

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**  
Faculté du Génie de la Construction  
Département de Génie Mécanique

## Diplôme de Fin D'étude

En vue de l'obtention du diplôme de  
Master LMD en Génie Mécanique  
Option : Energétique



---

Titre :

Etude par simulation numérique de la convection naturelle  
dans les cavités fermées. Application à la brique de construction

---

**Présenté par :**  
**MOUSSOUSSE Djamel**

**Proposé par :**  
**Mme. DJEFEL. D**  
**Mr. MAKHLOUF. S**

Soutenue : 02-11-2022

## **Remerciements**

**Je remercie tout d'abord ALLAH de m'avoir accordé la force et la volonté pour accomplir ce travail.**

**Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mes encadreurs Mr. MAKHLOUF. S et Mme. DJEFEL. D pour l'intérêt porté à notre travail, leurs disponibilités, leurs conseils précieux et surtout leur grande patience.**

**Je souhaite témoigner toute ma reconnaissance aux enseignants ayant contribué et participé à notre formation.**

**Je présente mes respects et mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.**

**Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.**

## Dédicaces

Je dédie ce mémoire

À mes très chers parents

À mes frères et mes sœurs

À toute ma famille

À tous mes amis

Djamel

# Table des matières

❖ Introduction générale.....	01
❖ <u>Chapitre I : Transfert Thermique.</u>	
1. La conduction .....	03
2. Le rayonnement .....	04
3. La convection .....	04
3.1. La convection naturelle .....	06
3.2. Les nombres sans dimension .....	07
3.2.1. Nombre de Reynolds .....	07
3.2.2. Nombre de Prandtl .....	07
3.2.3. Nombre de Grashof .....	07
3.2.4. Nombre de Rayleigh .....	07
3.2.5. Nombre de Nusselt .....	08
3.3. Les facteurs qui caractérisent le transfert de chaleur par convection .....	08
3.3.1. La nature du mouvement .....	09
3.3.2. Le régime de l'écoulement .....	09
3.3.3. Les propriétés physiques du fluide .....	09
3.3.4. La forme et les dimensions de la surface d'échange thermique .....	09
3.4. Régimes d'écoulement .....	09
3.5. Régimes thermiques .....	10
3.5.1. Régime permanent .....	10
3.5.2. Régime périodique établi .....	10
3.5.3. Régime transitoire .....	10
3.5.4. Régime variable .....	10
3.6. Convection dans les cavités .....	11
3.6.1. Cavité avec gradient de température vertical .....	11

3.6.1.1. Seuil de convection .....	12
3.6.1.2. Déplacement d'une goutte de fluide .....	12
3.6.1.3. Traînée visqueuse et diffusion de la chaleur .....	13
3.6.2. Cavité avec gradient de température horizontal .....	14

❖ Chapitre II : Formulation Mathématique et Simulation Numérique.

2.1. Les équations gouvernantes.....	15
2.1.1. Equation de continuité.....	15
2.1.2. Equation de quantité de mouvement.....	15
2.1.3. Equation de conservation d'énergie .....	15
2.2. Configuration de la cavité.....	16
2.2.1. Les hypothèses .....	16
2.2.2. Approximation de Boussinesq.....	17
2.3. Les équations du problème.....	17
2.3.1. Equation de continuité.....	17
2.3.2. Equation de quantité de mouvement.....	17
2.3.3. Equation de l'énergie .....	18
2.4. Conditions aux limites.....	18
2.5. Code de calcul et simulation numérique .....	19
2.5.1. Maillage .....	19
2.5.1.1. Types de maillage .....	19
a-Maillage structuré.....	19
b-Maillage non structuré .....	19
c-Maillage hybride (mixte) .....	19
2.5.1.2. Qualité du maillage .....	21
2.5.2. Le mailleur Gambit.....	21
2.5.2.1. Les différentes étapes d'utilisation de Gambit .....	21

a. Une zone graphique.....	22
b. Une fenêtre de contrôle global .....	22
c. Fenêtre d'outils d'opération .....	23
c1. Construction de la géométrie.....	23
c.2. Génération de maillage .....	25
c.3. Conditions aux limites et définition du domaine .....	27
c.4. Outils .....	27
d. Fenêtre des descriptions .....	28
e. fenêtre (Transcript) .....	28
f. Fenêtre de la liste des commandes.....	28
2.5.2.2. Exportation du maillage .....	28
2.5.2.3. Procédure de modélisation de la géométrie sous Gambit.....	28
2.5.3. Méthode des volumes finis.....	29
2.5.4. Le solveur Fluent.....	29
2.5.4.1. Les différentes étapes d'utilisation de Fluent .....	30
2.5.4.2. Traitement des résultats .....	37

❖ **Chapitre III : Résultats de la Simulation sous Fluent et Discussion.**

3.1. Représentation de différentes configurations .....	41
3.1.1. La brique standard .....	41
3.1.2. La brique pleine.....	41
3.1.3. La brique à trois types de cavités.....	42
3.1.4. La brique à cavités triangulaires .....	43
3.1.5. La brique à cavités rectangulaires (1 <sup>er</sup> type).....	43
3.1.6. La brique à cavités rectangulaires (2 <sup>ème</sup> type) .....	44

<b>3.2. Conditions de simulation .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3. Maillage .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3.1. Choix du maillage.....</b>	<b>45</b>
<b>3.3.2. Vérification du maillage.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.3. Indépendance de la solution du maillage .....</b>	<b>46</b>
<b>a. La brique standard.....</b>	<b>47</b>
<b>b. La brique pleine .....</b>	<b>48</b>
<b>c. La brique à trois types de cavités .....</b>	<b>49</b>
<b>d. La brique à cavités triangulaires .....</b>	<b>50</b>
<b>e. La brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type).....</b>	<b>51</b>
<b>f. La brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type) .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4. Résultats du calcul numérique .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.1. La brique standard.....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.2. La brique pleine.....</b>	<b>57</b>
<b>3.4.3. La brique à trois types de cavités.....</b>	<b>58</b>
<b>3.4.4. La brique à cavités triangulaires .....</b>	<b>61</b>
<b>3.4.5. La brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type).....</b>	<b>66</b>
<b>3.4.6. La brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type) .....</b>	<b>68</b>
<b>3.5. Comparaison entre les briques.....</b>	<b>70</b>
<b>3.6. Avantages et inconvénients des différentes configurations .....</b>	<b>70</b>
<b>❖ Conclusion générale .....</b>	<b>72</b>
<b>❖ Références bibliographiques.</b>	

