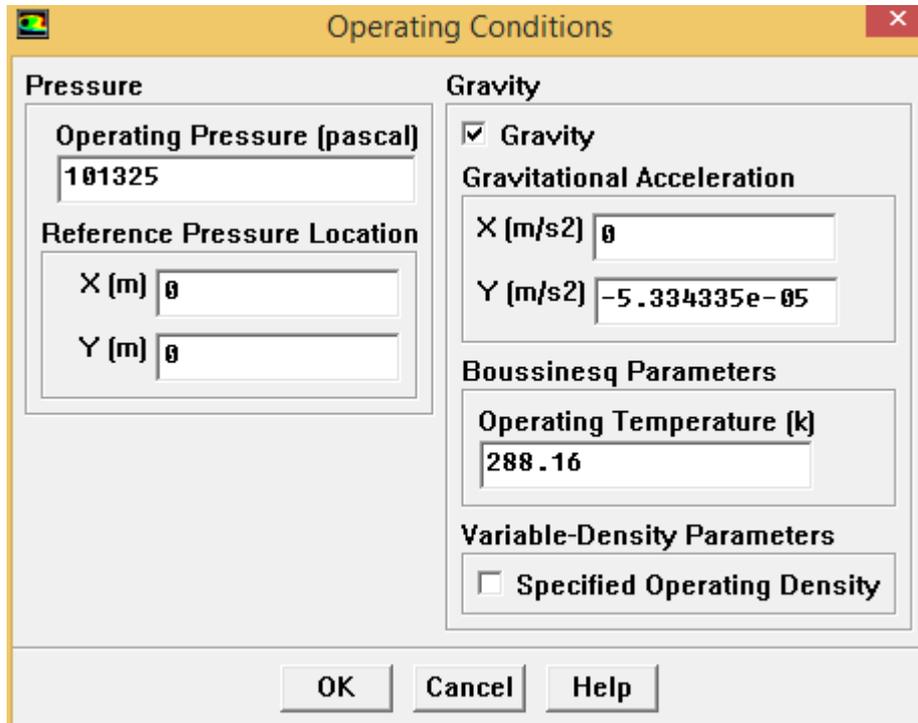


Figure II.7 :Définitiondes caractéristique du fluide

-La gravité :

D'abord, on écrit la valeur de la gravité qui calcule avec les paramètres de données au Flunet.

Define → Operating conditions

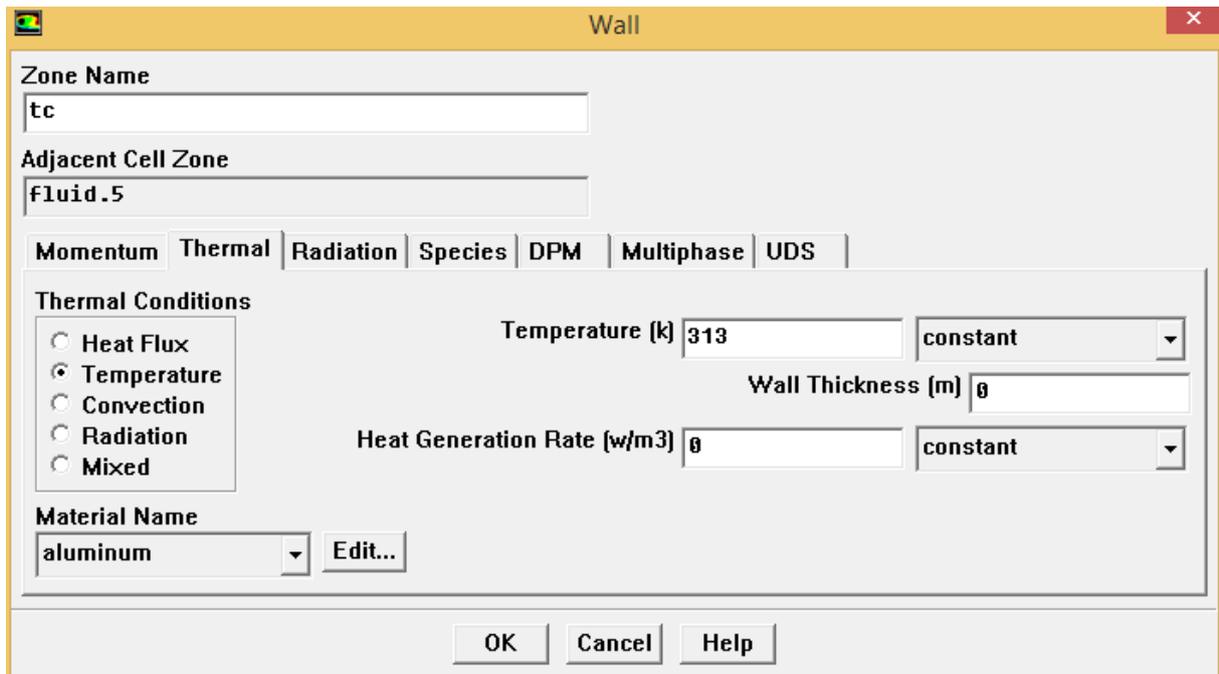


**Figure II.8 :** Operating conditions

**-Conditions aux limites :**

Il faut fixer les valeurs des conditions aux limites du problème à traiter.

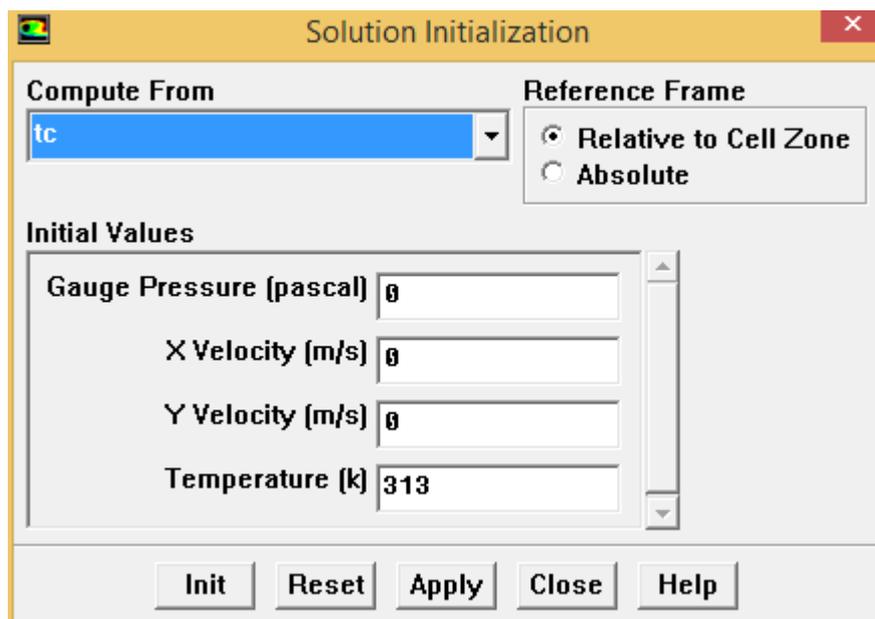
Define → Boundary Conditions



**Figure II.9 :**Conduction aux limites

**-Choix des facteurs de sous relaxation et de Résidu rt m'initialisation :**

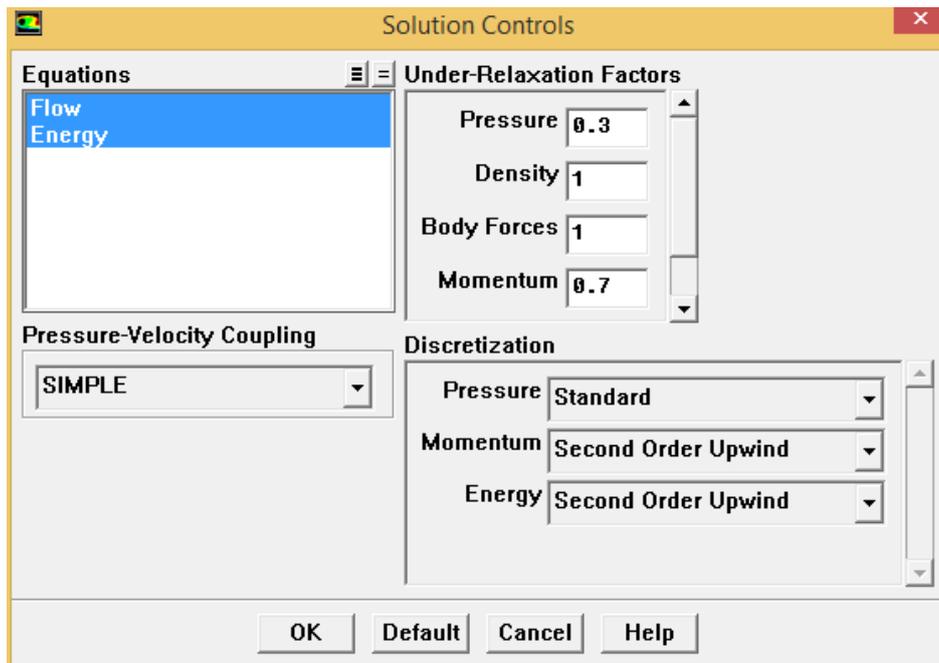
Solve → Initialize → Intialize



**Figure II.10 :**L'initialisation

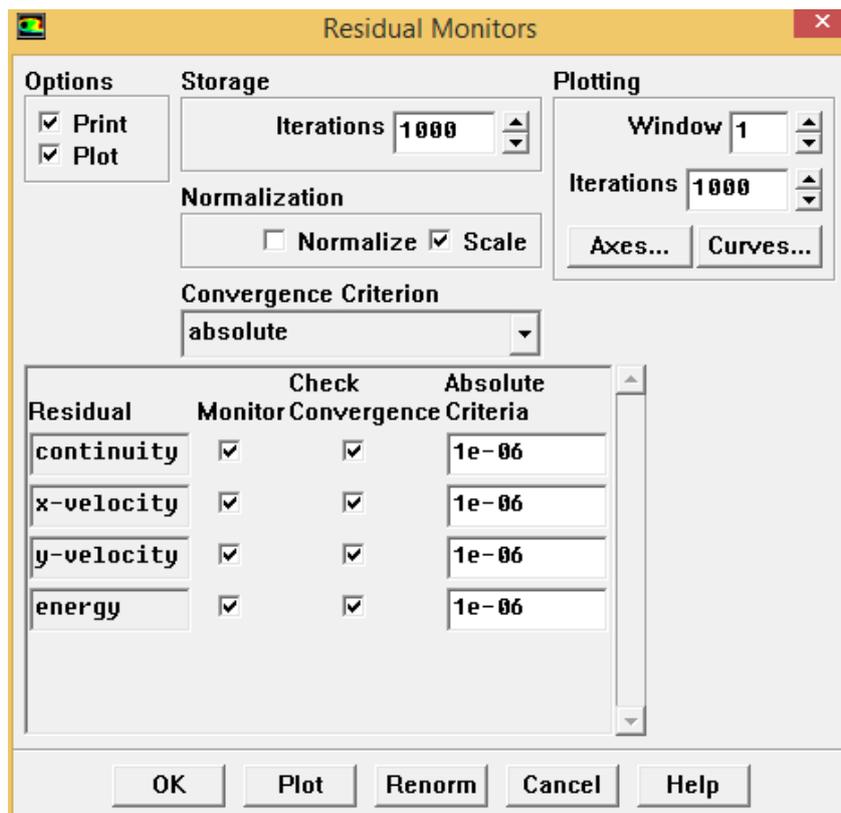
Solve → Controls → Solution

Cette méthode permet de connaître l'ordre des opérations à résoudre et de connaître les algorithmes (choix de solution).



