



Faculty of Sciences and Technology
departement of mechanical Engineering

كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

**ANALYSE DE LA CONVECTION NATURELLE
DANS UNE ENCEINTE RECTANGULAIRE
CHAUFFEE DISCRETEMENT PAR LE BAS**

Présenté par :

❖ DOUBBI BOUNOUA Karim

Soutenu le 13 / 07 / 2022 devant le jury composé de :

Président	Pr RETIEL Nouredine	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. OULDSAID Belkacem.	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Pr. HOUAT Samir	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu, le bon Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné

autant de courage, de patience et de volonté pour atteindre ce but

Permette moi d'offrir aujourd'hui tous mes remerciements et mon respect à mes chers et

honorable enseignants et professeurs, en particulier Professeur HOUAT Samir, qui s'est

toujours montré à l'écoute et être disponible tout au long de la réalisation de ce

mémoire, ainsi pour le soutien, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer, et

pour la confiance, les encouragements, les précieux conseils

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du jury.

J'aimerai également remercier le Professeur RETIEL Nouredine président du jury de

soutenance de ce mémoire, ainsi qu'au examinateur Dr. OULDSAID Belkacem qui

m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les modérateurs de ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude et remerciements à tous les enseignants de

département de Génie Mécanique.

Je tiens à remercier mes collègues et mes amis au centre universitaire en particulier

Abdeljalil, Ahmed, Tarek, Oussama, Chaouki, Abdelillah.

Je n'oublierai pas non plus tous ceux qui, de près ou de loin, par leur compétence, leur

aide technique et leurs conseils ont contribué à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce travail :

À Mes chers parents, pour leurs patiences, leur soutien et leurs encouragements que

dieu les protège ;

Mes frères qui sont toujours avec moi et à Mon encadreur « Prof. Houat Samir »

Merci infiniment

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la modélisation et simulation numérique du transfert de chaleur par convection naturelle pure dans une cavité rectangulaire de rapport géométrique $L/H=2$.

L'enceinte fermée est remplie avec un fluide incompressible de nombre de Prandtl égale 0.71, avec des parois verticales adiabatiques et des parois horizontales soumises à des températures différentes et constantes : celle du haut est froide et celle du bas est partiellement chauffée.

La modélisation et simulation en deux dimensions est effectuée en utilisant le code Fluent basé sur la méthode des volumes finis, qui permet de résoudre les équations décrivant le modèle physique. L'analyse de la convection naturelle pure est effectuée pour différents nombres de Rayleigh ($Ra=10^3, 10^4, 5.10^4, 10^5$).

Les résultats sont présentés sous forme des lignes de courant, des isothermes, des profils des vitesses et de températures.

Mots clés : Convection naturelle pure-Cavité fermée-cavité partiellement chauffée, nombre de Rayleigh.

Abstract

The work presented in this thesis deals with the modeling and numerical simulation of heat transfer by pure natural convection in a rectangular cavity of a geometric ratio $L/H=2$.

The closed chamber is filled with an incompressible fluid of Prandtl number equal to 0.71, with adiabatic vertical wall and horizontal walls subjected to different and constant temperatures: the upper one is cold and the lower one is partially heated.

The two-dimensional modeling and simulation is performed using the Fluent code based on the finite volume method, which allows to solve the equations describing the physical model. The analysis of pure natural convection is performed for different Rayleigh numbers ($Ra=10^3, 10^4, 5.10^4, 10^5$),

The results are presented in the form of streamlines, isotherms, velocity and temperature profiles.

Key words: Pure natural convection - Closed cavity - partially heated Cavity-Rayleigh number.

ملخص

يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بالنمذجة والمحاكاة العددية لانتقال الحرارة عن طريق الحمل الحراري الطبيعي النقي في تجويف مستطيل بنسبة هندسية $L / H = 2$. الحاوية المغلقة مملوءة بسائل غير قابل للضغط من رقم Prandtl يساوي 0.71، مع جدران رأسية ثابتة الحرارة وجدران أفقية تخضع لدرجات حرارة ثابتة وبفي درجات حرارة مختلفة وثابتة: العلوي بارد والسفلي مسخن جزئياً..

يتم تنفيذ النمذجة والمحاكاة في بعدين باستخدام كود Fluent بناءً على طريقة الأحجام المحدودة، مما يجعل من الممكن حل المعادلات التي تصف النموذج المادي. يتم إجراء تحليل الحمل الحراري الطبيعي لأرقام Rayleigh المختلفة ($Ra=10^3, 10^4, 5.10^4, 10^5$). يتم عرض النتائج في شكل خطوط انسيابية ومتساوية الحرارة والسرعة ودرجة الحرارة.

الكلمات المفتاحية: الحمل الحراري الطبيعي النقي - تجويف مغلق - تجويف مسخن جزئياً- رقم رايلي

SOMMAIRE

Remerciements	i
Dédicaces.....	ii
Résumé	iii
Sommaire	1
- Nomenclature	3
- Liste des figures	5
- Liste des tableaux	6
-Introduction Générale.....	7
- Chapitre 1 : Etude bibliographique et mise en équations de la configuration physique étudiée	
I.1 Introduction	10
I.2 Transfert de chaleur par convection	10
I.3 Convection naturelle	10
I.4 Etude Bibliographique	11
I.5 Expression des nombres sans dimensions pour la convection naturelle	12
1.6 Description de la configuration physique :	
I.6.1 Hypothèses simplificatrices utilisées dans le développement des Equations	13
I.6.2 Equations générales de conservations (Equations de Navier Stockes)	14
I.6.2.1 Equation de continuité	14
I.6.2.2 Equation de quantité de mouvement	14
I.6.2.3 Équation de l'énergie	14
I.6.3 Équations adimensionnelles	15
I.7 Approximation de Boussinesq	15
I.8 La méthode de volume finis	16
I.9 Conclusion	16
- Chapitre 2 : Outils et procédure de résolution	
II.1 Introduction	18
II.2 Présentation du logiciel GAMBIT	18
II.2.1. Démarrage de Gambit	18
II.2.2. Fonctionnalités de Gambit	19
II.2.3 Description de la menue géométrie	20
II.2.4 Description du menu maillage	20
II.2.5 Conditions aux limites et définition de domaines	20
II.2.6 Exportation du maillage de Gambit	21
II.3 Le logiciel FLUENT	21
II.3.1 Vérification du maillage importé	22
II.3.2 L'équation de l'énergie	23
II.3.3 Définition des caractéristiques du fluide	23
II.3.4 Introduction de la gravité	24
II.3.5 Conditions aux limites	26
II.4 Conclusion	27
-Chapitre 3 : Résultats et discussions	
III.1 Introduction	28

III.2 Validation numérique	28
III.2.1 Choix de maillage	28
III.2.2 Validation physique	29
III.2.3 Résultats et discussion physique pour le cas de validation	30
III.3 Résultats et discussion de la cavité rectangulaire chauffée par le bas	32
III.3.1 Description de la configuration physique et conditions aux limites	32
III.3.2 Résultats et discussions	31
III.3.2.1 Effet de la variation du nombre de Rayleigh	31
III.3.2.2 Effet de la variation de la portion de chauffage	34
Conclusion Générale	38
Références Bibliographiques	40

NOMENCLATURE

Symboles latins :

C_p	Chaleur spécifique à pression constante	[J/kg.K]
g	l'accélération de la gravité	[m.s ⁻²]
h_c	Le coefficient d'échange convectif.....	[w/m ² .K]
H	Hauteur de la cavité.....	[m]
P	Pression.....	[Pa]
T_f	Température sur la paroi froide	[K]
T_c	Température sur la paroi chaude	[K]
u,v	Les composantes de la vitesse	[m.s ⁻¹]
U,V	Les composantes de la vitesse adimensionnelle	
x, y	Coordonnées cartésiennes	[m]
X, Y	Coordonnées cartésiennes adimensionnelles.....	[m]

Symboles Greek :

α	diffusivité thermique	[m ² .s ⁻¹]
β	coefficient de dilatation thermique.....	[K ⁻¹]
θ	Température adimensionnelle	[K]
ρ	Masse volumique du fluide	[kg.m ⁻³]
λ	Conductivité thermique	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]
∇	Gradient.....	[-]
μ	viscosité dynamique	[kg/m.s]
ν	viscosité cinématique	[kg/m.s ⁻³]

Nombres adimensionnels

Gr	Nombre de Grashof	[-]
Nu	Nombre de Nusselt	[-]
Pr	Nombre de Prandtl.....	[-]
Ra	Nombre de Rayleigh	[-]

Liste des figures

<i>FigureII.1. Lancement du Gambit.....</i>	<i>18</i>
<i>FigureII.2En cliquant sur chaque fonctionnalité du Menu générale un Menu secondaire correspondant s'affichera juste en dessous</i>	<i>19</i>
<i>FigureII.3. Menus secondaires de Gambit</i>	<i>19</i>
<i>FigureII.4. Exportation du maillage de Gambit</i>	<i>20</i>
<i>FigureII.5Lisage du maillage : Pour commencer la simulation il faut importer le fichier.....</i>	<i>21</i>
<i>FigureII.6. Vérification du maillage sou Fluent</i>	<i>21</i>
<i>FigureII.7 Menu pour introduire l'équation d'énergie</i>	<i>22</i>
<i>FigureII.8. Définition des caractéristiques du fluide</i>	<i>22</i>
<i>FigureII.9 : Introduction de la gravité</i>	<i>23</i>
<i>FigureII.10 Valeurs des conditions aux limites</i>	<i>23</i>
<i>FigureII.11 Choix de la méthode de solution des équations et l'algorithme</i>	<i>24</i>
<i>FigureII.12 : Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence</i>	<i>24</i>
<i>FigureII.13 : menu de lancement des itérations</i>	<i>25</i>
<i>FigureIII.1 Configuration géométrique</i>	<i>27</i>
<i>FigureIII.2 Validation du maillage $Nu=(Maillage)$</i>	<i>28</i>
<i>FigureIII.3: les isothermes (a) et les lignes de courants (b) en fonction de Ra.....</i>	<i>29</i>
<i>FigureIII.4: Profils de vitesse suivant X et Y</i>	<i>30</i>
<i>FigureIII.5: Profils de température suivant X</i>	<i>30</i>
<i>FigureIII.6 : Maillage adopté pour la cavité rectangulaire ($l/L=40\%$).....</i>	<i>31</i>
<i>FigureIII.7: les isothermes (a) et les lignes de courants (b) pour ($l/L=40\%$) en fonction Ra. .</i>	<i>33</i>
<i>FigureIII.8 Profils de vitesse suivant Y</i>	<i>34</i>
<i>FigureIII.9 : Profils de te température suivan Y</i>	<i>34</i>
<i>Figure III.10: Evolution du Nusselt $Nu =f(Ra)$ pour partition de chauffage 40%</i>	<i>34</i>
<i>Figure III.11: les isothermes (a) et les lignes de courants (b) pour différentes portions de chauffage</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.12: Evolution du Nusselt en fonction de la partition de chauffage $Nu =f(l/L\%)$ pour $Ra=10^4$.....</i>	<i>37</i>

Liste des tableaux

Tableau II.1 Description des commandes du menu maillage19

Tableau III.1 : Comparaison des valeurs du nombre de Nusselt (Convection naturelle pure) 20

Introduction Générale

La "Convection Libre" (Free Convection), ou "Convection Naturelle" (Natural Convection) est le régime d'écoulement obtenu lorsque l'on chauffe un fluide sans qu'il n'y ait d'écoulement "extérieur" imposé. Cet écoulement est inexplicable dans le cadre précédent car aucun mouvement ne serait possible de par le découplage entre les équations de la dynamique et de la thermique [1,2]. Pour lever ce paradoxe, on tient compte d'un phénomène que l'on avait négligé : la légère dilatabilité du fluide. C'est donc la force d'Archimède provoquée par les variations de densité induites par le chauffage qui fait se déplacer le fluide. La "thermique" et la "dynamique" sont alors très fortement couplées.