## Nomenclature

**g** : Accélération de la pesanteur, [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

**T** : Température, [K]

**T<sub>0</sub>** : Température de référence, [K]

**$\Delta T$**  : Différence de Température,  $\Delta T = T_C - T_F$

**T<sub>p</sub>** : Température de la paroi, [K]

**T<sub>f</sub>** : Température du fluide loin de la paroi [K]

**T<sub>C</sub>** : Température de la paroi chaude, [K]

**T<sub>F</sub>** : Température de la paroi froide, [K]

**$\rho$**  : Masse volumique, [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

**$\rho_0$**  : Masse volumique de référence, [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

**t** : Temps, [s]

**S** : Surface d'échange thermique, [ $\text{m}^2$ ]

**C<sub>p</sub>** : Chaleur spécifique, [ $\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

**k** : Conductivité thermique, [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

**h** : Coefficient d'échange convectif, [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

**H** : Hauteur, [mm]

**L** : Largeur, [mm]

**l** : Longueur de la brique, [mm]

**e** : Epaisseur, [mm]

**x, y** : Coordonnées cartésiennes d'espace dimensionnelles, [m]

**V** : Vecteur de vitesse, [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

**u** : Composante de la vitesse suivant la direction x, [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

**v** : Composante de la vitesse suivant la direction y, [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

**P** : Pression, [Pa]

**R<sub>Th</sub>** : La résistance thermique, [ $^{\circ}\text{C}/\text{Watts}$ ]

**m** : La masse, [Kg]

**V<sub>me</sub>** : Le volume, [ $\text{m}^3$ ]

**Φ** : Le flux de chaleur échangé, [W]

**v** : Viscosité cinématique, [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

**μ** : Viscosité dynamique, [ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

**α** : Diffusivité thermique, [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

**β** : Coefficient d'expansion volumique, [ $\text{K}^{-1}$ ]

**Nombres adimensionnels :**

**R<sub>e</sub>** : Nombre de Reynolds

**Pr** : Nombre de Prandtl

**G<sub>r</sub>** : Nombre de Grashof

**R<sub>a</sub>** : Nombre de Rayleigh

**N<sub>u</sub>** : Nombre de Nusselt

## Liste des figures

**Figure I.1** : Combinaison des trois modes de transfert de chaleur [4]

**Figure I.2** : Transfert thermique par convection entre la paroi chaude et le fluide froid

**Figure I.3** : Comportement d'une particule fluide de masse volumique  $\rho_p$  et de température  $T_p$  déplacée dans une région de masse volumique  $\rho_f$  et de température  $T_f$

**Figure I.4** : Développement de l'écoulement d'un fluide sur une plaque plane, trois régimes d'écoulement sont visibles : laminaire, transitoire, et turbulent