**Figure II.11** :Choix de la solution

Solve → Monitors → Residual

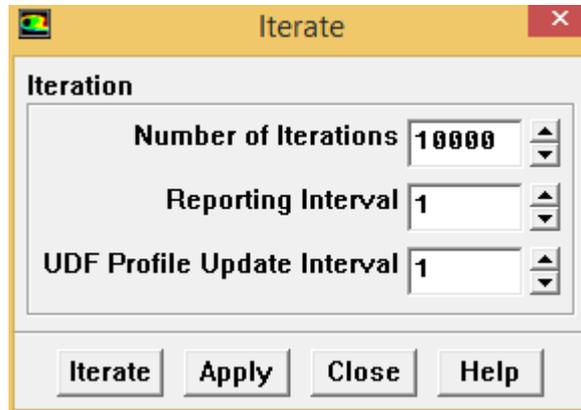


**Figure II.12 :**Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence

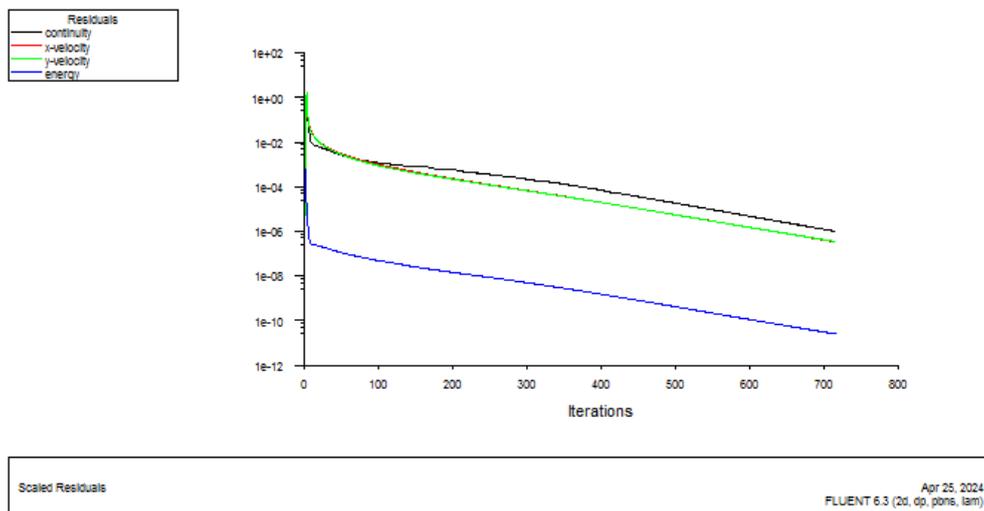
**-La convergence des calculs :**

Nous choisissons le nombre d'itérations.

Solve → Iterate



**Figure II.13 :**Choix du nombre des itérations



**Figure II.14 :**Allures de l'évolution de la convergence du calcul de calcul

Après la fin d'itération on observe les résultats au menu de Fluent.

Display → Contours → Température / Velocity...

Enfin, nous pouvons sauvegarder les calculs en cliquant sur

File → Write → Case & Data

## **II.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons exposé les bases de la méthode des volumes finis, ainsi que la présentation des deux logiciels utilisés dans notre travail notamment, le logiciel Gambit et logiciel Fluent.

Dans le chapitre qui suit, on va présenter les résultats de la validation et celle de l'étude numérique de l'écoulement dans une cavité rectangulaire avec et sans obstacles chauffés en fonction du nombre de Rayleigh et le nombre des obstacles.

# **Chapitre III :**

## **Résultats et discussions**

### III-1-Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de la résolution numérique du problème d'étude de la convection naturelle dans une cavité symétriquement refroidie latéralement et chauffée par le bas.

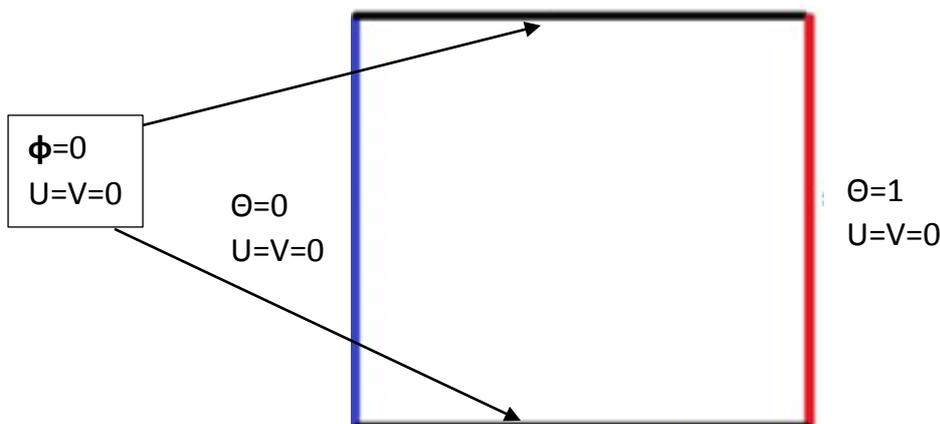
En premier lieu, en commençons par les résultats de la validation du maillage et physique pour un problème physique de la convection naturelle dans une cavité carrée simple, présenté schématiquement sur la figure III.1.

En seconde lieu, une étude de convection naturelle dans une trois cas de cavités (rectangulaire simple ; rectangulaire avec un obstacle ; rectangulaire avec trois obstacles) toutes les cavités sont chaudes à la base, froid dans les parois verticales et adiabatique à la paroi supérieure.

L'analyse de l'étude se base sur l'influence de nombre de Rayleigh sur les différentes structures de l'écoulement, en termes de lignes de courant, d'isothermes, profils de vitesse et profils de température.

### III-2-Validation numérique et physique :

La première partie de ce travail, nous commencerons par l'utilisation de la validation numériquement et physiquement du problème classique. Il s'agit d'une cavité carrée simple et fermée. Toutes les parois sont immobiles, la paroi de droite est chaude, la paroi de gauche est froide et les deux parois haut et bas sont considérées comme adiabatique (voir **Figure III.1**).

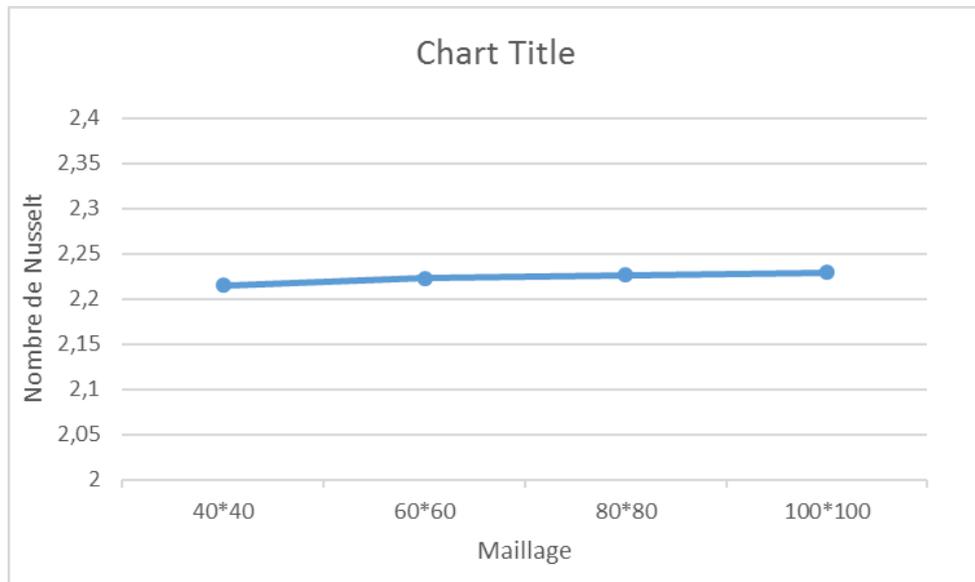


**Figure III.1** : schéma de la cavité carrée

### III-2-1-Validation numérique (Choix de maillage) :

Nous avons examiné l'influence du maillage sur la résolution numérique, pour la valeur de nombre de Rayleigh ( $Ra = 10^4$ ) et le nombre de Prandtl égale à 0.71, pour une simulation a été effectuée en utilisant plusieurs maillages, en particulier (40x40, 60x60, 80x80, 100x100). Pour vérifier la validation du maillage on calcule le nombre de Nusselt moyen au niveau de la paroi chaude ainsi que la vérification des profils de température et de la vitesse verticale V sur le plan médiane de la cavité.

Après l'analyse des résultats des calculs sur les Figure III.2 à Figure III.4 , il a été constaté que le bon maillage qui pourra être choisi est celui de (80×80).