Dans ce mémoire la méthode de résolution utilisée dans ce travail est la méthode des volumes finis. Elle est généralement utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Elle résout approximativement des équations aux dérivées partielles à l'aide d'un maillage constitué de volumes finis.

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.

Dans ce mémoire, 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 permettra 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 la portion de chauffage discrets sur la paroi base de la cavité. Le travail est terminé par une conclusion générale.

Chapitre 01

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET MISE
EN EQUATIONS DE LA
CONFIGURATION PHYSIQUE ETUDIEE

I.1 Introduction :

Un transfert de chaleur qu'il convient d'appeler transfert thermique ou transfert par chaleur permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. Deux corps ayant la même température sont dites « équilibre thermique ». Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid. De ce fait, les transferts thermiques ont aussi bien dans le domaine des sciences pures que dans celui des applications technologiques, un rôle souvent essentiel. Ce rôle devient même déterminant lorsqu'il est à l'origine des techniques utilisées (échangeurs, moteurs thermiques, calorifugeage, utilisation de l'énergie solaire [1,2]).

Il y a 3 types de transfert de chaleur :

- par conduction thermique ou diffusion thermique,
- par convection,
- par rayonnement thermique.

I.2 -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. On distingue trois types de convection [1,2] :

- Convection naturelle.
- Convection Mixte.
- Convection forcée.

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

I.3 Convection naturelle :

Les mouvements sont dus aux variations de masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température entre un fluide chaud plus léger et un fluide froid moins léger [1, 2].

I.4 Etude bibliographique :

Une étude bibliographique est présentée dans cette partie pour le cas de la convection naturelle dans une enceinte partiellement chauffée :

H.sadouket A. Abdedou[3] ont présenté les résultats correspondant au cas de la cavité rectangulaire allongée avec la paroi inférieure portée à une température uniforme chaude et la paroi supérieure à une température uniforme froide, les deux parois verticales sont maintenues adiabatiques. Les résultats porteront sur les profils des lignes de courant, les isothermes et les nombres de Nusselt locaux pour les valeurs des paramètres de contrôle suivantes : ($Pr = 0.7, Ra=10^3$), ($Pr = 0.7, Ra=10^5$) et ($Pr = 1.0, Ra=10^5$).

F. Zouiri, et al. [4] ont étudié la convection naturelle laminaire au sein d'une cavité carrée fermée, remplie d'un fluide newtonien incompressible, de l'air en l'occurrence. L'enceinte est à parois latérales (en d'autres termes, verticales) maintenues à une température constante. Une fraction occupante 20% à 80% de la surface inférieure de l'enceinte et centrée par rapport à celle-ci, est maintenue à une température constante et uniforme, supérieure à celle des parois latérales et ce, grâce à une source de chaleur placée au contact de cette paroi. Cette source de chaleur a une largeur réduite notée ε , telle que : $\varepsilon = h/H$. Les surfaces horizontales supérieure et inférieure (de part et d'autre de la fraction chaude) de l'enceinte sont isolées thermiquement.

B. Bouamoud et S. Houat [5], Ont fait une étude numérique de la convection naturelle laminaire dans une cavité carrée différentiellement et partiellement chauffée. Le fluide utilisé est supposé newtonien avec $Pr=0.71$ et la variation de chauffage de la paroi gauche est de 20% à 80% de la hauteur totale. La méthode à double population de Boltzmann sur réseau thermique en deux dimensions a été utilisée. Les résultats obtenus sont présentés sous forme des lignes de courant, des isothermes, des profils de vitesse et de température, ainsi que la variation du nombre de Nusselt. L'analyse CFD montre que la structure d'écoulement et le transfert de chaleur est influencée par la portion du chauffage ainsi que le nombre de Rayleigh.

R.Zarrit et al. [6] 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 produit 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 $5 \cdot 10^5$.

1.5 Expression des nombres sans dimensions pour la convection naturelle :

La majorité des écoulements de convection naturelle peuvent être caractérisés par deux nombres sans dimension [1, 2] :

- le nombre de Prandtl (Pr).
- le nombre de Grashof (Gr).

De ces deux sans dimensions, nous pouvons en déduire le nombre de Rayleigh (Ra).

1.5.1 Nombre de Prandtl : Il représente le rapport entre la viscosité cinématique ν et la diffusivité thermique α . Il compare la rapidité des phénomènes de diffusion thermique et de diffusion visqueuse dans un fluide. Ce nombre porte le nom de Ludwig Prandtl, un physicien allemand et s'écrit :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1)$$

1.2.2 Nombre de Grashof : Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. Ce nombre porte le nom de Franz **Grashof**, ingénieur allemand. On définit le nombre de **Grashof** de la manière suivante

$$Gr = (g \beta \Delta T H^3) / \nu^2 \quad (2)$$

L : la dimension caractéristique du système étudié (m)

$\Delta T = T_c - T_f$: L'écart de température caractéristique ($^{\circ}K$)

g ; l'accélération de la gravité ($m \cdot s^{-2}$)

β : le coefficient de dilatation (K^{-1})

ν : la viscosité cinématique ($m^2.s^{-1}$).

I.5.3 Nombre de Rayleigh :

Ce nombre noté **Ra** est relié aux nombres de **Grashof** et de **Prandtl**. Il correspond au rapport des phénomènes moteurs, comme la poussée d'Archimède, et des phénomènes résistants, comme la diffusion de la chaleur ou les frottements visqueux. La convection s'amorce lorsque Ra dépasse une valeur critique. Ce nombre porte le nom de Lord Rayleigh, physicien anglais. Le nombre de Rayleigh s'exprime de la manière suivante :

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

I.5.4 Nombre de Nusselt [2]:

Il représente le rapport entre le transfert thermique total et le transfert par conduction. Il s'agit en fait du transfert de chaleur sans dimension. Le transfert thermique s'effectuera principalement par déplacement du fluide et aura pour conséquence de faire tendre le nombre de Nusselt vers $+\infty$.

On le définit de la manière suivante :

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda} \quad (4)$$

1.6 Description de la configuration physique :

Il s'agit d'une cavité rectangulaire de rapport géométrique $L/H=2$ (Fig.I.1). Elle est chauffée discrètement par le bas. Les parois verticales sont supposées adiabatiques, la paroi horizontale est froide et la paroi inférieure est chauffée discrètement en deux zones (voir Fig.I.1). L'enceinte rectangulaire est remplie d'un fluide newtonien et incompressible.

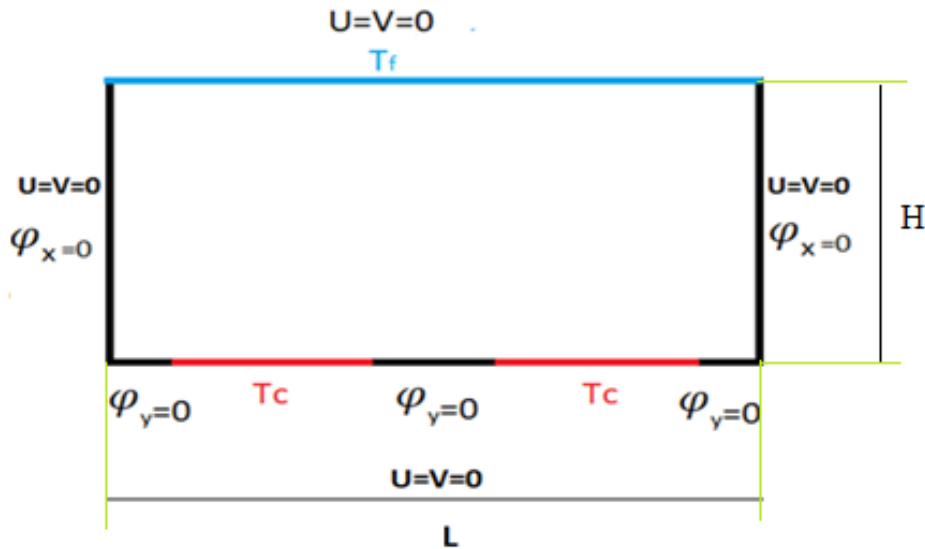


Fig.I.1 : La configuration physique et conditions aux limites

1.6.1 Hypothèses simplificatrices utilisées :

On suppose dans ce travail que,

- Le fluide est incompressible ($\rho = cte$) et Newtonien. ($\nu = cte$).
- L'écoulement du fluide à l'intérieur de la cavité est laminaire et bidimensionnel.
- Le régime est permanent. ($\partial/\partial t = 0$.)
- Absence de rayonnement et de source interne de chaleur ($q = 0$).
- Les propriétés physiques du fluide sont supposée constantes.
- L'approximation de Boussinesq est valide, elle consiste à considérer que les variations de la masse volumique sont négligeables au niveau de tous les termes des équations de quantité de mouvement (sauf au niveau du terme de gravité) [1, 2,7].

1.6.2. Equations générales de conservations (Equations de Navier Stokes) :

Pour formaliser la convection naturelle, il faut décrire le couplage des champs de température, de pression et de vitesse à partir des équations de conservation de quantité de

mouvement, de la masse et de l'énergie en prenant en considération les hypothèses précédentes.