**Figure I.5** : Schéma représentant la configuration de la convection de Rayleigh-Bénard

**Figure I.6** : Schéma représentant les rouleaux de la convection de Rayleigh- Bénard

**Figure I.7** : Schéma représentant la poussée d'Archimède

**Figure I.8** : Schéma représentant la force de traînée visqueuse

**Figure I.9** : Schéma représentant la diffusion thermique

**Figure I.10** : Schéma de la convection dans une cavité avec gradient horizontal de température

**Figure II.1** : Schéma d'une cavité avec un gradient de température horizontal

**Figure II.2** : Les conditions aux limites

**Figure II.3**: Maillage structuré et non structuré [15]

**Figure II.4** : Interface générale

**Figure II.5** : Menu contrôle global

**Figure II.6.a**: Menu point

**Figure II.6.b**: Menu segment

**Figure II.7.a** : Menu face

**Figure II.7.b** : Menu volume

**Figure II.8** : Menu groupe

**Figure II.9** : Menu couches limites

**Figure II.10.a** : Maillage des segments

**Figure II.10.b** : Maillage des surfaces

**Figure II.11.a** : Menu maillage des volumes

**Figure II.11.b**: Menu maillage des groupes

**Figure II.12**: Définition des frontières et des domaines fluides et solides

**Figure II.13** : Barre d'outils

**Figure II.14** : Fenêtre des descriptions

**Figure II.15** : Fenêtre (Transcript), Fenêtre de la liste des commandes

**Figure II.16** : Volume de contrôle bidimensionnel

**Figure II.17** : Type de résolution

**Figure II.18** : Interface de Fluent

**Figure II.19** : Vérification de l'unité

**Figure II.20** : Choix du solveur

**Figure II.21** : Affichage de la grille

**Figure II.22** : Etablir l'équation de l'énergie

**Figure II.23** : Différentes modélisations de l'écoulement

**Figure II.24** : Définition des propriétés de l'air

**Figure II.25** : Définition des propriétés de la brique utilisée

**Figure II.26** : Définition des conditions opératoires

**Figure II.27** : Définir la condition à la limite de la paroi gauche (chaude)

**Figure II.28** : Définir la condition à la limite de la paroi droite (froide)

**Figure II.29** : Définition de l'unité

**Figure II.30** : Les paramètres de sous-relaxation

**Figure II.31** : Initialisation de la solution

**Figure II.32** : Affichage des critères de convergence

**Figure II.33** : Lancement des itérations

**Figure II.34** : Evolution des résidus de calcul

**Figure II.35** : Evolution de différentes variables

**Figure II.36** : Affichage des vecteurs de vitesse

**Figure II.37** : Création des lignes/plans

**Figure II.38** : Affichage des courbes sur des lignes créées

**Figure II.39** : Définir les valeurs de référence

**Figure II.40** : Affichage de la fenêtre Flux Reports

**Figure II.41** : Affichage de la fenêtre Volume Integrals

**Figure III.1** : Représentation de la brique standard

**Figure III.2** : Représentation de la brique pleine

**Figure III.3** : Représentation de la brique à trois types de cavités

**Figure III.4** : Représentation de la brique à cavités triangulaires

**Figure III.5** : Représentation de la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)

**Figure III.6** : Représentation de la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

**Figure III.7** : Vérification du maillage

**Figure III.8** : Grille étirée,  $60 \times 56$  (grille interne)

**Figure III.9** : Grille uniforme,  $40 \times 20$

**Figure III.10** : Grille étirée,  $20 \times 7$ ,  $14 \times 9$ ,  $10 \times 9$  (grilles internes)

**Figure III.11** : Grille étirée,  $40 \times 31$ ,  $31 \times 23 \times 20$  (grilles internes)

**Figure III.12 :** Grille étirée,  $30 \times 17$  (grille interne)

**Figure III.13 :** Grille étirée,  $30 \times 15$ ,  $15 \times 15$  (grilles internes)

**Figure III.14 :** Evolution de la température dans la brique standard

**Figure III.15 :** Répartition des isothermes dans la brique standard

**Figure III.16 :** Affichage des vecteurs de vitesse dans les cavités de la brique standard

**Figure III.17 :** Evolution des lignes de courant dans les cavités de la brique standard

**Figure III.18 :** Evolution de la température à  $Y = 29.125$  mm (Droite (A))

**Figure III.19 :** Evolution de la vitesse à  $Y = 29.125$  mm

**Figure III.20 :** Evolution de la température dans la brique pleine

**Figure III.21 :** Répartition des isothermes dans la brique pleine

**Figure III.22 :** Evolution de la température dans la brique pleine

**Figure III.23 :** Evolution de la température dans la brique à trois types de cavités

**Figure III.24 :** Répartition des isothermes dans la brique à trois types de cavités

**Figure III.25 :** Evolution des lignes de courant dans la brique à trois types de cavités

**Figure III.26 :** Evolution de la température à  $Y = 47.02$  mm (Droite (A))

**Figure III.27 :** Evolution de la température à  $Y = 15.06$  mm (Droite (B))

**Figure III.28 :** Evolution de la température dans la brique à cavités triangulaires

**Figure III.29 :** Répartition des isothermes dans la brique à cavités triangulaires

**Figure III.30 :** Evolution des lignes de courant dans la brique à cavités triangulaires

**Figure III.31 :** Evolution de la température dans les cavités triangulaires

**Figure III.32 :** Evolution de la vitesse dans les cavités triangulaires

**Figure III.33 :** Evolution de la température à  $Y = 17.94$  mm (Droite (B))

**Figure III.34 :** Evolution de la température dans la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)

**Figure III.35 :** Représentation des isothermes

**Figure III.36 :** Evolution des lignes de courant dans la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)

**Figure III.37 :** Evolution de la température à  $Y = 29.125$  mm (Droite (A))

**Figure III.38 :** Evolution de la température dans la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

**Figure III.39 :** Répartition des isothermes dans la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

**Figure III.40 :** Evolution des lignes de courant dans la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

**Figure III.41 :** Evolution de la température pour la droite (A) et la droite (B)

## Liste des tableaux

**Tableau II.1** : Les conditions aux limites appliquées

**Tableau II.2** : Schéma des éléments face [17]

**Tableau II.3**: Les différents types de maillage [17]

**Tableau II.4**: Types de maillage des éléments face [17]

**Tableau II.5** : Variation de la qualité de maillage en fonction de la valeur du coefficient de distorsion  $F_d$  [17]

**Tableau III.1** : Dimensions de la brique standard

**Tableau III.2** : Dimensions de la brique pleine

**Tableau III.3** : Dimensions de la brique à trois types de cavités

**Tableau III.4** : Dimensions de la brique à cavités triangulaires

**Tableau III.5** : Dimensions de la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)

**Tableau III.6** : Dimensions de la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

**Tableau III.7** : Propriétés de l'air à la pression atmosphérique [18]

**Tableau III.8** : Propriétés de l'air à  $T_{moy} = 303.15K$

**Tableau III.9** : Propriétés de la brique utilisée [19]

**Tableau III.10** : Valeurs de flux de chaleur traversant la brique standard en utilisant une grille uniforme

**Tableau III.11** : Valeurs de flux de chaleur traversant la brique standard en utilisant une grille étirée

**Tableau III.12** : Valeurs de flux de chaleur traversant la brique pleine

**Tableau III.13** : Valeurs de flux de chaleur traversant la brique à trois types de cavités

**Tableau III.14** : Valeurs de flux de chaleur traversant la brique à cavités triangulaires

**Tableau III.15** : Valeurs de flux de chaleur traversant la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)

**Tableau III.16** : Valeurs de flux de chaleur traversant la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

**Tableau III.17** : Les résistances thermiques et les masses de différents types de la brique de construction

**Tableau III.18** : Avantages et inconvénients de différentes configurations

# **Introduction Générale**

La tendance à réduire la consommation d'énergie et à la maîtriser est l'un des principaux défis auxquels notre société est confrontée, en particulier le logement et les transports. Ils constituent les deux projets les plus énergivores dans de nombreux pays et interpellent l'étude de solutions alternatives aux ressources actuelles. La maîtrise de la consommation d'énergie et le développement d'autres ressources sont nécessaires, notamment les énergies dites renouvelables, qui se sont fortement développées dans les pays riches comme dans les pays pauvres ces dernières années. Cependant, la puissance fournie par ces sources est trop faible pour assurer une consommation d'énergie adéquate. Dans le domaine de l'habitat durable, par exemple, assurer l'autonomie énergétique des bâtiments en énergie renouvelable coûte encore très cher. Il est donc urgent d'optimiser notre consommation d'énergie afin de préserver nos ressources naturelles et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Le logement représente environ la moitié de notre consommation d'énergie. Dans cette zone, l'utilisation principale de l'énergie est destinée au confort, à savoir le chauffage en hiver et la climatisation en été. Les constructeurs ont toujours cherché les moyens d'obtenir le confort thermique. Le confort thermique est couramment obtenu à l'aide d'équipements électriques tels que les climatiseurs. La consommation d'énergie dépend alors de plusieurs facteurs. L'un des facteurs les plus importants est le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment. Dans ce contexte, les performances thermiques du bâtiment peuvent être augmentées lorsque la transmission thermique des murs est réduite. En résumé, on peut affirmer que, normalement, un bâtiment bien isolé a une performance thermique élevée.

Il existe plusieurs façons de concevoir un bâtiment bien isolé en tenant compte de la composition des murs. Par exemple, certains types de murs peuvent être construits à l'aide d'éléments structuraux, tels que des blocs de béton et un matériau isolant spécifique. Dans ce cas, une transmission thermique plus faible du bloc peut réduire le coût associé à l'utilisation de l'isolant.

De nombreuses études ont montré que différentes configurations de cavités à l'intérieur des blocs creux peuvent jouer un grand rôle dans la transmission des flux thermiques. D'une manière générale, on peut affirmer que différentes géométries des cavités à l'intérieur des blocs creux peuvent avoir une influence sur la transmission thermique des briques, en raison des interactions entre les phénomènes de conduction, convection et rayonnement thermique provoqués par la géométrie creuse. Ainsi, cette étude a pour objectif de trouver la configuration de la cavité pour une brique creuse qui favorise la transmission thermique la plus faible et de vérifier l'influence de la convection naturelle comme mode de transfert de chaleur dans ce processus.

Afin de proposer d'autres formes de cavités qui nous permettent de ralentir le processus de la convection naturelle dans la brique nous devons faire une étude de transfert de chaleur dans une brique qui est soumise à un gradient horizontal de température et pour des cavités de différentes formes (carré, triangulaire...) en utilisant le code de calcul Fluent.

Depuis quelques années un nouvel outil de simulation a fait son apparition : l'ordinateur et la simulation numérique. Le principe de base est la représentation du

phénomène réel à étudier par une équation. En utilisant des hypothèses simplificatrices une étude plus réelle des phénomènes physiques observés est possible.

Dans le premier chapitre, des généralités sur le transfert thermique et des notions fondamentales relatives à la convection naturelle dans les cavités ont été présentées.

Le deuxième chapitre est divisé en deux parties :

La première partie du chapitre traite le modèle mathématique contenant les équations qui régissent le phénomène de la convection naturelle.

La deuxième partie porte sur la présentation du logiciel Gambit sur lequel la géométrie du problème considéré a été présentée ainsi que la description du code de calcul Fluent avec lequel se fait la résolution des équations aux dérivées partielles. On a détaillé aussi les étapes effectuées pour cette simulation.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation et la discussion des différents résultats obtenus lors de la simulation numérique.