**FigureIII.2** : Validation de maillage  $Nu=f(\text{maillage})$  pour  $Ra=10^4$

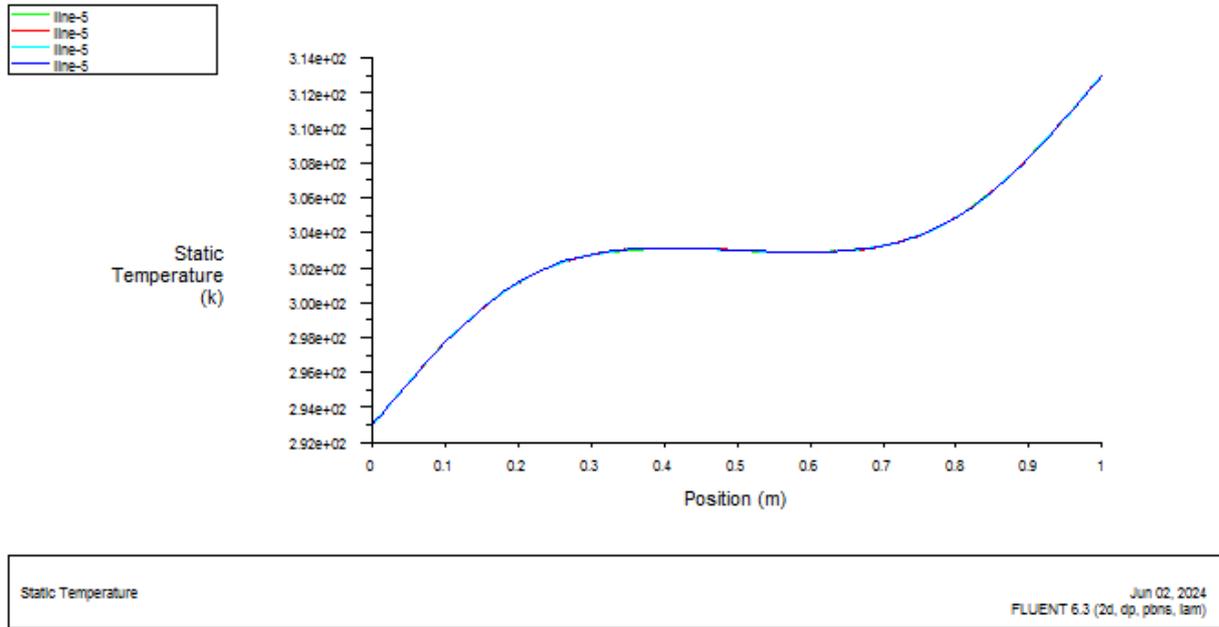


Figure III.3 : Profils de température  $\theta$  suivant X à Y/2

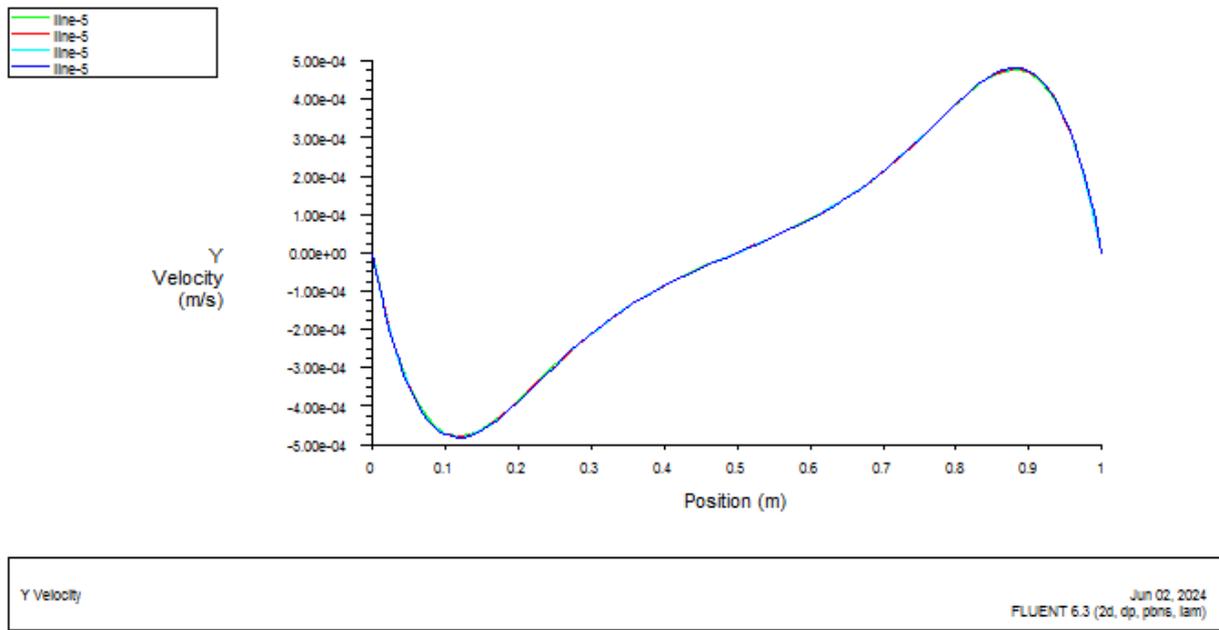


Figure III.4 Profils de vitesse V suivant X à Y/2

### III-2-2-Validation de physique :

Nous avons utilisé les résultats de la bibliographie pour faire la validation physique du cas physique classique étudié. De ce fait, le calcul est opté pour le maillage de  $80 \times 80$  avec le nombre de Rayleigh qui varie entre ( $10^3$  ;  $10^4$  ;  $10^5$ ). Les résultats de comparaison du nombre de Nusselt avec ceux des références sont exprimés en détails sur le tableau III-1.

**Tableau III.1** : Comparaison du nombre de Nusselt

Ra	Présent Travail	Bouamoud et Houat [23]		Markatos and Perikleous[24]	De Vahl Davis[25]
		(TLBM)	(MVF)		
$10^3$	<b>1.108</b>	1.115 0.63%	1.116 0.72%	1.108 <b>0.00%</b>	1.118 0.89%
$10^4$	<b>2.226</b>	2.221 0.23%	2.242 0.71%	2.201 1.13%	2.243 0.76%
$10^5$	<b>4.489</b>	4.441 1.08%	4.515 0.58%	4.430 <b>1.33%</b>	4.519 0.66%

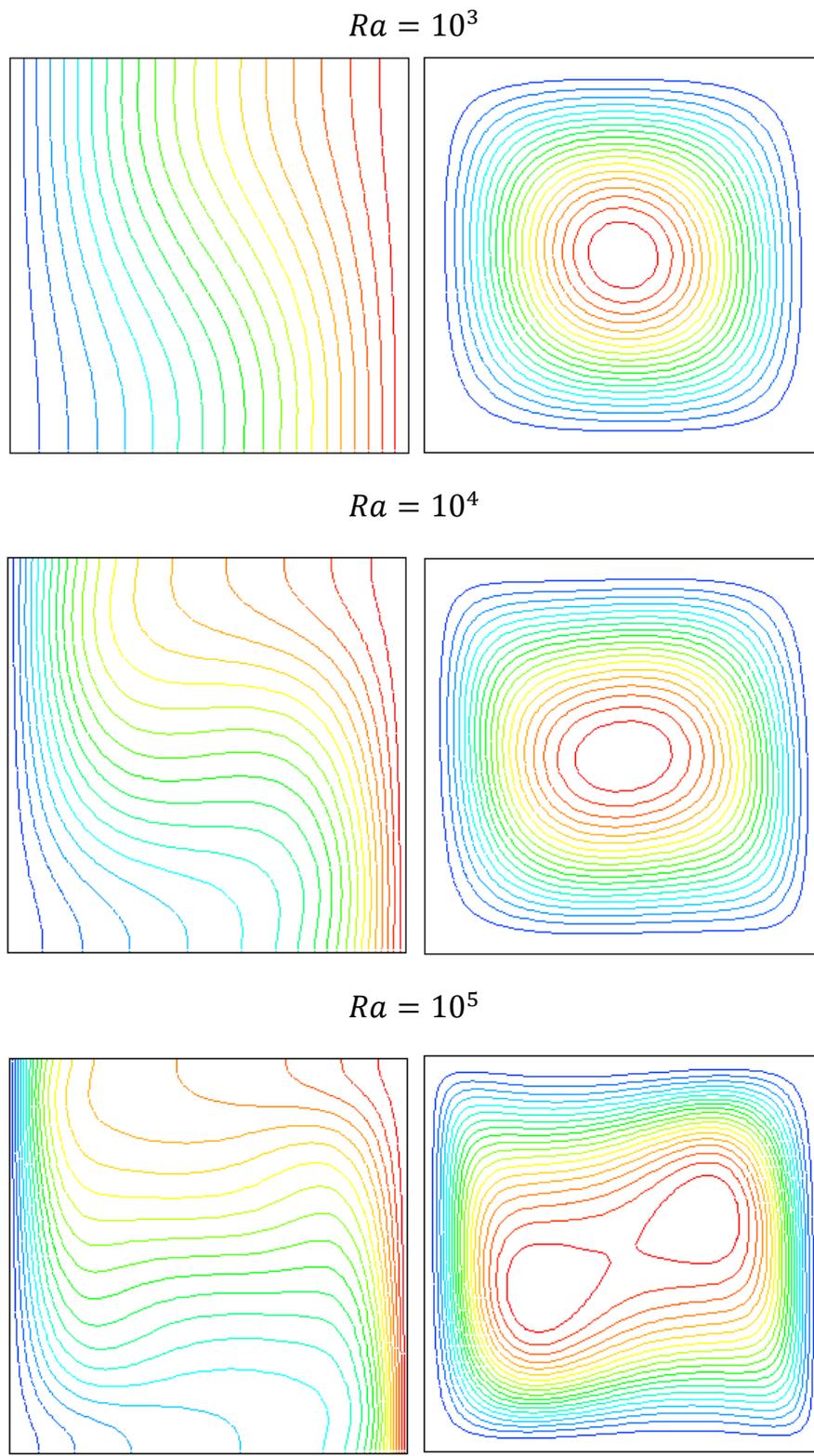
Après analyse pour les différentes valeurs de Rayleigh, il a été constaté qu'une erreur minimale était de 0% pour  $Ra=10^3$  par le rapport aux travaux de Markatos and Perikleous [24], et une erreur maximale de 1,33 % pour  $Ra= 10^5$  par rapport aux travaux de De Vahl Davis [25]. Tous les autres résultats pour toutes les valeurs de Rayleigh par rapport aux autres travaux ne sortent pas de l'intervalle d'erreurs de [0%, 1.33%]. Ceci signifie que les résultats sont en bon accord avec les références.

### **Commentaire physique :**

Les lignes de courant et les isothermes ont été tracés pour le cas de la cavité carrée différentiellement chauffée. La figure III.5 représente les isothermes (sur le côté gauche) et les lignes de courant (sur le côté droit), en fonction de nombre de Rayleigh. Sur les lignes de courant, on remarque l'apparition d'un tourbillon avec un seul noyau avec un mouvement des particules fluide qui tournent dans le même sens des aiguilles d'une montre. L'accélération des ces particules augmentent avec l'augmentation du nombre de Rayleigh. Lorsque ce dernier est égale  $Ra=10^5$  ; on voit apparaître deux noyaux au centre de tourbillon et l'accélération augmente et les lignes se rétrécissent au niveau des parois.

Sur les isothermes (figure III.5 côté gauche), on observe que les lignes sont presque parallèles aux parois verticales à la petite valeur de Rayleigh, et avec des distorsions qui augmentent lorsque le nombre de Rayleigh augmente ce qui signifie le passage du transfert de chaleur de la conduction dans le fluide à la convection, jusqu'à être sous forme perpendiculaire dans le cas de Rayleigh égale  $10^5$ . On note aussi l'évolution du nombre du Nusselt (Tableau III.1) avec augmentation du nombre de Rayleigh.