Les équations qui régissent le phénomène convection naturelle pure dans la cavité en deux dimensions sont :

I.7.2.1 Equation de continuité :

Elle est déduite du principe de conservation de masse. Pour un fluide newtonien, incompressible et en régime permanent l'équation devient :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (5)$$

$$\rho = \text{cte} \Rightarrow \rho \text{ div } \mathbf{V} = 0 \Rightarrow \text{div } \mathbf{V} = 0.$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

I.7.2.2 Equation de quantité de mouvement :

D'après la deuxième loi fondamentale de la dynamique, la variation pendant l'unité de temps de la quantité de mouvement d'une particule fluide est égale à la somme des forces extérieures exercées sur cette particule. L'équation de la dynamique s'écrit sur les deux axes comme suit :

Suivant x

$$\left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (7)$$

Suivant y:

$$\left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \rho g \beta (T - T_0) \quad (8)$$

I.7.2.3 Équation de l'énergie :

Elle obtenue par l'application du premier principe de la thermodynamique et du principe de conservation de l'énergie.

$$\rho C_p \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (9)$$

I.7.3 Équations adimensionnelles :

En utilisant les variables adimensionnelles indiquées ci-dessous et les remplacer dans les équations de (6) à (9):

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, \theta = \frac{T - T_f}{T_c - T_f}, U = \frac{u}{\alpha}, V = \frac{v}{\alpha}, P = \frac{p - P_0}{\rho \left(\frac{\alpha}{H}\right)^2}, \alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

Les équations adimensionnelles seront décrites comme suit :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (10)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + Pr \left[\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right] \quad (11)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \left[\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] + Ra \cdot Pr \cdot \theta \quad (12)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right] \quad (13)$$

I.7.4 Approximation de Boussinesq :

Cette approximation consiste à supposer que les différentes propriétés thermodynamiques et de transport du fluide sont indépendantes de la pression. Cette hypothèse est adoptée pour la masse volumique qui est considérée comme constante dans tous les termes des équations de transfert sauf dans le terme gravitationnel où elle est traitée comme variable en fonction de la température et s'exprime comme suit β .

$$(\rho - \rho_0)g = -\rho_0\beta(T - T_0) \quad \rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \quad (14)$$

Avec : $\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)$

Où ρ_0 est la masse volumique de référence et β est le coefficient d'expansion thermique.

I.8 La méthode de volume finis :

En analyse numérique, la méthode des volumes finis [8] est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Résolvez approximativement des équations aux dérivées partielles à l'aide d'un maillage constitué de volume finis, qui sont de petits volumes 3D disjoints (surface 2D, segments 1D) qui se combinent pour former le domaine d'étude. Un volume finis peut être construit autour des points du maillage initial, mais ce n'est pas obligatoire.

La méthode de volumes finis a été développée à l'origine pour les lois de conservation hyperboliques, mais les développements récents permettent maintenant de les utiliser pour les équations elliptiques et paraboliques.

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une recherche bibliographique sur la convection naturelle dans des cavités carrées et rectangulaires.

Nous avons présenté également les équations bidimensionnelles de la convection naturelle pure s'appliquent à notre problème. Ce qui a permis de souligner les paramètres influents dans ces types d'échanges, notamment le nombre de Prandtl, par Rayleigh. La résolution de ces équations choisies est la méthode des volumes finis.

Dans le chapitre suivant, nous introduirons des méthodes numériques de résolution et Outils informatiques (Gambit et Fluent) utilisés dans cette étude.

Chapitre II

OUTILS ET PROCEDURE DE RESOLUTION

II.1 Introduction :

Gambit [9] et Fluent [10] sont des logiciels sous licence commerciale qui permettent des simulations 2D ou 3D en mécanique des fluides, allant de la construction de maillage avec Gambit à la résolution des équations de Navier Stokes et au post-traitement avec Fluent. Ils sont largement utilisés dans l'industrie (automobile, aéronautique, aérospatiale, etc.) en raison de leur interface graphique puissante et de leurs options riches, qui permettent la simulation de tous types de géométries complexes (fixes ou mobiles).) Avec des maillages fixes relatifs ou adaptatifs et divers modèles physiques (diphasiques, turbulents, etc.).

II.2. Présentation du logiciel GAMBIT [9] :

Le logiciel Gambit (*Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit*) est un mailleur 2D/3D ; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle. Les options de génération de Gambit offrent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structuré. Sinon, Gambit génère automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite. Avec les outils de vérification du maillage, les défauts sont facilement détectés. Il peut être utilisé pour construire une géométrie et lui générer un maillage éventuellement, une géométrie d'un autre logiciel de CAO peut être importée dans ce préprocesseur. Il génère des fichiers *.msh pour Fluent.

II.2.1. Démarrage de Gambit

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant :



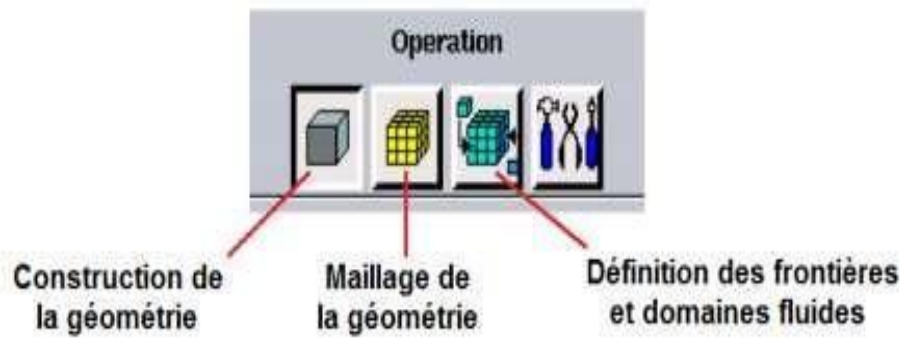
FigII.1. Lancement du Gambit

II.2.2. Fonctionnalités de Gambit

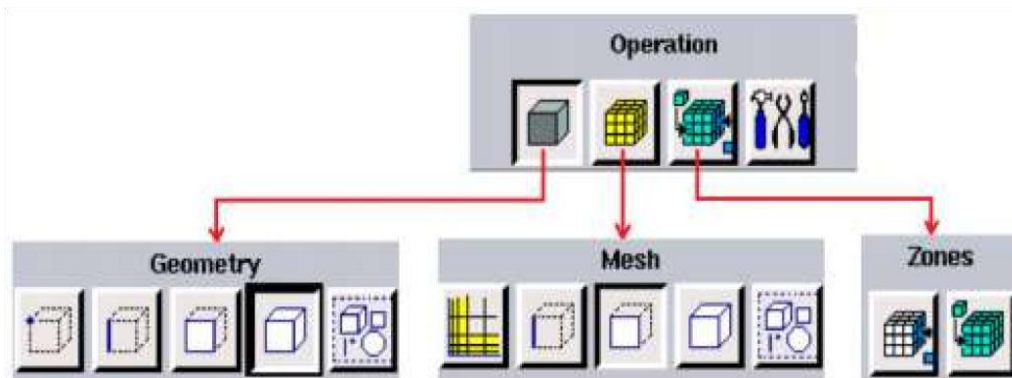
Gambit regroupe trois fonctions principales : définition de la géométrie des problèmes (construction si la géométrie est simple ou bien import de la géométrie CAO), Le maillage et sa vérification, la définition des frontières (Types de conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs. Si la géométrie est conçue par des logiciels de la CAO (SolidWorks, CATIA...), il est conseillé d'importer des fichiers sous format ACIS (*.sat) et il est souvent indispensable de nettoyer la géométrie.

Dans le coin en haut à droite, on retrouve les différentes opérations que l'on peut réaliser sur ce logiciel comme le montre la figure 2-2.

- ❖ La première opération est la **géométrie**. Ce menu permet de créer des volumes, des surfaces, des lignes et des points. On peut également modifier des géométries importées.
- ❖ La seconde opération est le **maillage** de la géométrie. Ce menu permet de mailler des volumes, des surfaces mais aussi discrétiser des lignes.
- ❖ La troisième opération permet de définir les **conditions aux limites** et **domaines fluides**.
- ❖ Le quatrième bouton est un menu d'outil.



FigII.2 En cliquant sur chaque fonctionnalité du Menu générale un Menu secondaire correspondant s'affichera juste en dessous



FigII.3. Menus secondaires de Gambit

II.2.3 Description de la menue géométrie

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

II.2.4 Description du menu maillage

Le menu maillage est composé de cinq boutons comme le montre le tableau ci-dessous.

Commande	Couches limites	Segment	Faces	Volume	Groupe
Symbole					

Tableau II.1 Description des commandes du menu maillage

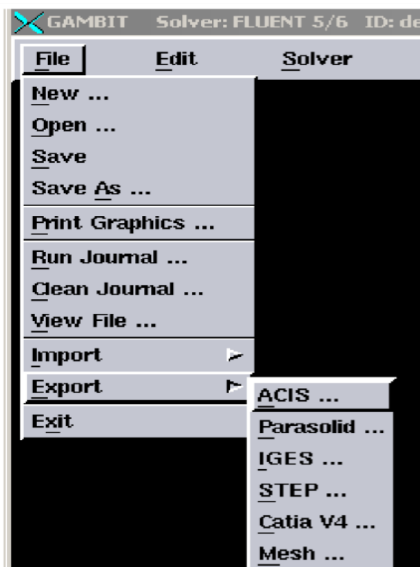
II.2.5 Conditions aux limites et définition de domaines

Plusieurs types de conditions aux limites sont disponibles selon le problème traité. À noter que l'espace maillé est pris par défaut comme étant fluide. Le nom donné à la frontière est

très important car il sera repris sous Fluent, et si les noms ne sont pas clairs on risque de mélanger les limites.

II.2.6 Exportation du maillage de Gambit

Une fois que la géométrie a été créée, que les conditions aux limites ont été définies, il faut exporter le maillage, *.msh pour que Fluent soit capable de le lire et de l'utiliser. On peut ensuite fermer Gambit en sauvegardant la session (si on souhaite la rouvrir) et lancer Fluent.

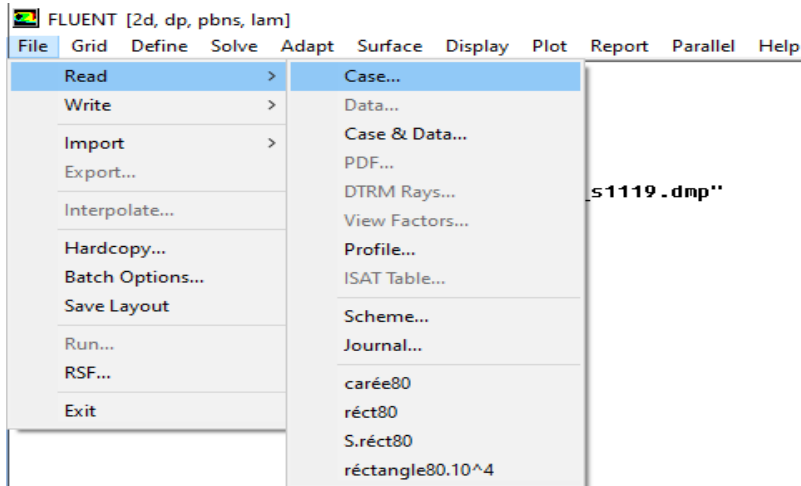


FigII.4. Exportation du maillage de Gambit

II.3 Le logiciel FLUENT [10]

Fluent est un code CFD commercial très utilisé dans l'industrie. Il permet de résoudre les écoulements fluides et le transfert de chaleur pour différents types de problèmes. Il peut par exemple calculer la portance d'une aile d'avion, la traînée d'une voiture, le refroidissement de circuits électroniques par de l'air ventilé...etc.