**CHAPITRE I**  
**GENERALITES : Transfert Thermique**

Dans l'étude des transferts thermiques on distingue trois modes de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. Le premier phénomène, la conduction, a lieu dans les solides ou les fluides au repos [1]. La convection se rencontre spécialement dans les fluides, elle traduit le transfert de chaleur d'un point à un autre à l'intérieur d'un fluide (gaz ou liquide) par déplacement des particules de ce fluide [2]. L'apport de chaleur par rayonnement peut avoir lieu dans tous les milieux transparents aux ondes électromagnétiques. En réalité la distribution de la température, dans un milieu, est la conséquence des effets de ces trois modes de transfert thermique ; il est impossible d'isoler un mode de transfert thermique d'un autre mode. Pourtant, dans le cas où l'un de ces trois modes est déterminant, les effets des autres sont peu importants ; aussi ils peuvent être négligés, simplifiant considérablement l'analyse du cas concerné [1, 3].

Une grandeur souvent utilisée dans l'étude du transfert thermique est la densité du flux thermique qui représente la chaleur traversant l'unité de surface et par unité de temps [1]. La figure I.1 englobe les trois modes de transfert de chaleur [4].

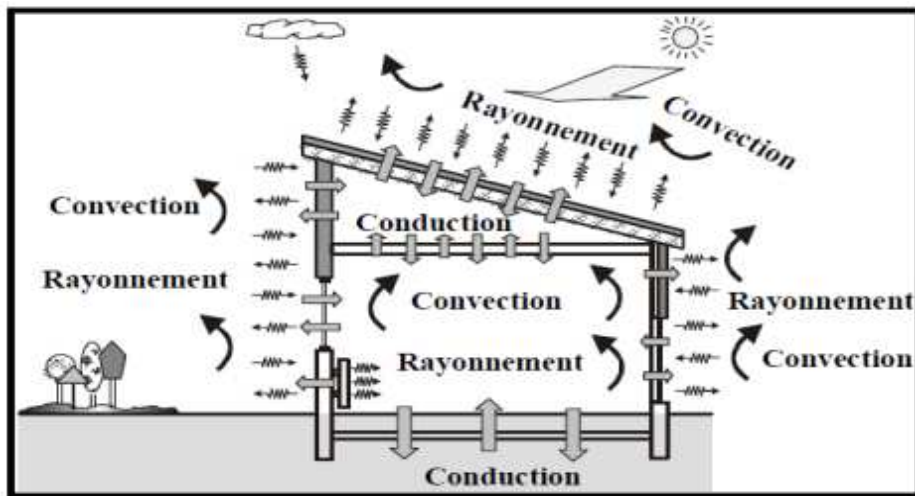


Figure I.1 : Combinaison des trois modes de transfert de chaleur

## 1. La conduction :

La conduction thermique résulte de « chocs » à l'échelle moléculaire et atomique. Elle va donc être liée à la structure et à l'organisation du matériau. Elle peut avoir lieu dans les solides et dans une moindre mesure dans les fluides, plus dans les liquides que dans les gaz. C'est un phénomène ; de transport de la chaleur ; très analogue à la conduction de l'électricité. Il s'agit d'un transfert d'énergie à petite échelle, dans un corps localement au repos. Nous parlons de conducteur et d'isolant de la chaleur. Elle est décrite par la loi de Fourier (1807). Elle peut aussi

être définie, par une simple explication, comme un phénomène par lequel l'énergie est transférée des zones à haute température vers des zones à basse température [1-5].

Dans n'importe quel milieu, ce mode de transfert thermique tend à uniformiser la répartition d'énergie cinétique des particules constituant dans la masse du corps. Des exemples typiques pour la conduction sont : le transfert de chaleur par des parois de bâtiments, des conduites qui transportent des différents agents chauds ou froids, etc. [3]

## 2. Le rayonnement :

C'est une transmission d'énergie à distance, entre deux corps séparés ou non (sans aucun contact entre eux), par un milieu matériel (transformation d'énergie thermique d'un émetteur en énergie électromagnétique, propagation, transformation partielle en énergie thermique sur un corps récepteur). C'est le cas de l'énergie qui nous vient du soleil. L'interprétation physique est la suivante : tout corps, ayant une température supérieure à  $T = 0$  K, émet des particules désignées par "photons" ; ceux-ci se déplacent à la vitesse de la lumière et transportent une énergie fonction de leur "longueur d'onde". [2, 3, 6]

Plusieurs exemples de rayonnement peuvent être cités, dont : le rayonnement solaire, le rayonnement d'un radiateur infrarouge, d'un filament d'une lampe à incandescence, le rayonnement de l'arc électrique, le chauffage des pièces métalliques dans des fours pour les soumettre à un traitement thermique, etc. [1, 3].

## 3. La convection :

Le phénomène de convection se réfère au transfert thermique qui a lieu dans les fluides liquides ou gaz- en mouvement. La convection est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide- liquide ou gaz- entre des zones ayant des températures différentes ; ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides, qui changent de l'énergie (chaleur) et de la quantité de mouvement (impulse) entre elles. Ayant toujours lieu dans un milieu fluide (Figure. I.2. [1]), elle a comme caractéristique de base le fait que le transfert de chaleur est intimement lié par le mouvement de ce milieu (d'ailleurs son nom vient du verbe latin *convehere* qui signifie *porté avec soi*) [3]. Il convient de distinguer la convection forcée (mouvement créé par une différence de pressions) dans laquelle le fluide est mis en mouvement par un apport d'énergie mécanique extérieure (pompe, une soufflerie, ventilateur, ...) de la convection naturelle (libre) dans laquelle le fluide prend, en son sein, l'énergie nécessaire au mouvement (variation de masse volumique associée à une variation de température par exemple ; si le fluide est isotherme, il

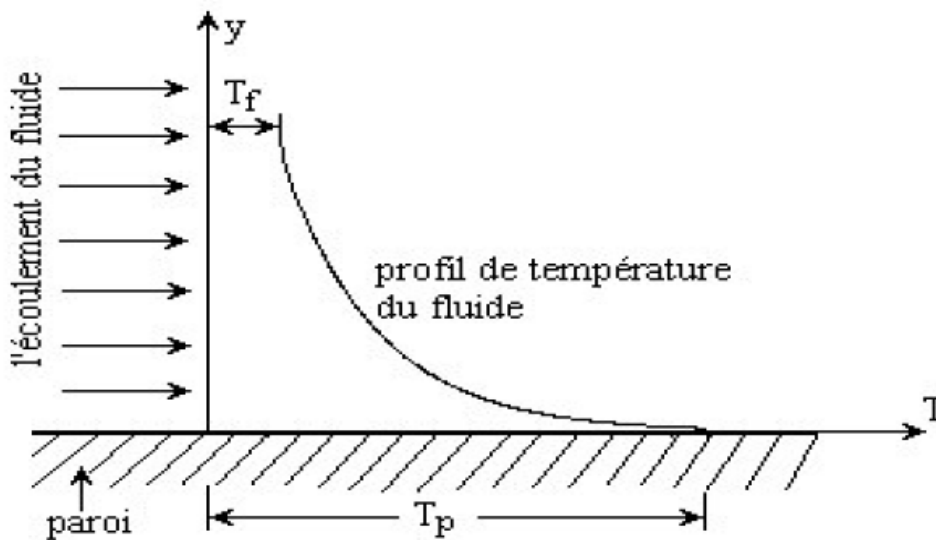
n'y a pas de mouvement). De façon macroscopique, elle est décrite par la loi de refroidissement de Newton (1701) [1, 5] :

$$\Phi = h.S ( T_p - T_f ) \quad (\text{I.1})$$

En considérant l'écoulement présenté dans la figure I.2, cette loi peut être expliquée comme suit : un fluide possédant une vitesse  $u_f$  et une température  $T_f$ , passe sur la surface d'un milieu solide de forme arbitraire et de surface  $S$ . la surface du milieu est à une température  $T_p$  et les deux températures  $T_p$  et  $T_f$  sont différentes.