Nous concluons que le phénomène de la convection naturelle est très lié à la variation du nombre de Rayleigh.

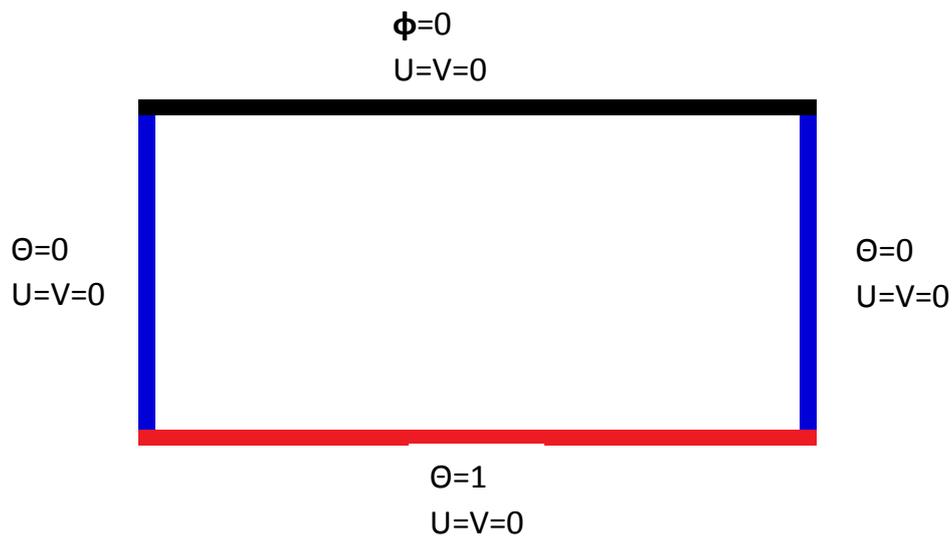


**Figure III.5** : Les isotherme et lignes de courant en fonction de nombre de Rayleigh

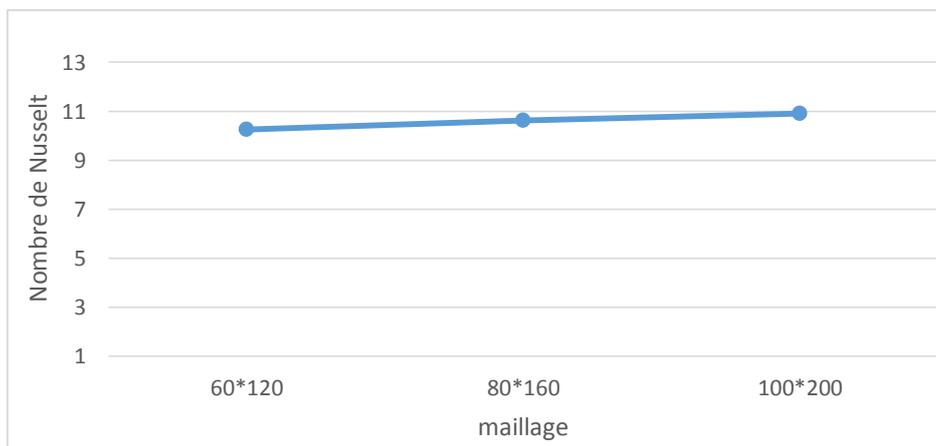
### III-3- Résultats et discussions

#### III-3-1-Etude de la convection dans une enceinte rectangulaire de rapport géométrique égal à 2

Dans cette section nous avons étudié une cavité rectangulaire fermée, chaude dans la base et froide sur les parois verticales et adiabatique au paroi supérieur (**Figure III.6**).



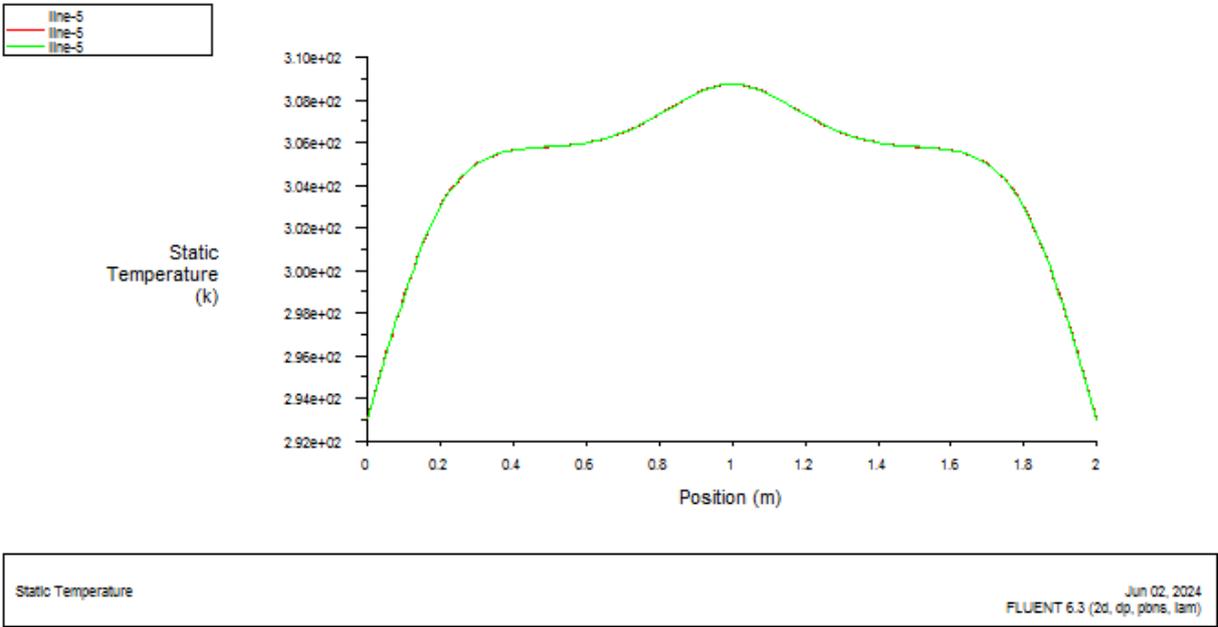
**Figure III.6** : schéma de cavité rectangulaire



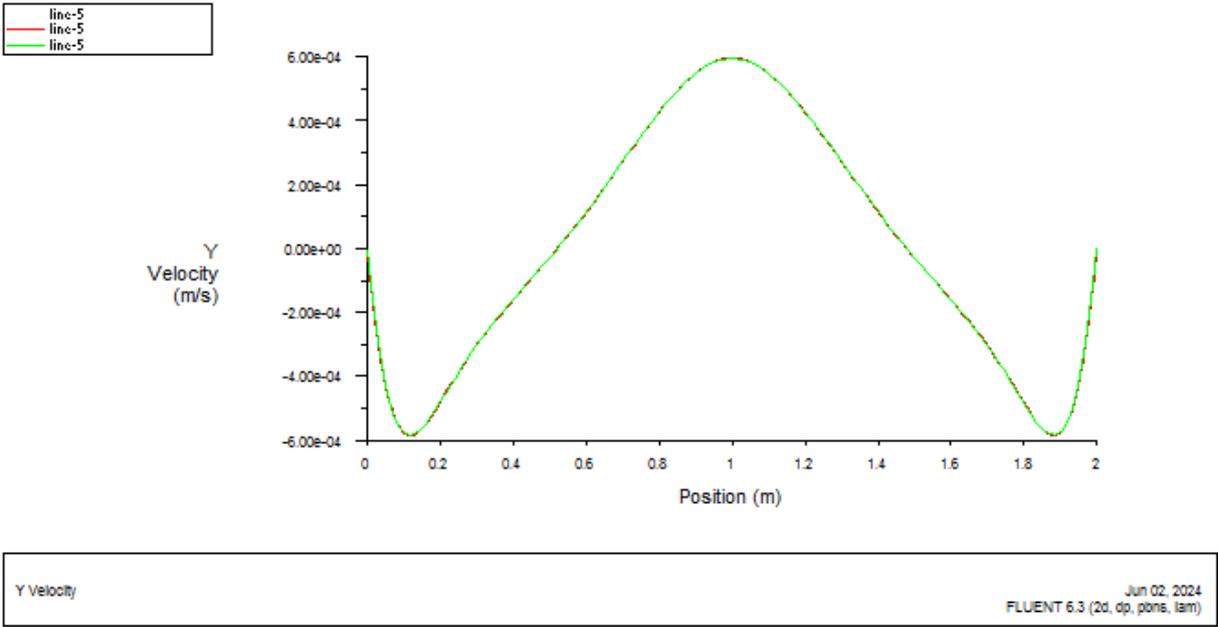
**Figure III.7** : Validation de maillage  $Nu=f(\text{maillage})$  pour  $Ra=10^4$

La figure III.7 représente la validation de nombre de Nusselt pour étudier et confirmer le maillage. Nous avons utilisé le même maillage de 80 pour la configuration de la première validation de la cavité carré (type1) en

le multipliant par le rapport géométrique. Une comparaison des résultats de Nusselt a été effectuée par rapport à d'autres types de maillage (voir figure III.7). Nous avons constaté que le maillage de 80×160 donne des résultats satisfaisants. Ça été aussi confirmé en plus de la comparaison du nombre du Nusselt, par les profils de vitesse et de température au plan médiane de la cavité (**Figure III.8.1** et **Figure III.8.2**).