En démarrant le logiciel Fluent on doit choisir les dimensions du domaine de calcul (2ddp), et la précision que doit utiliser le logiciel, simple précision ou double précision.

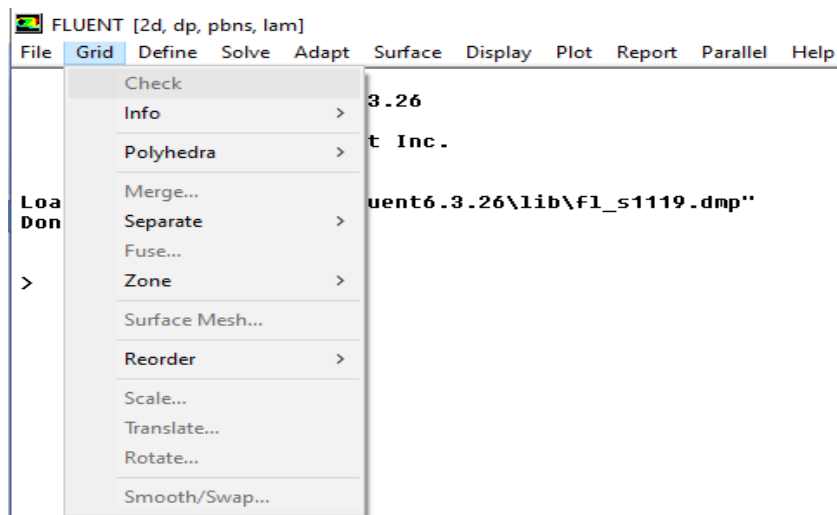


FigII.5 Lisage du maillage : Pour commencer la simulation il faut importer le fichier

II.3.1 Vérification du maillage importé :

Cette étape permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.

Grid Check



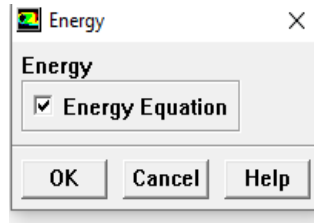
FigII.6. Vérification du maillage sou Fluent

II.3.2 L'équation de l'énergie :

Energy : permet de choisir si oui ou non on doit faire intervenir l'équation de l'énergie dans la résolution du système (dès qu'un gradient de température intervient dans les

phénomènes il faut utiliser cette équation pour d'une part observer une solution réaliste mais aussi souvent pour faciliter la convergence).

Define→**Models**→**Energy** L'instruction énergie doit être activée pour l'étude du champ thermique

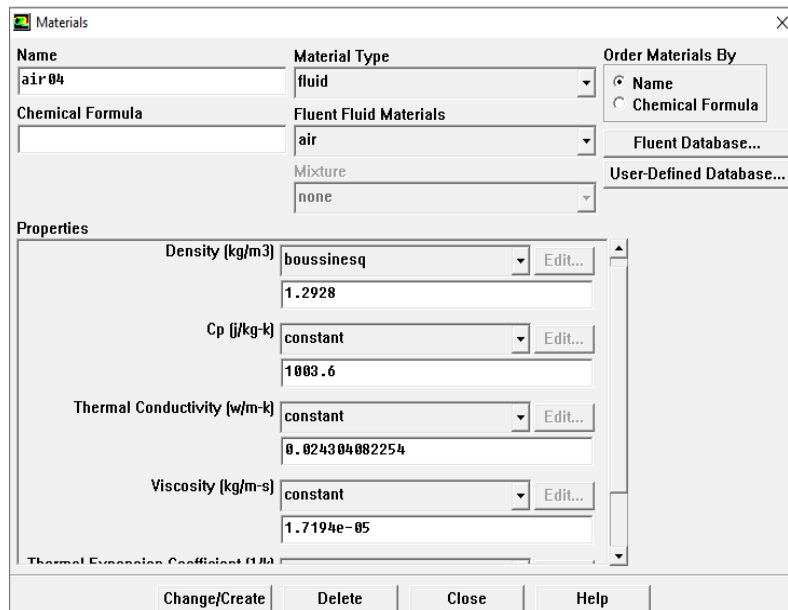


FigII.7 Menu pour introduire l'équation d'énergie

II .3.3 Définition des caractéristiques du fluide :

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent

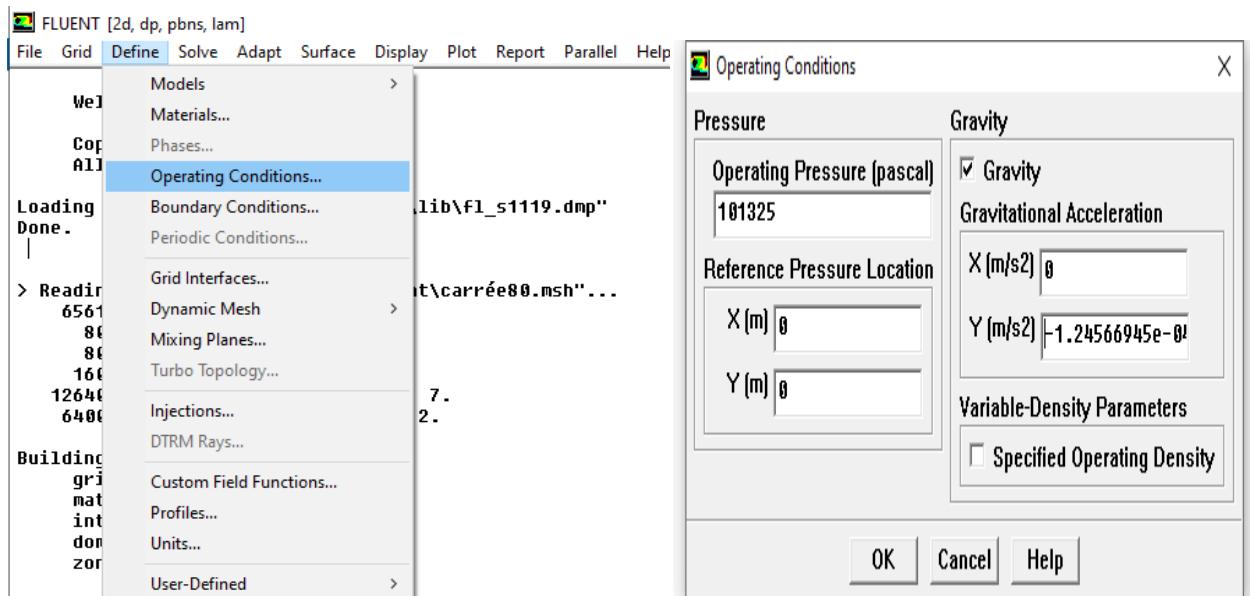
.DEFINE→**Materials**



FigII.8. Définition des caractéristiques du fluide

II.3.4 Introduction de la gravité :

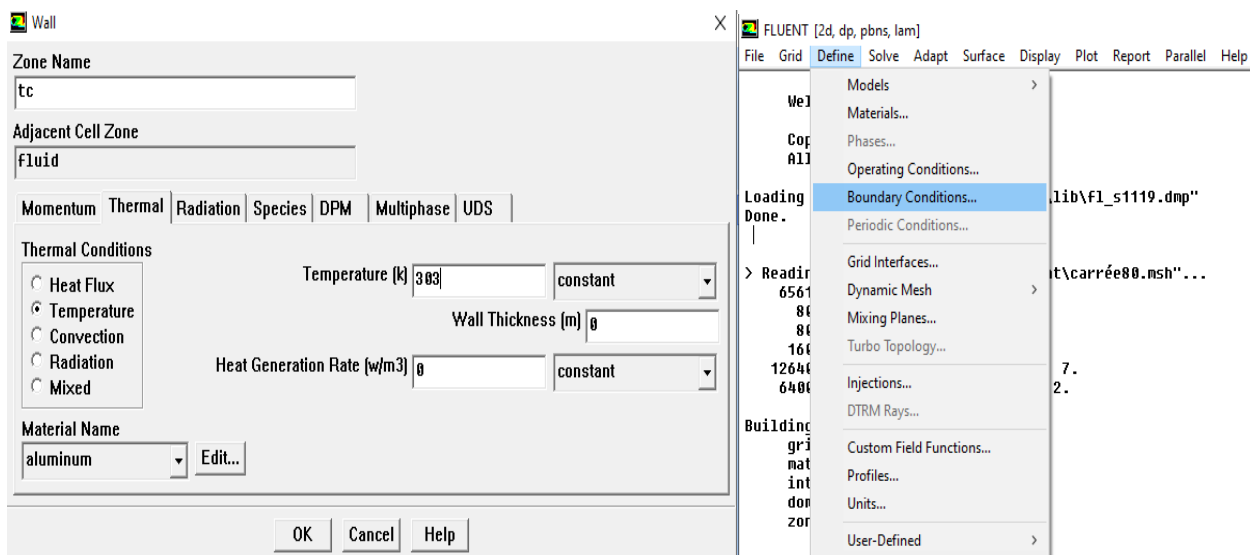
On choisit le fluide Gravity et entrer la valeur voulue de la gravité dans les sous menu operating conditions



FigII.9 : Introduction de la gravité

II.3.5 Conditions aux limites :

Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites

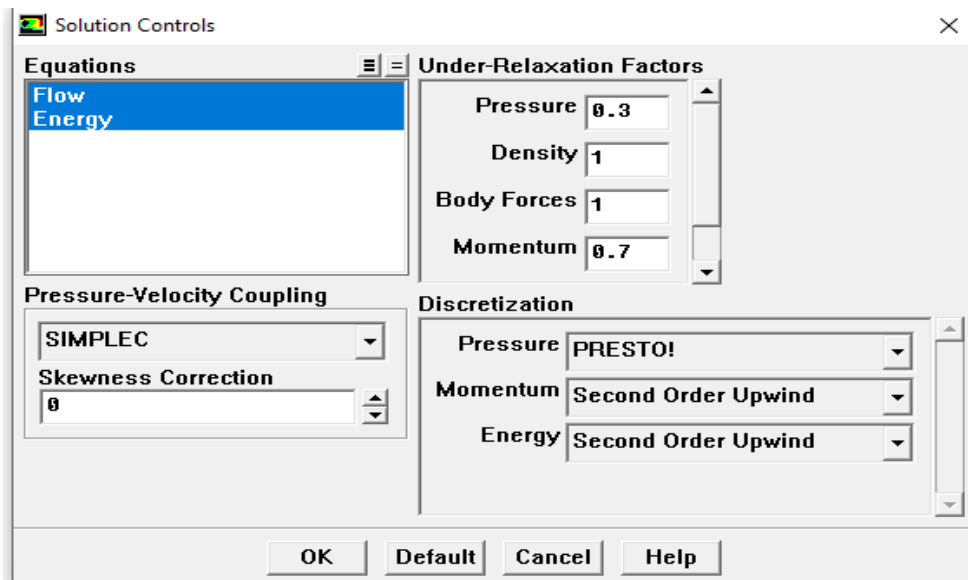


FigII.10 Valeurs des conditions aux limites

- Choix d'ordre des équations et l'algorithme

Ceci permet de spécifier le degré d'ordre des équations à résoudre, ainsi l'algorithme.