Cette différence provoque le transfert de chaleur entre le solide et le fluide. Où les paramètres de cette expression représentent respectivement :

$\Phi$  : le flux de chaleur échangé, exprimé en **Watt (W)** ;  $S$  : la surface d'échange thermique ( $m^2$ ) ;  $T_p$  sa température,  $T_f$  celle du fluide exprimé en (K), et  $h$  : le coefficient d'échange convectif ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ). [5]



**Figure I.2 :** Transfert thermique par convection entre la paroi chaude et le fluide froid

Un des exemples les plus connus de la convection forcée est le sèche-cheveux dans lequel l'air ambiant est soufflé par un ventilateur au travers d'une résistance chauffante électrique. Plusieurs exemples peuvent être cités sur la convection naturelle dont le plus simple est celui des auteurs Ampofo et Karayiannis [7].

En résumé, les trois mécanismes de transfert de la chaleur sont :

**La conduction :** transfert dans la masse.

**Le rayonnement :** transfert à distance d'autant plus important que la température est élevée.

**La convection :** transfert par transport. [8]

### 3.1. La convection naturelle :

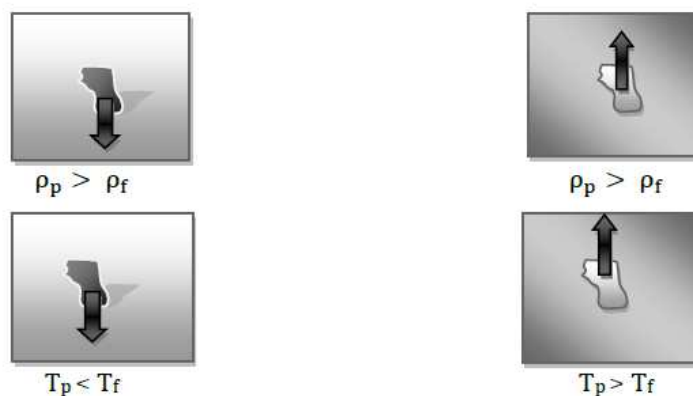
Le phénomène de convection naturelle (ou libre) a pour origine les variations de la masse volumique au sein d'un fluide, liées aux variations de sa température. Donc, la mise en mouvement du fluide n'est pas due à une cause extérieure, mais à la distribution de la température à l'intérieur même du fluide.

Considérons le cas de la convection naturelle (ou thermoconvection). Soit une particule fluide (plus généralement un objet) immergé dans un fluide, comme le montre la figure I.3 nous appelons  $T_f$  la température caractéristique du bain de fluide et  $T_p$  celle de la particule fluide. Le mouvement de thermoconvection prend naissance dès lors que la particule de fluide de température  $T_p$  est supérieure à  $T_f$  (respectivement inférieure) à une masse volumique inférieure (supérieure) à celle du fluide à la température  $T_f$ . Elle est soumise à une poussée d'Archimède, qui la met en mouvement (figure I.3). Cette force est analogue à une force de rappel qui tend à faire revenir la particule dans une région de même température que celle de la particule. La convection naturelle résulte donc de variations de masse volumique avec la température. C'est pourquoi les vitesses de convection naturelle sont en général modérées, par rapport à celles que l'on rencontre en convection forcée.

Les équations de base qui régissent les phénomènes de la convection naturelle sont identiques à celles régissant le phénomène de la convection forcée.

La grande différence provient du fait que, en convection naturelle, les phénomènes hydrodynamiques et thermiques sont couplés par la masse volumique variable.

Ils ne peuvent être étudiés séparément comme dans le cas de la convection forcée, ce qui rend le problème généralement plus complexe. [3]



**Figure I.3 :** Comportement d'une particule fluide de masse volumique  $\rho_p$  et de température  $T_p$  déplacée dans une région de masse volumique  $\rho_f$  et de température  $T_f$

### 3.2. Les nombres sans dimension :

#### 3.2.1. Nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds est proportionnel au rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Il peut être exprimé comme :

$$\frac{f\alpha}{f\mu} = \frac{\text{force d'inertie}}{\text{force de viscosité}} = \frac{\rho.L^2.V^2}{\mu.L.V} = \frac{\rho.L.V}{\mu} = R_e \quad (\text{I.2})$$

Où :

V : La vitesse moyenne [m/s].

L : La longueur caractéristique [m].

Le nombre de Reynolds permet de quantifier les écoulements laminaires et turbulents. Les écoulements à nombre de Reynolds élevé sont généralement turbulents, alors que les écoulements où les forces d'inertie sont faibles par rapport aux forces visqueuses sont plus souvent laminaires.

#### 3.2.2. Nombre de Prandtl :

Le nombre de Prandtl est proportionnel au rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement et la diffusivité thermique. Il caractérise l'importance relative des effets, thermiques et visqueux.

Il peut être exprimé comme :

$$P_r = \frac{\mu.C_p}{k} \quad (\text{I.3})$$

#### 3.2.3. Nombre de Grashof :

Le nombre de Grashof est proportionnel au rapport entre les forces de gravité par les forces visqueuses. Il peut être exprimé comme :

$$\frac{F_g}{F_\mu} = \frac{\text{force de gravité}}{\text{force visqueuses}} = \frac{g.\beta.\Delta T.\rho^2.L^3}{\mu^2} = Gr \quad (\text{I.4})$$

Où :

g : L'accélération de la pesanteur [m.s<sup>-2</sup>].

ΔT : La différence de température [°C].

#### 3.2.4. Nombre de Rayleigh :

Le nombre de Rayleigh est proportionnel entre l'importance relative de la poussée d'Archimède et le produit de la trainée visqueuse par le taux de diffusion thermique.

Il peut être exprimé comme [9-10] :

$$R_a = \frac{g \cdot \beta}{\nu \cdot \alpha} (T_P - T_F) L^3 = Gr \cdot Pr \quad (I.5)$$

Où :

$T_P$  : La température de la paroi [°C].