**Figure III.8.1** Profils de température  $\theta$  suivant X à Y/2



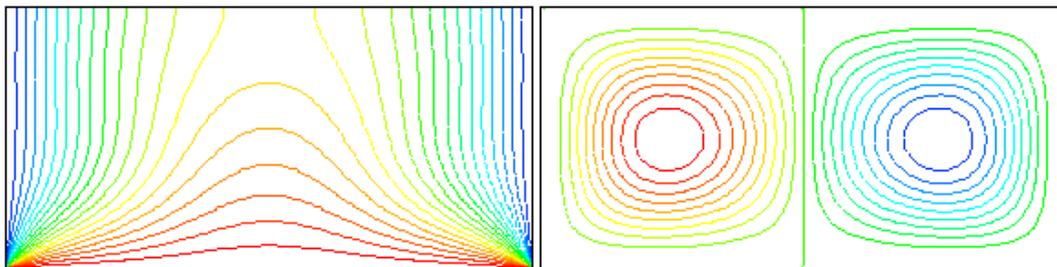
**Figure III.8.2** Profils de vitesse V suivant X à Y/2

### **Commentaire physique :**

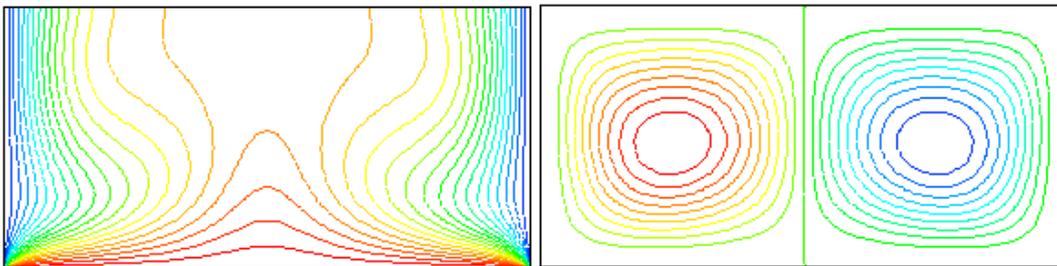
Dans cette partie, l'influence du nombre de Rayleigh a été étudiée sur la structure de l'écoulement. Sur le côté gauche de la figure **III.9**, sont présentés les profils de température entre  $Ra = 10^3$  à  $10^5$ . On constate bien l'apparition d'un panache qui commence à prendre forme à  $Ra = 5 \cdot 10^3$ , et qui évolue à l'agrandissement jusqu'à  $Ra = 10^5$ . Les isothermes sur les parois froides se rétrécissent à fur et à mesure que le nombre de Rayleigh augmente, la chaleur va être dominante à l'intérieur de la cavité. Ceci est aussi confirmé par le profil de la température au plan médiane de la cavité (figure III.10)

Sur le côté de droit de la figure III.9, sont présentées les lignes de courant. On remarque l'apparition de deux tourbillons en mouvement de rotation opposée. Celui de droite tourne suivant les aiguilles d'une montre et celui de gauche tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Comme on le voit, l'air froid descend et l'air chaud monte vers le haut, et chaque fois que nous augmentons la valeur de Rayleigh il s'accélère sur les parois froides. Quant aux lignes de courants, elles rétrécissent sur les parois et au milieu de la cavité. Ceci est aussi confirmé par le profil de la vitesse verticale au plan médiane de la cavité (figure III.11)

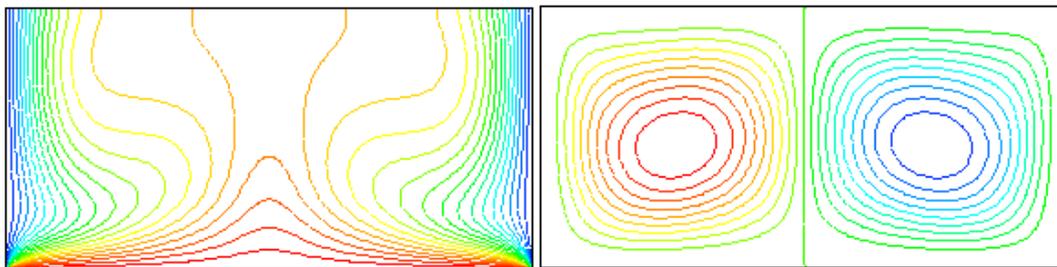
$$Ra = 10^3$$



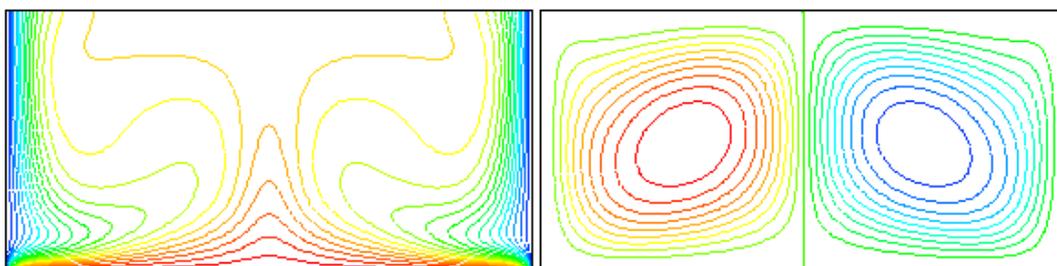
$$Ra = 5 \times 10^3$$



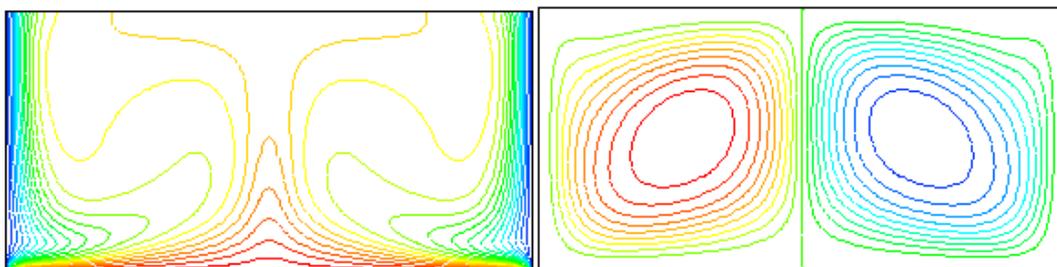
$$Ra = 10^4$$



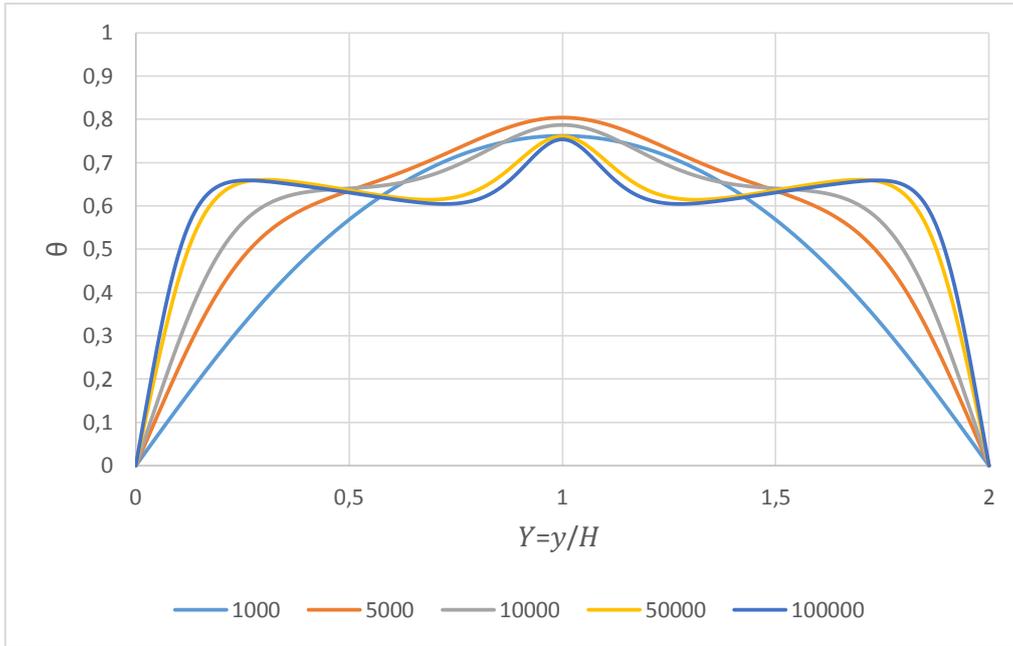
$$Ra = 5 \times 10^4$$



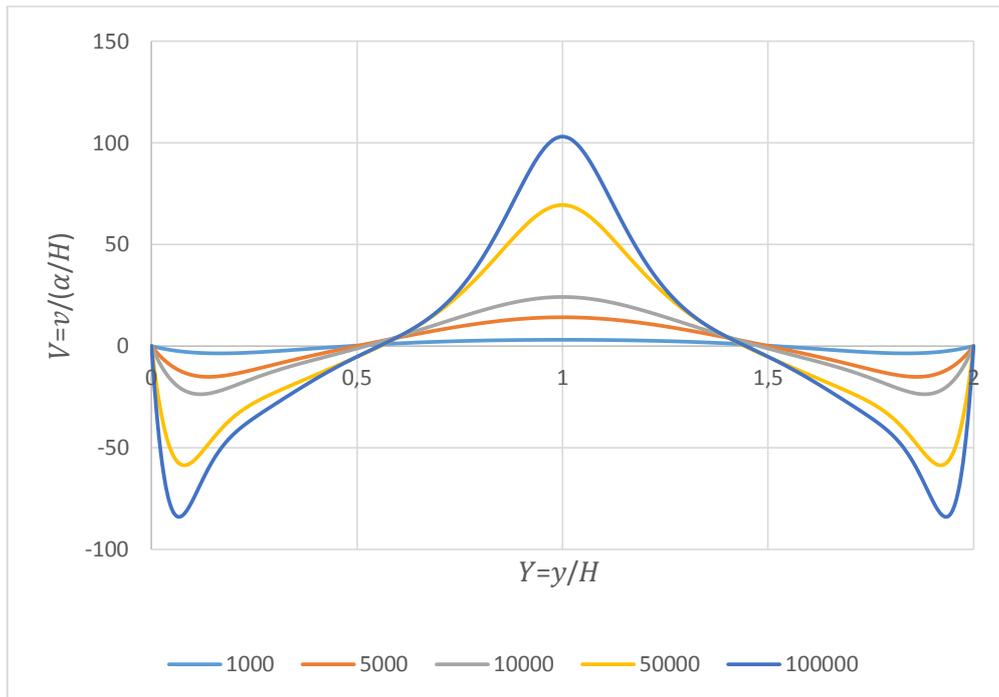
$$Ra = 10^5$$



**Figure III.9** : Les isotherme et lignes pour les différentes valeurs de nombre de Rayleigh



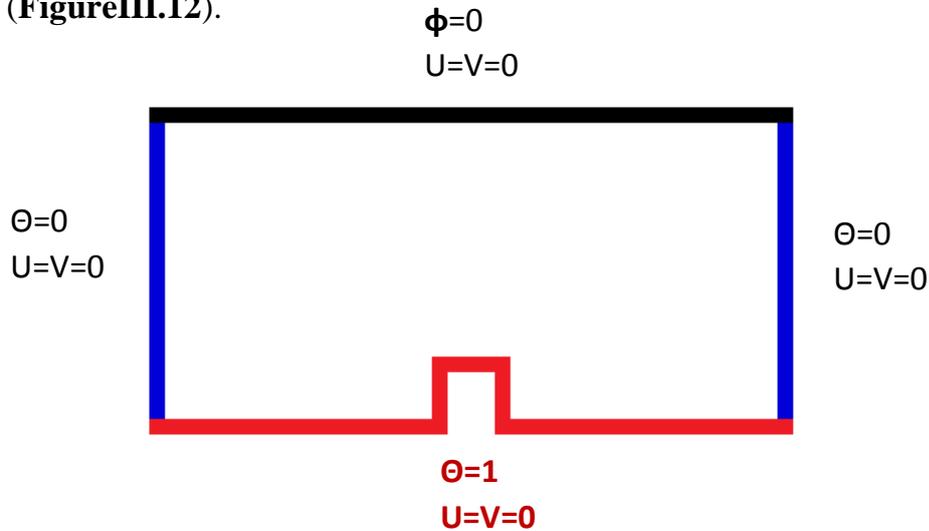
**Figure III.10 :** Profils de température  $\theta$  suivant X à Y/2



**Figure III.11 :** Profils de vitesse V suivant X à Y/2

### III-3-2-Etude de la convection dans une enceinte rectangulaire de rapport géométrique égal à 2 avec un obstacle chauffé

Dans cette section nous avons étudié une cavité rectangulaire avec un seul obstacle chauffé placé sur la base de la cavité. Les parois verticales sont froides et celle du haut est adiabatique (**Figure III.12**).