Solve → Controls → Solution...

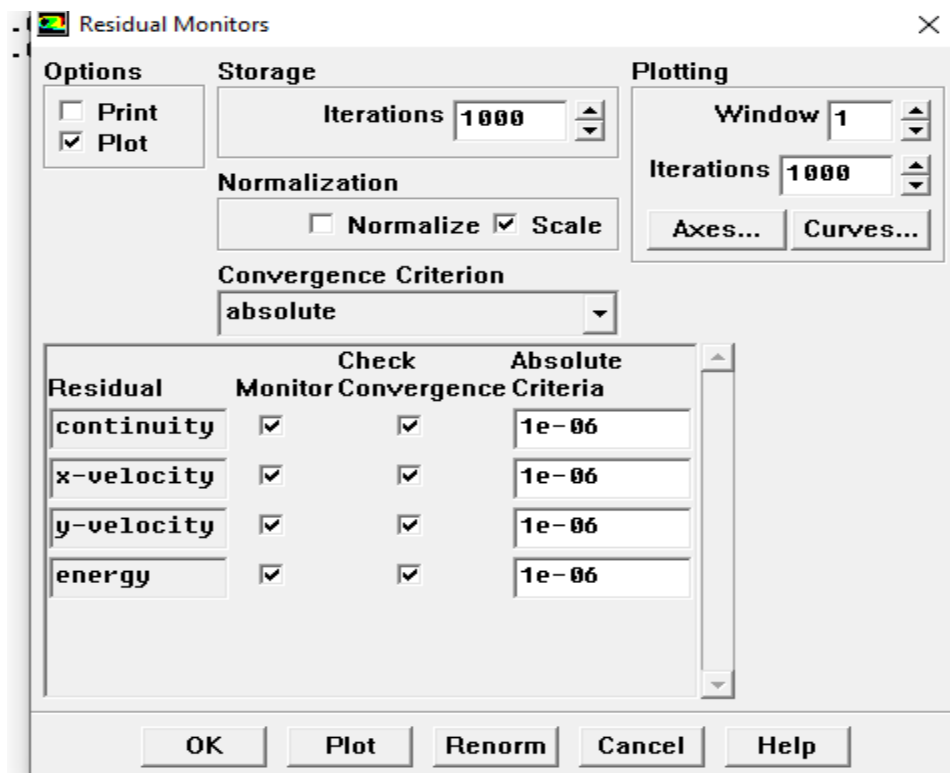


FigII.11 Choix de la méthode de solution des équations et l'algorithme

- Choix des critères de convergence

Choix les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.

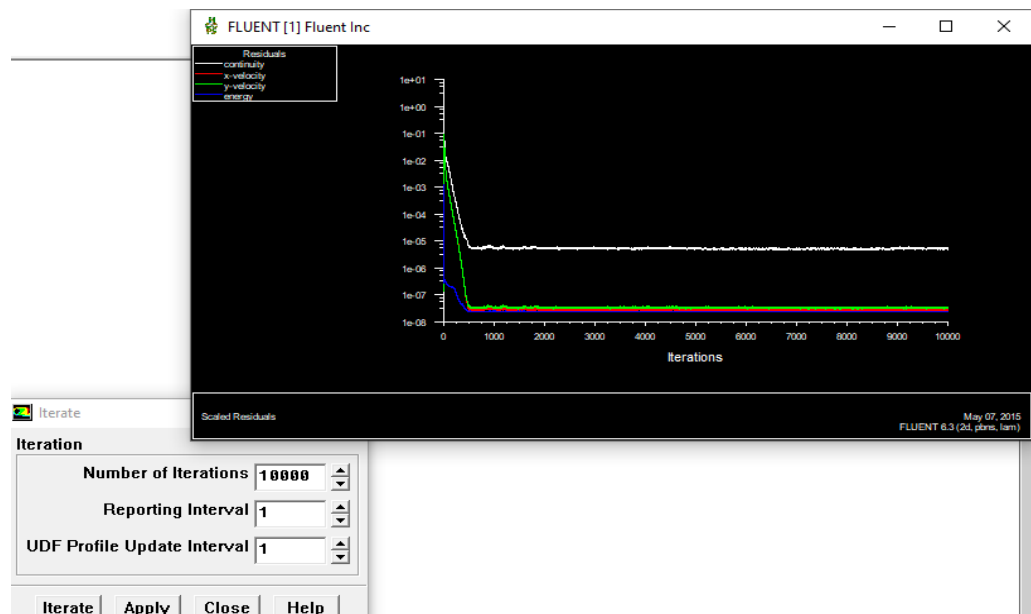
Solve → Monitors → Residual...



FigII.12 : Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence

- Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence

- **Remarque :** Pour afficher la convergence à l'écran pendant les calculs sous forme d'un graphe, il faut activer l'option Plot. Il est possible de désactiver certains critères d'arrêt de la simulation en décochant la case de convergence
- ✓ **Lancement du calcul :** Pour commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations.



FigII.13 : menu de lancement des itérations

IL.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons montré la procédure utilisée avec les deux logiciels notamment, Gambit et fluent.

Le logiciel Fluent est dédié à la résolution des problèmes de mécanique des fluides et de transfert de chaleur, Tandis que le logiciel Gambit est utilisé pour composer graphiquement des problèmes physiques et des grilles de calcul.

Dans le chapitre suivant, nous présentons nos résultats sur la convection naturelle pure pour le cas de la cavité rectangulaire différentiellement chauffée.

Chapitre III

RESULTATS ET DISCUSSION

III-1 Introduction :

Dans la première section de cette partie, les résultats de la validation numérique sont présentés pour le cas classique de la convection naturelle dans une cavité carré fermé et différentiellement chauffée (voir figure 3.1). Les parois verticales sont supposées isothermes et les parois horizontales sont considérées adiabatiques.

La deuxième section est réservée pour l'étude de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire chauffée discrètement par le bas.

III.2 Validation numérique :

III-2-1 Choix de maillage :

La configuration géométrique considérée est le cas classique de la cavité carrée avec les parois horizontales adiabatiques. La paroi de gauche est chaude et celle de droite est froide (voir figure 3.1).

L'étude est effectuée pour les valeurs du nombre de Rayleigh variant de 10^3 et 10^5 , Nombre de Prandtl égale à 0.71. La simulation a été effectuée en utilisant plusieurs maillages notamment (40x40, 60x60, 80x80, 100x100). Le choix de maillage doit être justifié par la convergence et la précision des valeurs du nombre de Nusselt (voir figure 3.2) et temps de calcul, ainsi que la comparaison des profils de vitesse au milieu de la cavité. Suite aux résultats obtenus, le maillage de (80x80) est choisi pour le reste de travail.

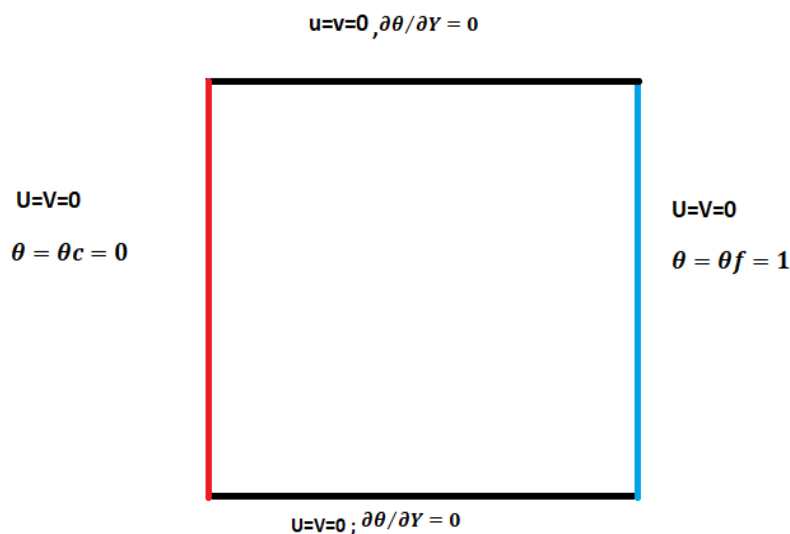
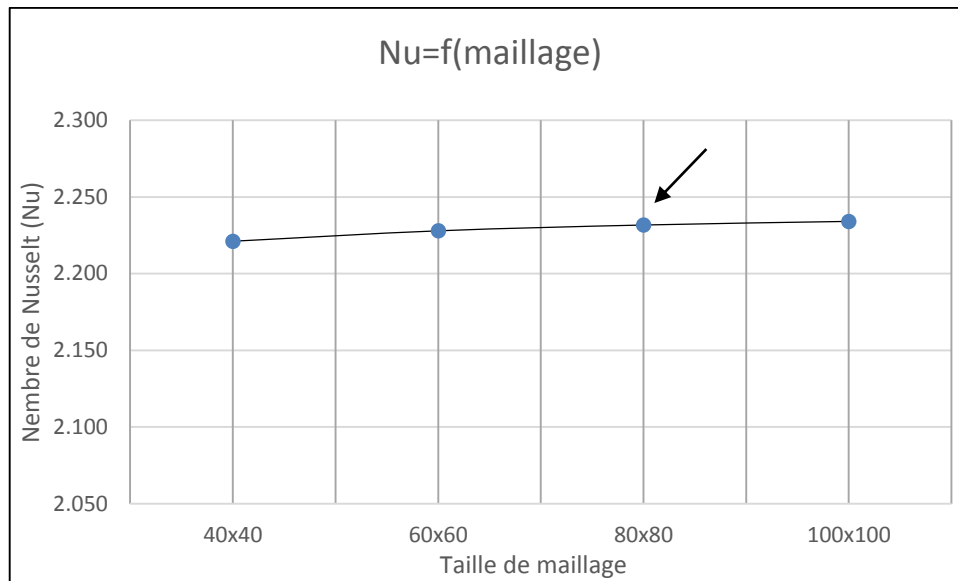