$T_F$  : La température du fluide loin de la paroi [°C].

$\nu$  : La viscosité cinématique  $\nu = \mu/\rho$  [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>].

$\alpha$  : La diffusivité thermique  $\alpha = k/\rho c$  [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>].

### 3.2.5. Nombre de Nusselt :

En convection, le phénomène de transfert de chaleur à la surface est évalué et caractérisé par le nombre adimensionnel qu'est le nombre de Nusselt. Il désigne le rapport entre les quantités de chaleur échangées par convection et par la conduction pure. Cette grandeur situe donc l'importance du flux thermique échangé par convection à la paroi du flux équivalent transmis par seule conduction (en l'absence tout mouvement du fluide), sous l'effet de même écart de température [11]. Le nombre de Nusselt ( $N_u$ ) est un rapport de la convection à la conduction pure.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Flux convectif} = h \cdot \Delta T \\ \text{Flux conductif} = k \cdot \Delta T / L \end{array} \right. \quad \frac{\text{Flux convectif}}{\text{Flux conductif}} = \frac{h \cdot \Delta T}{k \cdot \Delta T / L} = \frac{h \cdot L}{k} = N_u \quad (I.6)$$

Où :

$h$  : Le coefficient de transfert par convection [W /m<sup>2</sup> .K].

Par conséquent, le nombre de Nusselt représente le perfectionnement du transfert de chaleur dans la couche de fluide comme étant le rapport des deux phénomènes. Si la valeur de  $N_u$  est grande cela veut dire que la convection est dominante. Si  $N_u = 1$ , cela veut dire que le transfert de chaleur se fait par conduction pure [11].

### 3.3. Les facteurs qui caractérisent le transfert de chaleur par convection :

Le transfert de chaleur par convection est caractérisé par quatre catégories de facteurs :

- ❖ La nature du mouvement.
- ❖ Le régime d'écoulement.
- ❖ Les propriétés physiques du fluide.
- ❖ La forme et les dimensions de la surface d'échange thermique.

### 3.3.1. La nature du mouvement :

Si le mouvement du fluide est causé par des différences de densité ou de température (convection libre) ou sous l'influence d'une action mécanique externe (convection forcée). L'indication qualitative de l'effet du mouvement naturel du fluide sur la convection est le rapport  $Gr/Re^2$  où Gr et Re sont des nombres de Grashof, Reynolds, respectivement :

Si  $G_r \gg R_e^2$ , le mouvement forcé peut être ignoré.

Si  $G_r = R_e^2$ , les deux mouvements doivent être considérés.

Si  $G_r \ll R_e^2$ , on peut ignorer le mouvement naturel.

### 3.3.2. Le régime de l'écoulement :

En fonction du critère de Reynolds on observe les processus de transfert suivants :

Convection en régime laminaire, quand  $R_e = ] 0 - 2300[$ .

Convection en régime transitoire, quand  $R_e = ] 2300 - 10000[$ .

Convection en régime turbulent, quand  $R_e > 10\ 000$ .

### 3.3.3. Les propriétés physiques du fluide :

Le transfert de chaleur convectif est affecté entre autres par la conductivité thermique, la diffusivité thermique  $\alpha$ , la chaleur spécifique Cp, la densité et la viscosité dynamique, les propriétés de chaque fluide dépendant de la température et dans une moindre mesure de la pression.

### 3.3.4. La forme et les dimensions de la surface d'échange thermique :

La géométrie de la surface d'échange (plane, cylindrique...) et son orientation par rapport au sens d'écoulement influent sur les propriétés de la couche limite et créent des conditions d'écoulement et de transfert de chaleur particulières. [2]

### 3.4. Régimes d'écoulement :

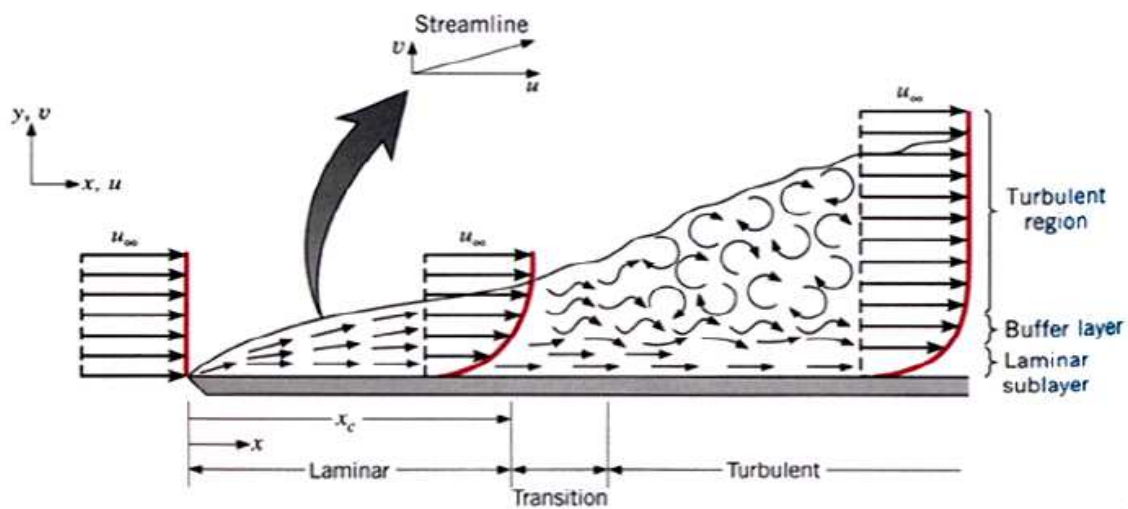
La vitesse à laquelle le fluide entre en contact avec la paroi peut être plus ou moins importante, deux types de flux doivent être distingués :

- L'écoulement laminaire, où le fluide s'écoule le long de la paroi en filets qui restent parallèles. Cela se produit lorsque la vitesse du fluide est faible et que l'échange de température entre les fils ne peut se faire que par conduction car il n'y a pas de mélange de substances.
- L'écoulement turbulent pour lequel la vitesse moyenne du fluide est beaucoup plus importante.

Il y a un véritable mélange des molécules de fluide. Or, la zone en contact avec la paroi les molécules ralentissent et ont des vitesses beaucoup plus faibles, c'est la couche limite dont l'épaisseur est peu connue, et on peut supposer que cette zone est laminaire. Dans cette couche limite, l'échange de chaleur se produit par conduction. Etant donné que le coefficient de conductivité des gaz est très faible, la résistance thermique de la couche limite est très grande.

Dans ce cas, il y existe donc une variation de température importante.

Dans le cas de la convection forcée, l'échange thermique dépend plus de la vitesse imposée au fluide que de la différence de température. [6]



**Figure I.4 :** Développement de l'écoulement d'un fluide sur une plaque plane, trois régimes d'écoulement sont visibles : laminaire, transitoire, et turbulent

### 3.5. Régimes thermiques :

#### 3.5.1. Régime permanent :

La température en tout point du milieu (système) est indépendante du temps.