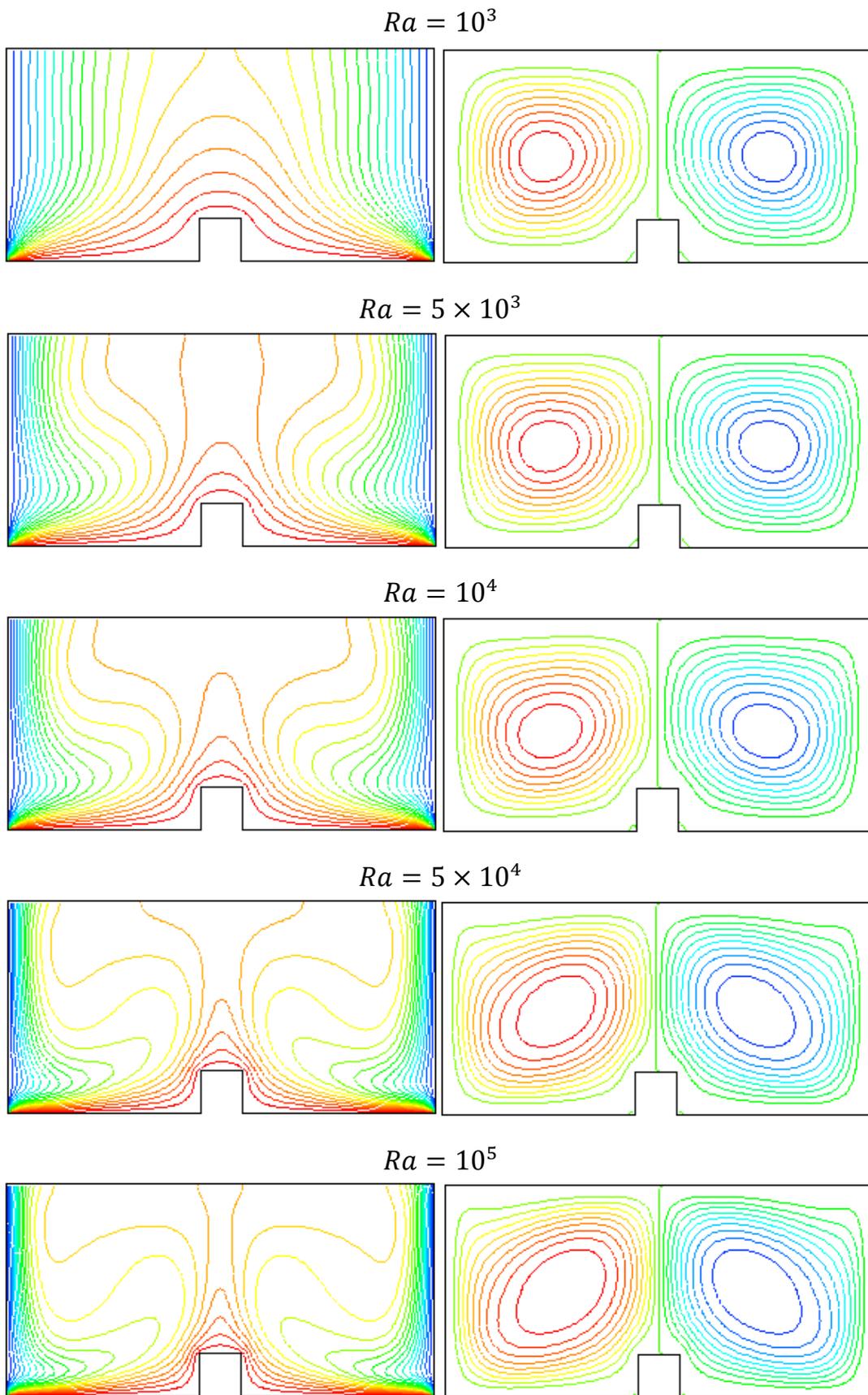
**Figure III.12** : Configuration physique de la cavité avec un seul obstacle

#### Commentaire :

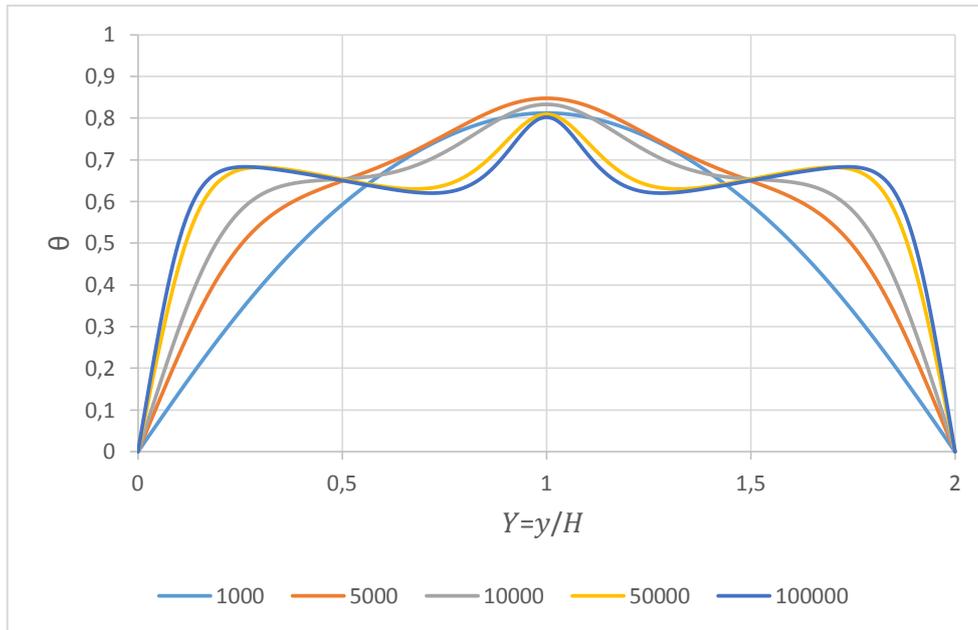
Dans cette partie, une étude de l'influence de nombre de Rayleigh sur la structure de l'écoulement dans une cavité rectangulaire avec un obstacle a été effectuée. La variation du nombre de Rayleigh a été prise entre  $10^3$  à  $10^5$ .

A la gauche de la figure **III.13**, présentent les isothermes pour les différentes valeurs du nombre de Rayleigh. On observe un rétrécissement des lignes de température au niveau des parois froides, par conséquent, l'espace à l'intérieur est devenu beaucoup plus chauffé par rapport à la cavité précédente sans obstacle. Ceci est aussi confirmé par le profil de la température au plan médiane de la cavité (figure III.14). L'apparition du panache au milieu commence à  $5 \cdot 10^3$  et il se déforme à l'intérieur de la cavité en fonction de l'augmentation du nombre de Rayleigh.

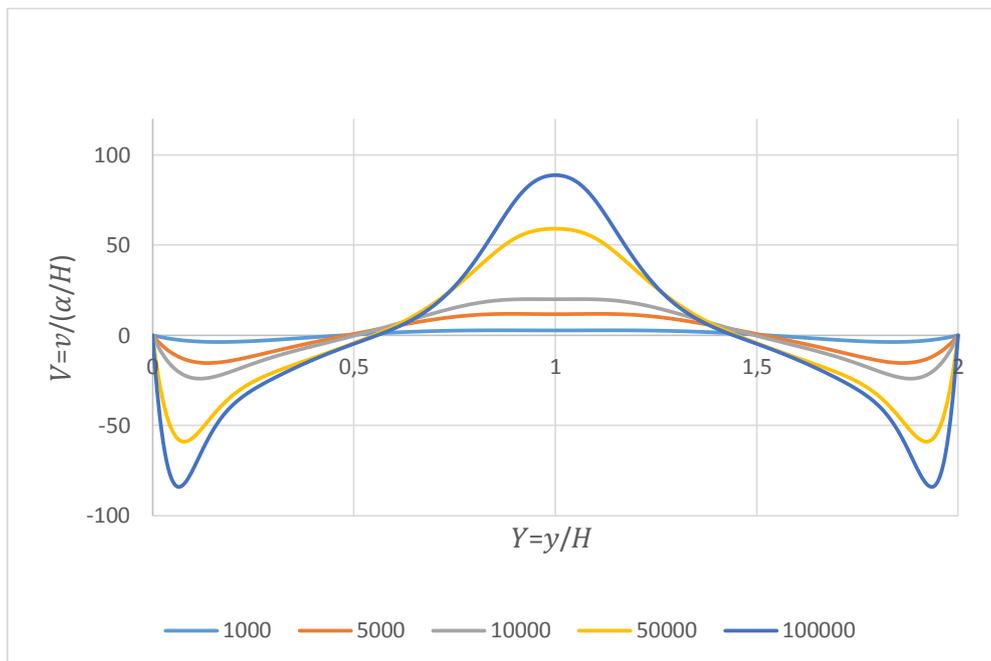
Sur le droit de figure **III.13**, présentent les lignes de courant. On remarque l'apparition de deux tourbillons en mouvement de rotation opposée. Celui de droite tourne suivant les aiguilles d'une montre et celui de gauche tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Ces tourbillons se déforment avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et aussi avec la présence de l'obstacle.