Fig. III.1 Configuration géométrique



FigIII.2 Validation de la taille du maillage $Nu=f(\text{Maillage})$

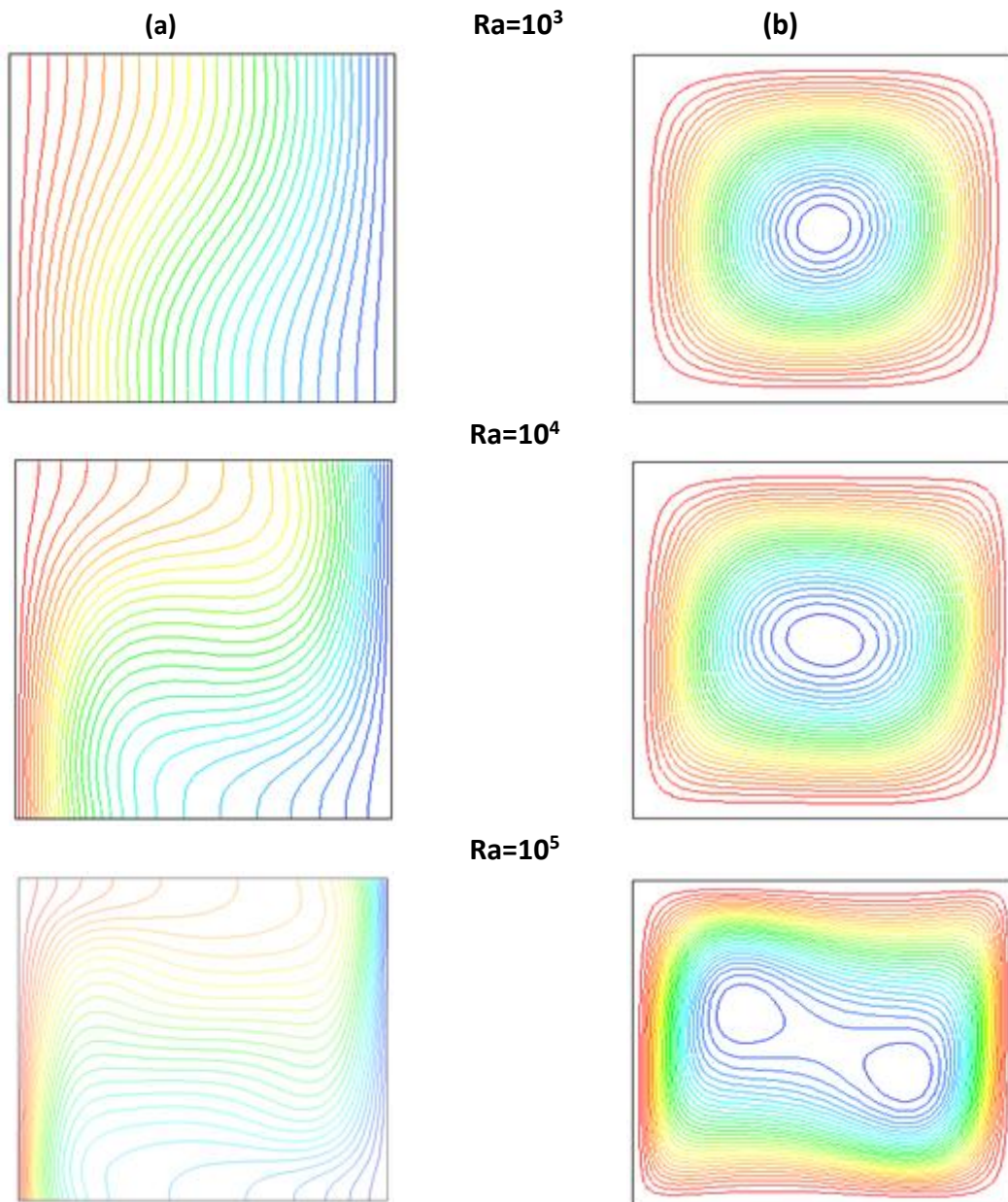
III-2-2 Validation physique :

Les résultats de la simulation ont été aussi validés avec ceux de la littérature notamment les travaux de Val Devis [11], de Bouamoud et Houat avec les deux méthodes numériques méthode : de Boltzmann sur réseau (TLBM) et celle des volumes finis (MVF) ainsi que les travaux Markatos and Perikleous[12]. La comparaison des valeurs du nombre de Nusselt pour le nombre de Raleigh égale 10^3 , 10^4 et 10^5 ont montré un très bon rapprochement entre les valeurs (voir tableau 3.1.1).

Tableau III.1 : Comparaison des valeurs du nombre de Nusselt (Convection naturelle pure)

Ra	Présent Travail	Bouamoud et Houat [5] (TLBM) (MVF)	Markatos and perikleous[12]	De Vahl Davis [11]	
10^3	1.109	1.115	1.116	1.108	1.118
10^4	2.232	2.221	2.242	2.201	2.243
10^5	4.500	4.441	4.515	4.430	4.519

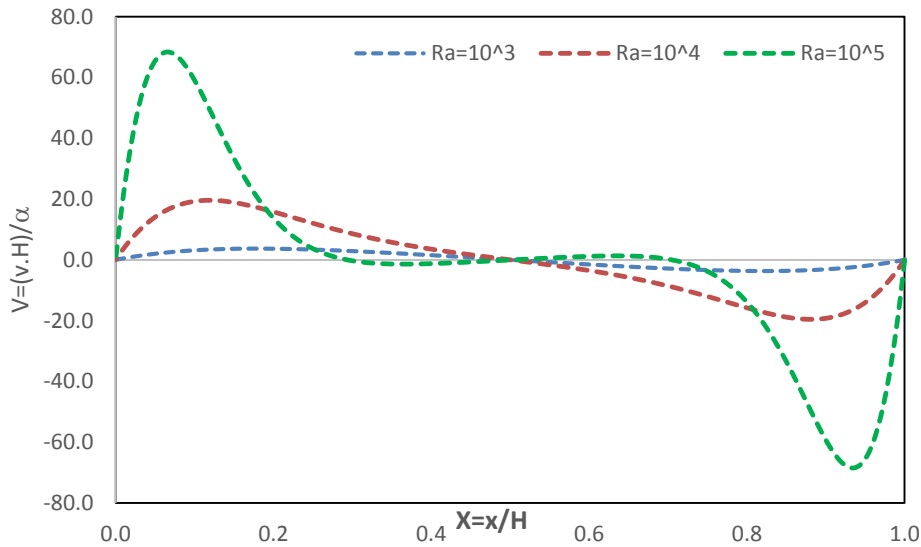
III-2-3 Résultats et discussion physique pour le cas de validation :



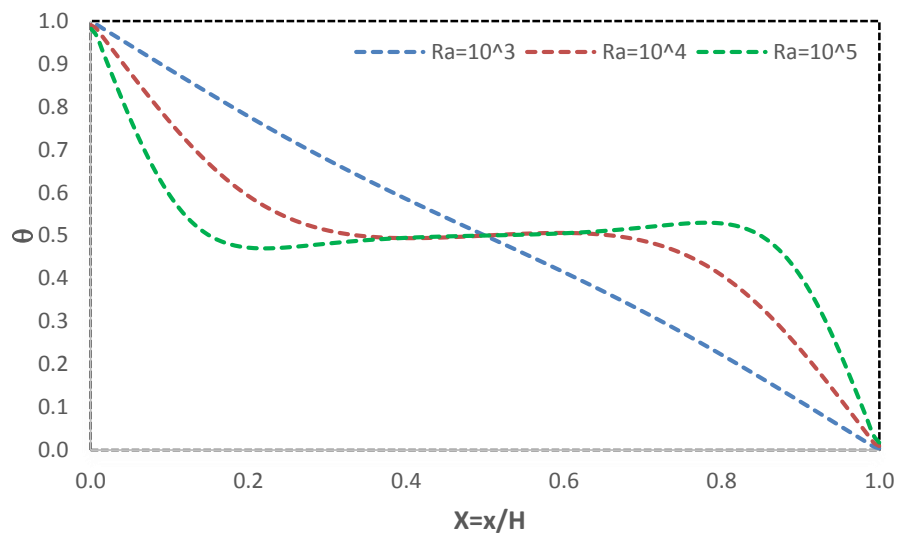
FigIII.3: les isothermes (a) et les lignes de courants (b) en fonction de Ra .

Sur la Figure III.3 à droite, on remarque l'apparition d'un écoulement monocellulaire du fluide dans le sens des aiguilles d'une montre. Cet écoulement est dû au mouvement ascendant des particules du fluide qui s'échauffe le long de la paroi chaude sous l'effet de la poussée d'Archimède et du mouvement descendant des particules du fluide qui se refroidit le long de la paroi froide sous l'effet de la pesanteur. Les valeurs de fonction de courant augmentent avec le nombre de Rayleigh tout en gardant la même forme des cercles dans la cavité. On note aussi que les valeurs dynamiques de l'écoulement notamment les pics des vitesses sur les lignes médianes horizontales et verticales de la cavité augmentent en fonction de la Rayleigh (Figure III.4.) ainsi que le profil de température à l'axe médiane horizontale

(Figure III.5). On note aussi l'évolution du nombre de Nusselt (tableau III.1) avec l'augmentation du nombre de Rayleigh.



FigIII.4 : Profils de vitesse V suivant X à $Y/2$.



FigIII.5: Profils de température θ suivant X à $Y/2$.

III.3 Résultats et discussion pour la cavité rectangulaire chauffée par le bas :

III.3.1 Description de la configuration physique et conditions aux limites :

Il s'agit d'une cavité rectangulaire de rapport géométrique $L/H=2$. Elle est chauffée discrètement par le bas. Les parois verticales sont supposées adiabatiques, la paroi horizontale est froide et la paroi inférieure est chauffée discrètement en deux zones

(voir Fig.III.6). L'enceinte rectangulaire est remplie d'un fluide newtonien et incompressible avec un nombre de Prandtl $Pr=0.71$.

Les hypothèses de travail et les équations sont les mêmes citées dans le chapitre (I.6) et (1.7) et les conditions aux limites sont bien présentées sur la figure I.1.

Le maillage utilisé est choisi en inspirant de la cavité carrée en extrapolant par le facteur de forme géométrique égale à 2. Donc le maillage adopté pour le reste de notre étude sur la cavité est 80×160 avec raffinement sur les interfaces (voir figure III.6).