#### 3.5.2. Régime périodique établi :

La température en tout point oscille périodiquement, indépendamment de la température initiale.

#### 3.5.3. Régime transitoire :

Cela correspond à l'évolution du système de l'état initial à l'état final, qui est provoquée par le changement de la source à l'instant initial ; le champ de température  $T(M, t)$  dépend du champ de température initial  $T(M, 0)$  et du temps.

#### 3.5.4. Régime variable :

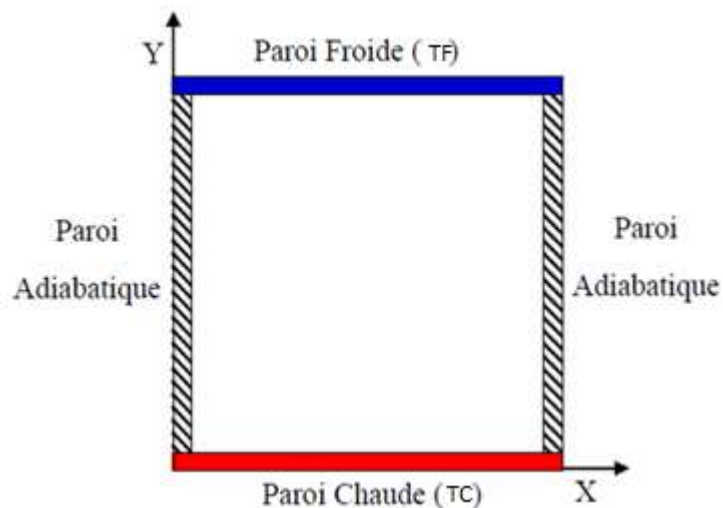
C'est le cas où la source est en évolution continue, le champ de température  $T(M, t)$  dépend des valeurs instantanées des sources et des évolutions antérieures. [12]

### 3.6. Convection dans les cavités :

Les cavités rectangulaires restent la géométrie la plus intéressante. Dans ce type de cavité, les deux parois sont généralement maintenues à des températures différentes, tandis que les autres parois sont isolées. Il existe deux configurations principales, la première est une enceinte qui contient le fluide et est soumise à un gradient de température vertical (convection de Rayleigh-Bénard), et la seconde est une cavité à gradient de température horizontal.

#### 3.6.1. Cavité avec gradient de température vertical :

Lorsqu'on applique un gradient de température vertical du bas vers le haut de la cavité, on obtient ce qu'on appelle la convection de Rayleigh-Bénard (Figure I.5).

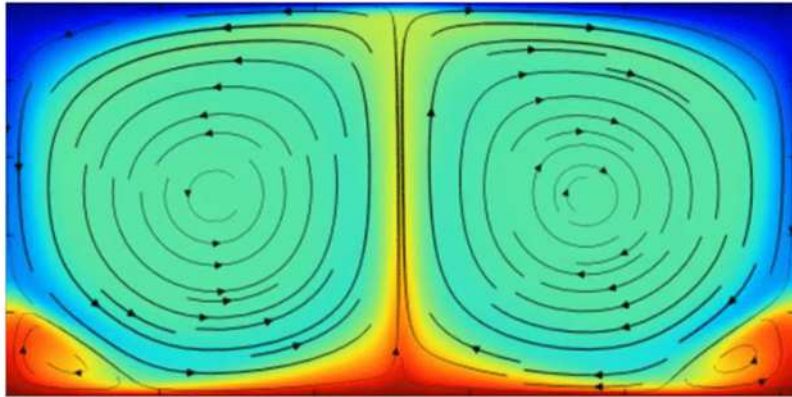


**Figure I.5** : Schéma représentant la configuration de la convection de Rayleigh Bénard

Le mécanisme de base de cette convection est le suivant : Les parois horizontales de la cavité sont chauffées et refroidies, respectivement, et en raison de la différence de température, la chaleur circule entre le fluide et l'objet et fait changer la densité de la couche de fluide près de la surface. La différence de densité crée un flux descendant pour les fluides plus lourds et un flux ascendant pour les fluides plus légers.

Au-delà d'une valeur critique de l'écart de température appliqué, des rouleaux contra-rotatifs, d'axes horizontaux apparaissent au sein du fluide (Figure. I.6).

Il y a donc un seuil de convection au-delà duquel le transfert de chaleur se fait par convection.



**Figure I.6 :** Schéma représentant les rouleaux de la convection de Rayleigh- Bénard

### 3.6.1.1. Seuil de convection :

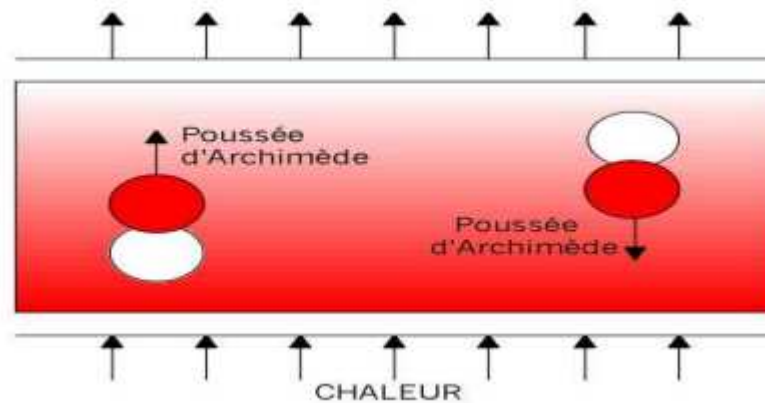
Pour illustrer le mécanisme de base de la convection de Rayleigh-Bénard et les forces en présence qui sont en compétition, on considère le mouvement d'une goutte de fluide selon ce qui suit.

### 3.6.1.2. Déplacement d'une goutte de fluide :

Imaginez une goutte de fluide de n'importe quelle taille et forme, mais avec des déplacements spontanés et aléatoires infiniment petits vers le haut ou vers le bas. La force agissant sur cette gouttelette détermine le mouvement de l'ensemble du fluide.

Considérons d'abord une goutte située au fond de la couche de fluide avec une densité inférieure à la moyenne. Tant que la gouttelette reste immobile, elle sera entourée d'un fluide de même densité, avec une flottabilité nulle. Supposons maintenant qu'une perturbation aléatoire amène la gouttelette à se déplacer légèrement vers le haut. Ce dernier est alors entouré d'un fluide de densité plus élevée et de température plus basse.

Ainsi la poussée d'Archimède, proportionnelle à la différence de densité et au volume de la goutte, va s'exercer vers le haut et va amplifier le mouvement ascendant initial de la goutte. On peut raisonner de la même façon pour une goutte de fluide située au sommet de la couche. La goutte subissant un léger déplacement aléatoire vers le bas est alors entourée d'un fluide moins dense et tend à s'enfoncer vers le bas de la couche. Ces écoulements ascendants et descendants définissent la convection naturelle [13].