**Figure III.13 :** Les isotherme et lignes pour les différentes valeurs de nombre de Rayleigh



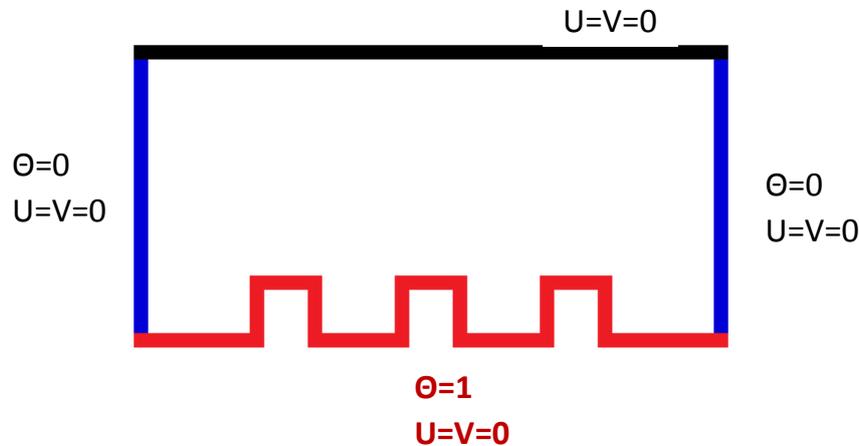
**Figure III.14 :** Profils de température  $\theta$  suivant X à Y/2



**Figure III.15 :** Profils de vitesse  $V$  suivant X à Y/2

### III-3-3-Etude de la convection dans une enceinte rectangulaire de rapport géométrique égal à 2 avec trois obstacles chauffés :

Dans cette dernière section, nous étudierons une cavité rectangulaire avec trois obstacles chauds placés sur la paroi inférieure de la cavité. Les parois verticales sont froides et celle du haut est adiabatique (**Figure III.1**  $\phi=0$



**Fig III.16** : Configuration physique de la cavité avec trois obstacles chauds

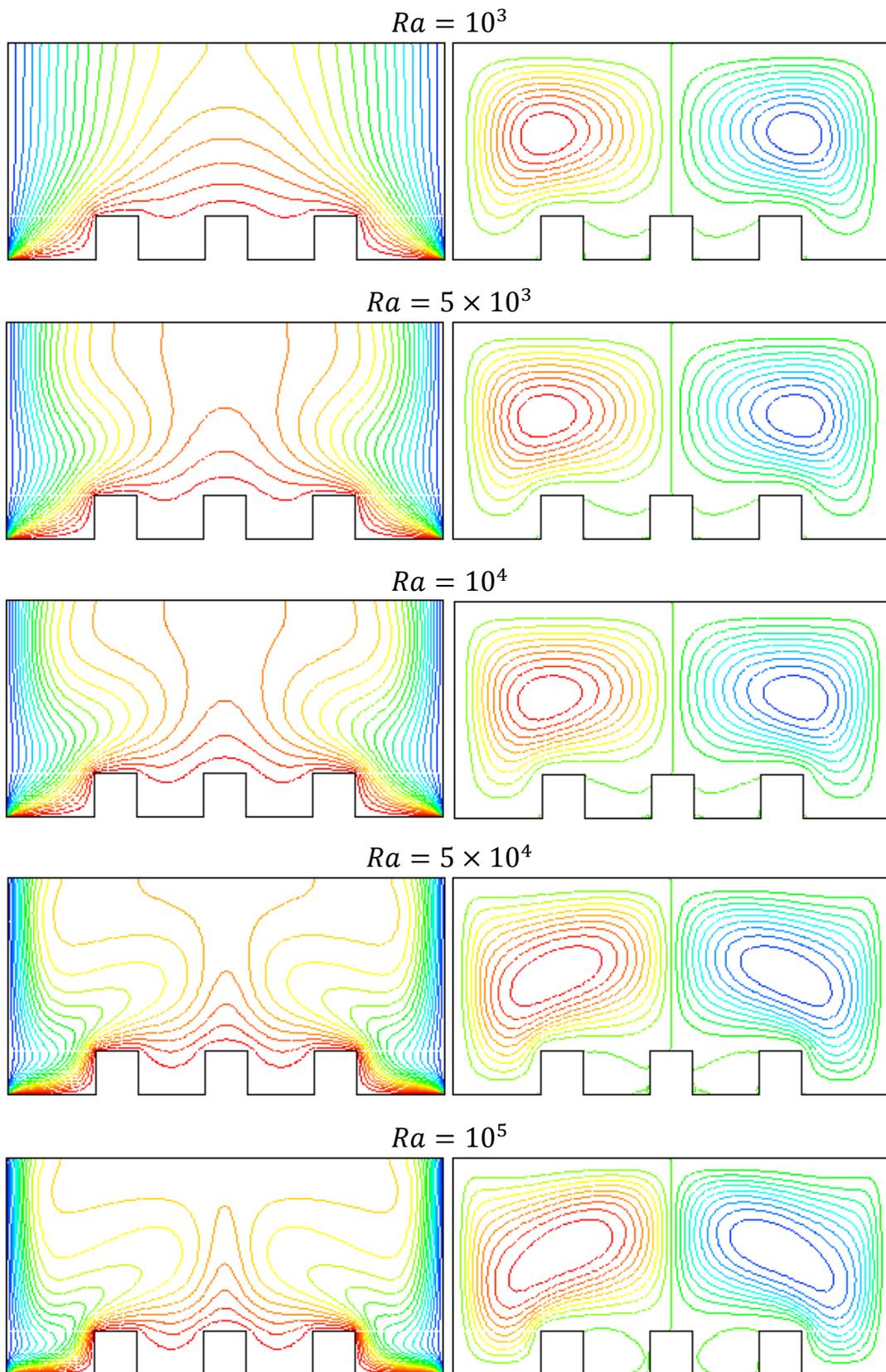
#### Commentaire :

Les résultats de la structure de l'écoulement dans la cavité rectangulaire avec trois obstacles chauffés sont présentés dans la **Figure III.17**.

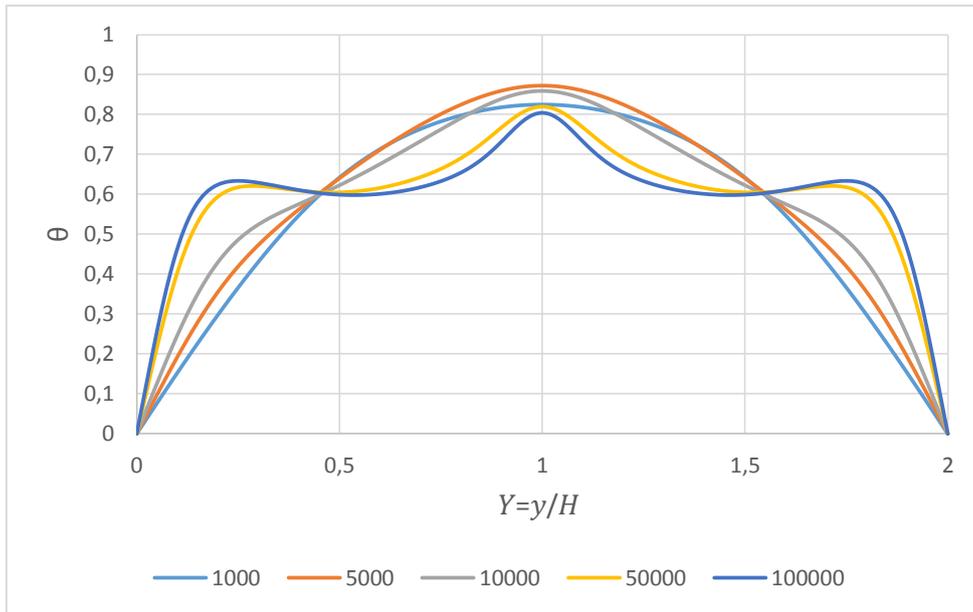
On observe sur les lignes de courant que les particules fluides s'accélèrent sur les parois froides et créent deux structures tourbillonnaires contre rotatives. Celui droite tourne avec le sens des aiguilles d'une montre et celui de gauche tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Comme c'est illustré aussi sur le graphe des profils de vitesse. On voit bien sûr les profils (figure III .19), que les deux pics près des parois qui traduisent les vitesses inverses vers le bas et un pic vers le haut au milieu qui montre le mouvement du fluide vers le haut. Les deux noyaux des tourbillons se déforment au fur et à mesure que la valeur de Rayleigh augmente.

L'apparition du panache au milieu commence à  $5.10^3$  et il se déforme à l'intérieur de la cavité en fonction de l'augmentation du nombre de Rayleigh. L'espace à l'intérieur est devenu beaucoup plus chauffé par rapport aux types de cavités précédentes. Ceci est aussi confirmé par le profil de la température au plan médiane de la cavité (figure III.18).