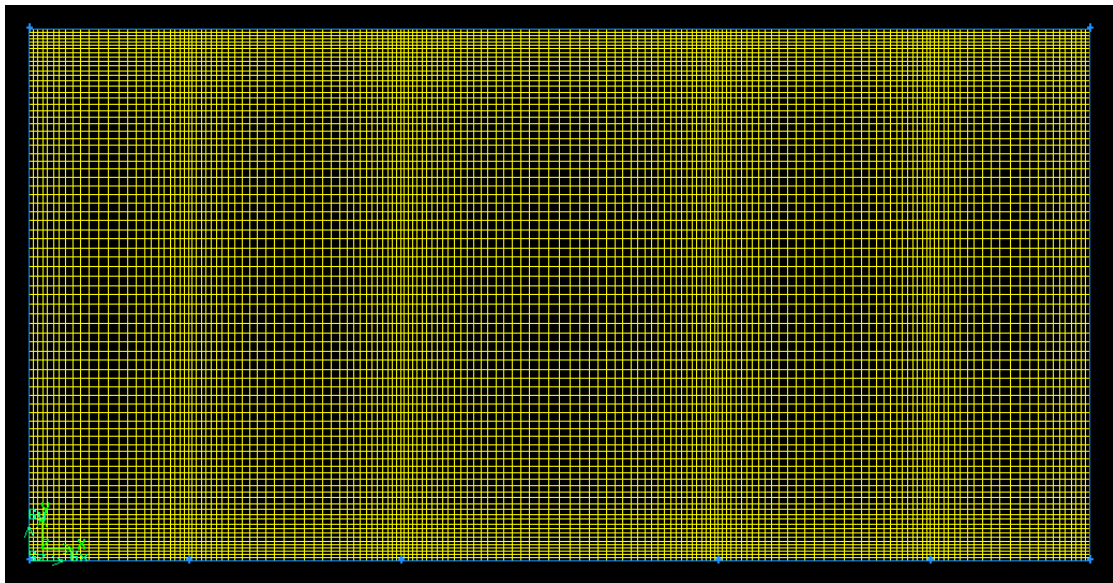


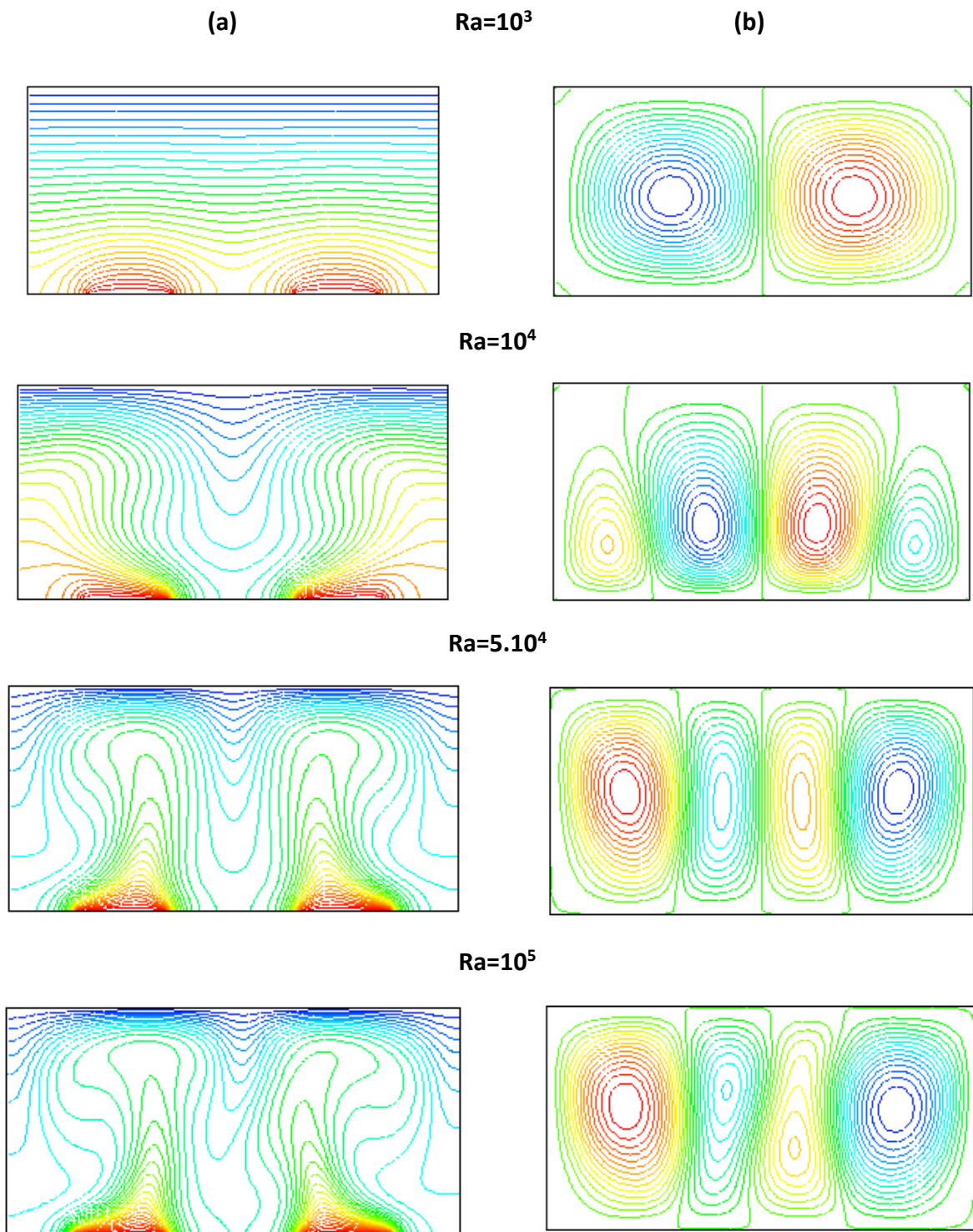
Fig III.6 Maillage adopté pour la cavité rectangulaire ($l/L=40\%$).

III.3.2 Résultats et discussions

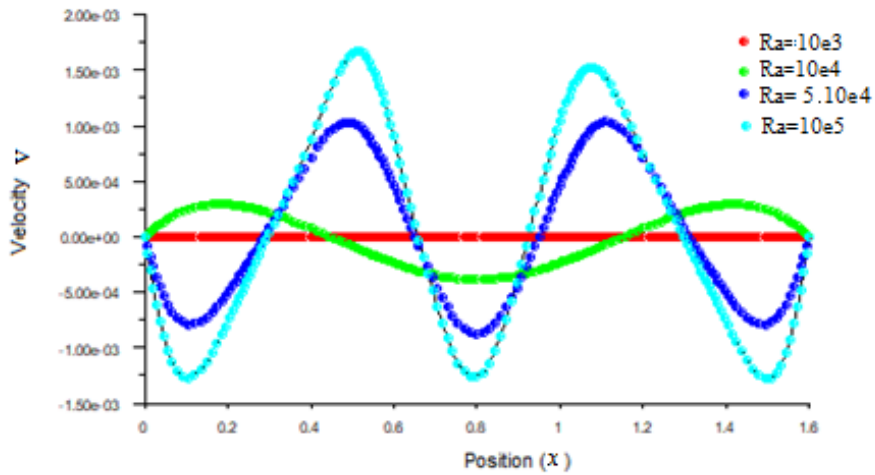
III.3.2.1 Effet de la variation du nombre de Rayleigh

Nous présentons les résultats détaillés de la simulation de la convection naturelle pure en fonction de la variation du nombre de Rayleigh avec les valeurs de 10^3 , 10^4 , $5 \cdot 10^4$ et 10^5 . Le nombre de Prandtl $Pr=0.71$ et la portion de chauffage est fixée 40% de la longueur (L), répartie équitablement sur la cavité (Fig.I.1). La taille du maillage de 160×80 était choisie en se basant sur le facteur de forme du rectangle (voir fig. III.6).

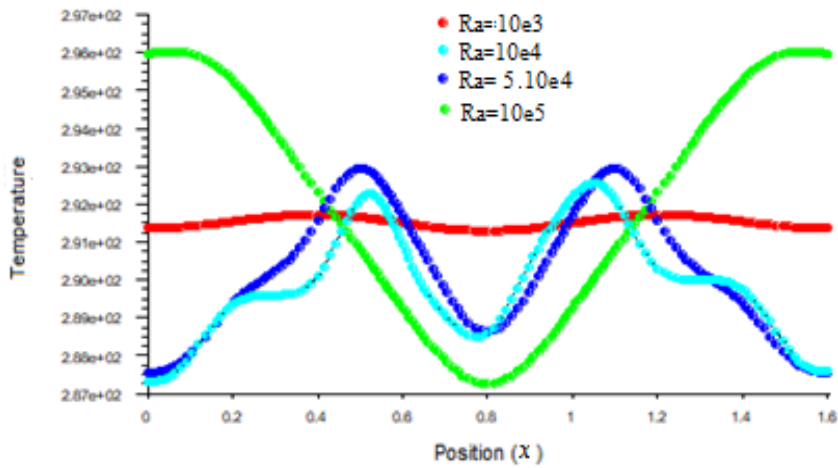
Les résultats sont présentés sous formes des lignes de courant, des isothermes, des profils des vitesses et de température ainsi que l'évolution du nombre de Nusselt et le coefficient de convection.



FigIII.7: les isothermes (a) et les lignes de courants (b) pour (l/L=40%) en fonction Ra



FigIII.8 : Profils de vitesse v suivant la position x à l'axe médiane horizontale



FigIII.9 : Profils de la température suivant la position x à l'axe médiane horizontale

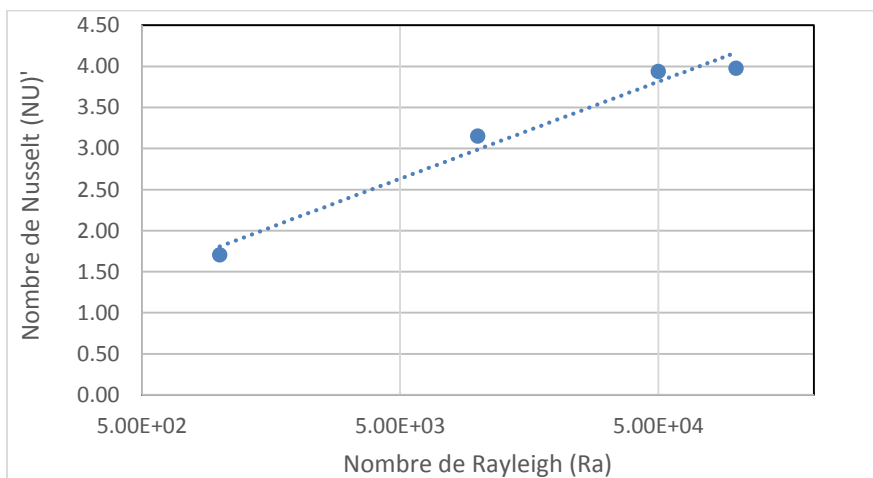


Fig. III.10 : Evolution du Nusselt $Nu = f(Ra)$ pour partition de chauffage 40%

-Les commentaires pour la convection naturelle avec la portion de chauffage 40% :

Dans la (figure III.7 à droite), On remarque que les lignes isothermes désignent deux cellules contre rotatives pour le nombre de Rayleigh $Ra=1000$ et pour les isothermes (figure III.7 à gauche), les lignes situées proche de la paroi horizontale froide sont presque parallèles à celle-ci par contre l'apparition de la convection est éminente près des deux partitions chauffées.