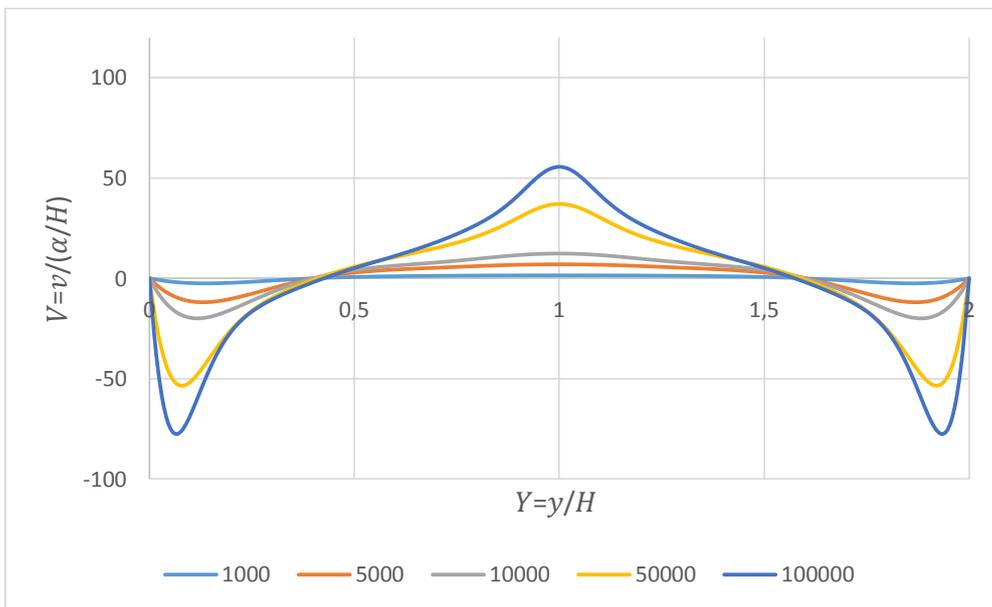




**Figure III.17 :** Les isotherme et lignes pour les différentes valeurs de nombre de Rayleigh



**Figure III.18 :** Profils de température  $\theta$  suivant X à Y/2

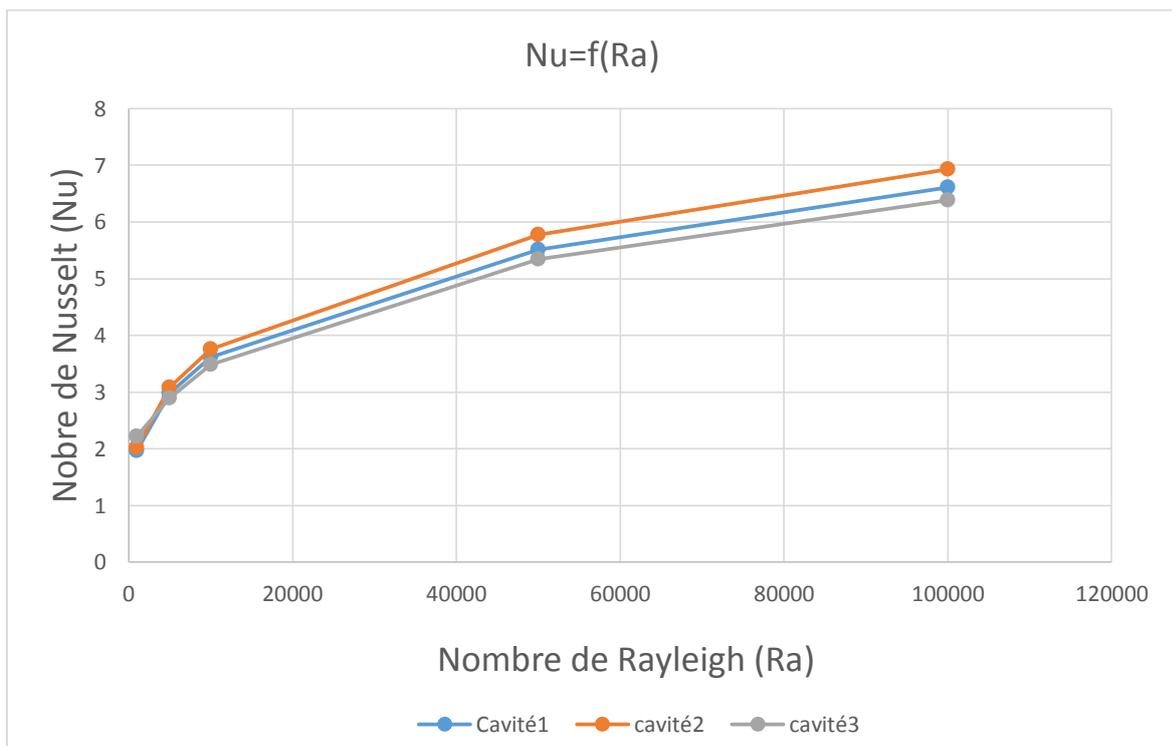


**Figure III.19 :** Profils de vitesse  $V$  suivant X à Y/2

### III-3-4-Les résultats de Nusselt Moyen pour les trois cas de la cavité rectangulaire et pour les différents Rayleigh :

L'évaluation des échanges thermiques par convection naturelle dans les enceintes fermées repose sur le calcul en premier lieu, sur le calcul du nombre de Nusselt sur les parties chaudes de la cavité. La figure III.20, présente l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh pour les trois cavités étudiées dans ce travail notamment, la cavité 1 est une enceinte rectangulaire simple chauffée par le bas et de rapport géométrique égal à 2, la cavité 2 est comme la précédente avec en plus un obstacle chauffé, la troisième cavité est avec trois obstacles chauffés.

Selon la figure III.20, illustre la variation du nombre de Nusselt en accroissement en fonction de l'augmentation du nombre de Rayleigh pour les trois configurations physiques des cavités traitées. Cette évolution suit le même profil avec une différence de la présence ou non des obstacles Chauds.



**Figure III.20 :** La variation de Nusselt en fonction du Nombre de Rayleigh

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats importants de notre étude de simulation. Le travail numérique a été réalisé à l'aide des deux logiciels, notamment Gambit et Fluent. Ceci nous a permis de comprendre les effets de la convection dans une cavité fermée chauffée par le bas, avec ou sans les obstacles. La discussion de l'effet du nombre de Rayleigh pour notre problème et la présence des obstacles sur la structure d'écoulement a été aussi traitée. Les résultats en général été sous forme de lignes de courant, des isothermes et des profils de vitesse et de température.

## Conclusion générale :

Ce travail que nous avons étudié dans ce mémoire, à pour but d'analyser les processus de convection naturelle à l'intérieur de cavités fermée munie d'obstacle chauds.

De ce fait, une étude numérique bidimensionnelle de la convection naturelle à l'intérieur d'une cavité rectangulaire fermée, simple et rectangulaire a été effectuée avec trois configurations physiques : munie d'un seul obstacle chaud, de trois obstacles chauds et sans obstacles. L'étude porte sur différentes valeurs du nombre de Rayleigh avec un nombre de Prandtl fixe.

Les équations qui régissent l'écoulement notamment, l'équation de continuité, l'équation du mouvement et l'équation l'énergie ont été résolues par la méthode des volumes finis en utilisant le logiciel Gambit pour la géométrie et le maillage et le logiciel Fluent pour la résolution numérique.

Les résultats sont également présentés sous la forme des lignes de courant, des isothermes, les profils de température et vitesse au milieu de cavité.

Après l'analyse des résultats des trois configurations étudiées notamment, la cavité rectangulaire simple, la cavité rectangulaire avec un seul obstacle chaud et la cavité rectangulaire avec trois obstacles chauds, illustre que : la convection naturelle est liée fortement à l'augmentation du nombre de Rayleigh ; et la présence des obstacles chauds dans la cavité engendre une augmentation de la température dans l'enceinte fermée et une accélération des particules fluides.

## Références bibliographiques :

- [1] Geankolips, C J (2003), processus de transport et principes des séparation (4eme édition).
- [2] Icoz, T, Jaluria, Y. (2005): Numerical simulation of boundary conditions and the onset of instability in natural convection due to protruding thermal sources in an open rectangular channel, Numerical Heat Transfer, Part A, vol.29,No 11,pp.1711-1722.
- [3] JANNOT Y., Transferts thermiques, cours Ecole des Mines Nancy, Edition Livre (2012).
- [4] Ostrach, S. (1972). Natural convection in enclosures. Advances in Heat Transfer, 8, 161-227. DOI 10.1016/S0065- 2717(08)70039-X.
- [5] Anderson, R., Lauriat, G. (1986). The horizontal natural convection boundary layer regime in a closed cavity. International Heat Transfer Conference, vol. 4, pp. 1453-1458. San Francisco, CA
- [6] Yao, L. S. (1983), Natural convection along a vertical wavy surface. Journal of Heat Transfer, 105, 465-468. DOI 10.1115/1 3245608.
- [7] Chu, T. Y., Hichox, C. E. (1990). Thermal convection with large viscosity variation in an enclosure with localized heating Journal of Heat Transfer, 112, 388-395. DOI 10.1115/1 2910389.
- [8] Sharif, M. A. R., Mohammad, T. R. (2005). Natural convection in cavities with constant flux heating at the bottom wall and isothermal cooling from the sidewalls. International Journal of Thermal Sciences, 44(9), 865-878. DOI 10.1016/j.ijthermalsci. 2005.02.006.
- [9] Calcagni, B., Marsili, F., Paroncini, M. (2005). Natural convective heat transfer in square enclosures heated from below. Applied Thermal Engineering, 25(16), 2522-2531. DOI 10.1016/j.applthermaleng 2004.11.032.
- [10] Caronna, G., Corcione, M., Habib, E., (2009). Natural convection heat and momentum transfer in rectangular enclosures heated at the lower portion of the sidewalls and the bottom wall and cooled at the remaining upper portion of the sidewalls and the top wall. Heat Transfer Engineering, 30(14), 1166-1176. DOI 10.1080/ 01457630902972777.
- [11] Zemani, F., Sabeur-Bendehina, A., Boussoufi, M. (2014). Numerical investigation of natural convection in air filled cubical enclosure with hot wavy surface and partial partitions. Procedia Computer Science, 32, 622-630, DOI 10.1016/j.procs2014.05.469.

- [12] Belkadi, M., Aounallah, M., Imine, O., Adjlout, L. (2006). Free convection in an inclined square cavity with partial partitions on a wavy hot wall. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 6(7), 428-434. DOI 10.1504/PCFD.2006.010968.
- [13] Yigit, S., Battu, M., Turan, O., Chakraborty, N. (2019), Free convection of power-law fluids in enclosures with partially heating from bottom and symmetrical cooling from sides. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 145, 118782. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118782.
- [14] Torabi, M., Keyhani, A., Peterson, G. P. (2017). A comprehensive investigation of natural convection inside a partially differentially heated cavity with a thin fin using two-set lattice Boltzmann distribution functions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 264-277. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.042.
- [15] Mebarek-Oudina, F. (2017). Numerical modeling of the hydrodynamic stability in vertical annulus with heat source of different lengths. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(4), 1324-1333. DOI 10.1016/j.jestch.2017.08.003.
- [16] Zaim, A., Aissa, A., Mebarek-Oudina, F., Mahanthesh, B., Lorenzini, G. et al. (2020). Galerkin finite element analysis of magnetohydrodynamic natural convection of Cu-water nanoliquid in a baffled U-shaped enclosure. *Propulsion and Power Research*, 9(4), 383-393. DOI 10.1016/j.jprr.2020.10.002.
- [17] Zarrit R., Seghir Boumaza M. Kherrou S, Dadda B, Simulation numérique de la convection naturelle 2d dans les cavités rectangulaires fermées. Le 4<sup>ème</sup> séminaire international sur les Energies Nouvelles et Renouvelables. Ghardaia (2006).
- [18] Maougal, A. and Bessaih, R. (2013): Heat transfer and entropy analysis for mixed convection in a discretely heated porous square cavity, *FDMP*, vol.9, no1, pp. 35-59.
- [19] Lundgren, T.S. (1972): slow flow through stationary random beds and suspension of spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, vol.51, pp.273-299.
- [20] Bejan, A. (2004): *Convection heat transfer*, 3<sup>rd</sup> edition, Wiley, New York.
- [21] Patankar S.V (1980): *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere. Washington, DC.
- [21] Abbès AZZI, Méthodes numériques, la méthode des volumes finis. [www.abbesazzi.com/wp-content/uploads/2014/10/MN-I-ver01-par](http://www.abbesazzi.com/wp-content/uploads/2014/10/MN-I-ver01-par).

[23] Bouamoud B. et Houat S., Etude de la convection naturelle dans une cavité carrée partiellement chauffée par la méthode de Boltzmann sur réseau. XIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, Sherbrooke-Québec, Canada (2015).

[24] Markatos N.C., Pericleous K.A, "Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity, 'Int.J.heat Mass Transfer, 27, (1984).pp.755-772.

[25] De Vahl Davis G, Natural convection of air in a square cavity: a benchmark numerical solution, Int.J.Numer. Meth, Fluid, 3,(1983).pp.249-256.