Pour les valeurs plus élevées du nombre de Rayleigh ($Ra \geq 104$), on remarque la formation de quatre cellules contre rotatives (Figure 3.2.4 à droite). Les lignes isothermes (figure III.7 à gauche), on remarque l'apparition de deux panaches thermiques qui se déforment à fur et à mesure au milieu de la cavité, en fonction de l'augmentation du nombre de Rayleigh. Ce qui explique l'apparition de la convection naturelle. Ce transfert thermique par la convection s'intensifie avec l'augmentation du nombre de Rayleigh.

Les figure des profils des vitesse U et de la température à l'axe médiane horizontal de la cavité illustre très bien l'évolution dynamique et thermique de du mouvement du fluide à l'intérieur de l'enceinte. On note aussi l'évolution du nombre de Nusselt avec l'augmentation du nombre de Rayleigh (Fig.III.10).

III.3.2.2 Effet de la variation de la portion de chauffage :

Dans cette section, les résultats présentés sont pour un nombre de Rayleigh fixe ($Ra=10^4$) avec un nombre de Prandtl ($Pr= 0.71$) et une variation de la portion de chauffage de 20%, 40%, 60%, 80% de la longueur (L) du paroi du bas. Ces portions sont réparties équitablement sur cette paroi (Fig.III.6).

Les résultats sont présentés sous formes des lignes de courant et des isothermes, ainsi que l'évolution du nombre de Nusselt.

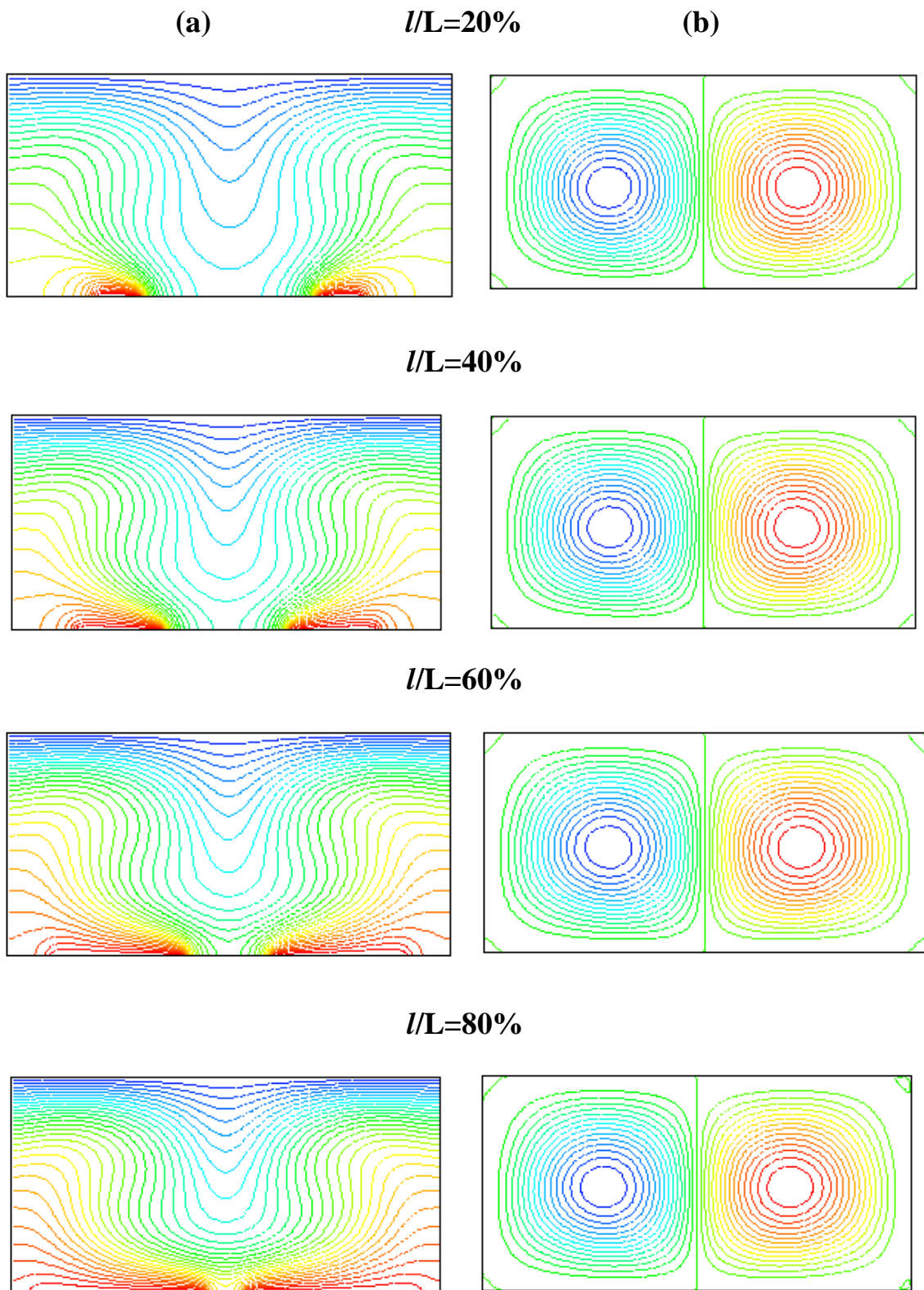


Fig. III.11: les isothermes (a) et les lignes de courants (b) pour différentes portions de chauffage

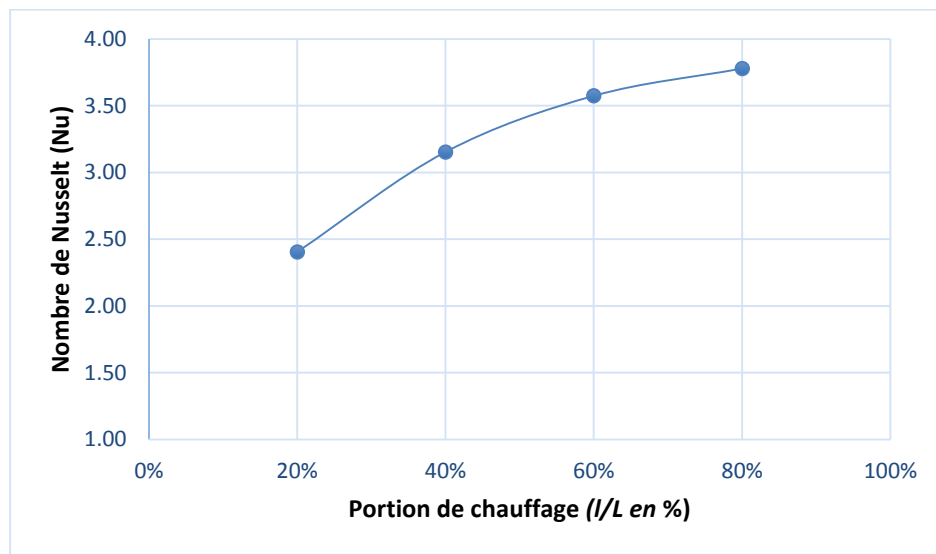


Fig. III.12: Evolution du Nusselt en fonction de la partition de chauffage
 $Nu = f(l/L\%)$ pour $Ra=10^4$

-Les commentaires pour la convection naturelle avec la portion variable :

Dans la (figure III.10 à droite), On remarque que les lignes isothermes désignent deux cellules contre rotatives pour toutes les partitions de chauffage à Rayleigh $Ra=10^4$.et pour les isothermes (figure III.7 à gauche), les lignes situées proche de la paroi se déforment à fur et à mesure au milieu de la cavité, en fonction de l'augmentation de la portion de chauffage. Ce qui explique l'évolution de l'apparition de la convection naturelle en fonction l'augmentation de la portion de chauffage. Ce transfert thermique par la convection est bien illustré par le diagramme de l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh (Fig.III.11).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire a pour but de mieux comprendre les processus de la convection naturelle pure dans une cavité rectangulaire fermée. Les parois horizontales sont différentiellement chauffées : (paroi bas partitionnée chaude et paroi haute est froide). Les deux parois verticales sont considérées adiabatiques.

La résolution du problème était réalisée avec la méthode numérique, basée sur la méthode des volumes finies en utilisant un logiciel commercial « Fluent », et le logiciel de maillage « Gambit ».

La gamme de variation du nombre de Rayleigh pour laquelle nous avons simulé l'écoulement du fluide est de 10^3 à 10^5 pour une partition de 40% de chauffage ensuite une variation de partition de 20% à 80% a été examinée pour un nombre de Rayleigh égale à 10^4 . Ce qui a permis d'illustrer l'influence de la variation de nombre de Rayleigh et la partition chauffée sur les structure dynamique et thermique de la convection naturelle pure, ainsi que l'évaluation du transfert thermique au sein de la cavité.

Les résultats de l'étude ont montré que : Dans le cas de la convection naturelle pure, l'augmentation du nombre de Rayleigh augmente l'effet de la convection, notamment augmentation des échanges de chaleur et une accélération de fluide à l'intérieur de la cavité et la partition chauffée a une importance dans l'évaluation de ces échanges thermiques.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] Sacadura J.F., Barrand J.P., Initiation aux transferts thermiques, édition Lavoisier, Paris (2015).
- [2] JANNOT Y., Transferts thermiques, cours Ecole des Mines Nancy, Edition Livre (2012).
- [3] Sadouk H. Simulation numérique des échanges thermiques par convection naturelle dans des cavités fermées. Mémoire de Master en génie mécanique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (2011)
- [4] Zouiri F. et *al.* Convection naturelle au sein d'une cavité carrée munie d'une source chauffante placée sur sa paroi inférieure. 23^{ème} Congrès Français de Mécanique Lille, Septembre (2017).
- [5] Bouamoud B. et Houat S., Etude de la convection naturelle dans une cavité carrée partiellement chauffée par la méthode de Boltzmann sur réseau. XII^{ème} Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, Sherbrooke-Québec, Canada (2015).
- [6] Zarrit R., Seghir Boumaza M., Kherrou S., Dadda B., Simulation numérique de la convection naturelle 2d dans les cavités rectangulaires fermées. Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables. Ghardaïa (2016).
- [7] Fellouh A., Ouled Dahmane N., Analyse du couplage convection rayonnement dans une cavité. Mémoire de Master, département de génie mécanique, université de Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem (2020).
- [8] Azzi A., Présentation de la méthode des volumes finis. Cours www.abbesazzi.com/wp-content/uploads/2014/10/MN-I-ver01-par.
- [9] Gambit 2.2 Tutorial Guide, site : <https://wp.kntu.ac.ir/mojra/CFD-gambit22tutorial.pdf>
- [10] ANSYS FLUENT Tutorial Guide, site : <https://www.ansys.com>
- [11] DE Vahl Davis G, Natural convection of air in a square cavity: a benchmark numerical solution, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 3, (1983) 249
- [12] Markatos, N.C. and Pericleous, K. Laminar and Turbulent Natural Convection in an Enclosed Cavity. International Journal of Heat and Mass Transfer, 27(1984) 755-77.