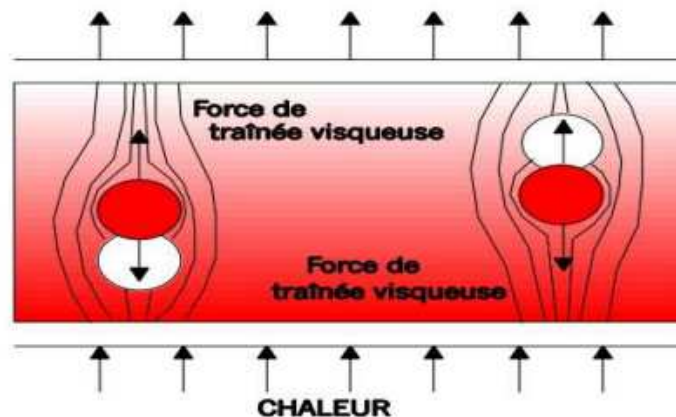


**Figure I.7 :** Schéma représentant la poussée d'Archimède

### 3.6.1.3. Traînée visqueuse et diffusion de la chaleur :

On peut supposer que la présence d'un gradient de température est suffisante pour induire la convection. En effet, pour initier un régime convectif, le gradient de température doit atteindre un certain seuil.

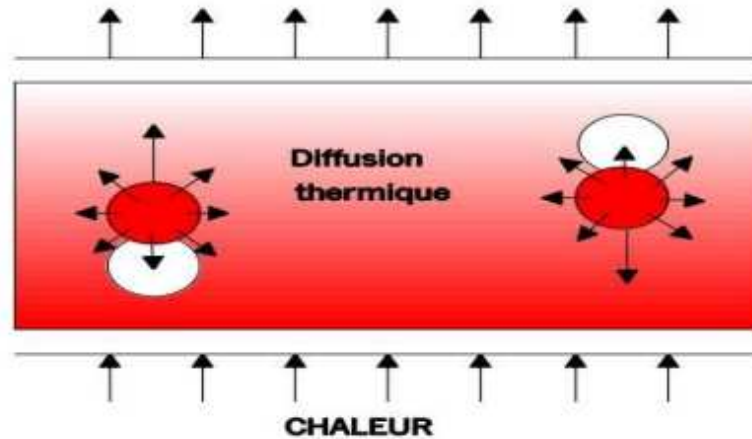
En fait, deux autres facteurs jouent un rôle important dans le mouvement de la goutte. La première est la résistance visqueuse (frottement) opposée à la direction du mouvement (Figure I.8). Sa valeur dépend de la viscosité du fluide. Donc, tant que la traînée visqueuse est égale à la poussée d'Archimède, il n'y a pas de mouvement.



**Figure I.8 :** Schéma représentant la force de traînée visqueuse

Le deuxième facteur est la diffusion thermique (Figure I.9). La chaleur est transmise par le transfert d'énergie thermique des molécules aux molécules voisines, transférant la chaleur à un environnement plus frais. Au lieu de cela, les gouttelettes froides qui ont tendance à descendre vers le bas de la couche reçoivent de la chaleur. Ce transfert de chaleur contribue à réduire les gradients de température, réduisant ainsi la flottabilité [13].

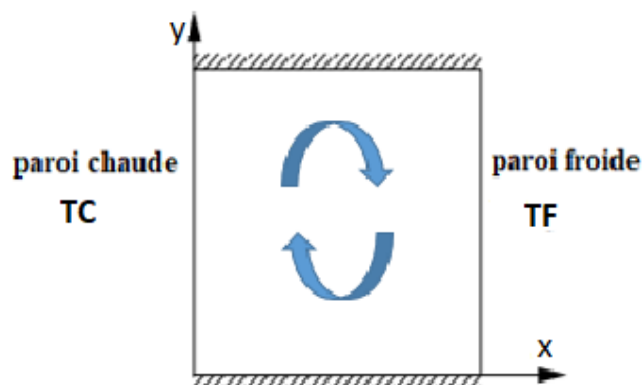
Ainsi, en fonction de la diffusivité thermique du fluide, à partir d'un certain temps, l'équilibre thermique d'une goutte de fluide avec son environnement peut être atteint. Si ce temps de diffusion thermique est inférieur ou égal au temps nécessaire à la goutte pour effectuer un déplacement de longueur caractéristique, la flottabilité et la traînée visqueuse d'Archimède se compensent et la convection n'est pas maintenue.



**Figure I.9 :** Schéma représentant la diffusion thermique

### 3.6.2. Cavité avec gradient de température horizontal :

Ici les parois haute et basse de la cavité sont adiabatiques. Si les parois de gauche et de droite sont portées et maintenues à des températures respectives de  $T_C$  et  $T_F$ , la condition d'équilibre mécanique n'est pas satisfaite et le gradient horizontal de température provoque la mise en mouvement du fluide et la formation d'un écoulement dans la cavité. Pour cette configuration, il n'y a pas de gradient critique de température et le fluide est alors ascendant le long de la paroi chaude et descendant le long de la paroi froide [14].



**Figure I.10 :** Schéma de la convection dans une cavité avec gradient horizontal de température

## **CHAPITRE II**

### **Formulation Mathématique et Simulation Numérique**

Chaque phénomène physique est généralement représenté par une équation mathématique (équation différentielle) qui représente un modèle pour ce phénomène. La modélisation doit exprimer le comportement des phénomènes dans l'espace et dans le temps. En mécanique des fluides, le fluide est supposé continu, ce qui permet d'utiliser des lois de conservation classiques, à savoir [9] :

- Conservation de masse.
- Conservation de quantité de mouvement.
- Conservation d'énergie.

## 2.1. Les équations gouvernantes :

### 2.1.1. Equation de continuité :

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante [15] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0 \quad (\text{II.1})$$

Où :

$\rho$  est la masse volumique et  $V$  est le vecteur de vitesse.

### 2.1.2. Equation de quantité de mouvement :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir une relation entre les propriétés d'un fluide en mouvement et ce qui le provoque. Il montre que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces externes exercées sur lui. Il s'écrit sous la forme suivante [15] :

$$\frac{D}{Dt}(\rho \cdot V) = F - \text{grad}(p) + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}(V)) \quad (\text{II.2})$$

$\frac{D}{Dt}(\rho \cdot V)$  : Le taux de variation et de transport de quantité de mouvement.

$\text{grad}(p)$  : Les forces dues à la pression.

$\mu \Delta V$  : Les forces nettes de viscosité.

$\frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}(V))$  : Terme visqueux de Brinkman.

Où :

$F$  est une force par unité de volume,  $p$  est la pression et  $\mu$  est la viscosité dynamique.

### 2.1.3. Equation de conservation d'énergie :

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie [15], soit :

$$\frac{D}{Dt}(\rho C_p T) = \Delta(k \cdot T) + q + \beta T \frac{Dp}{DT} + \mu \Phi \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$\frac{D}{Dt}(\rho C_p T)$  : La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(k \cdot T)$  : La variation d'énergie par conduction.

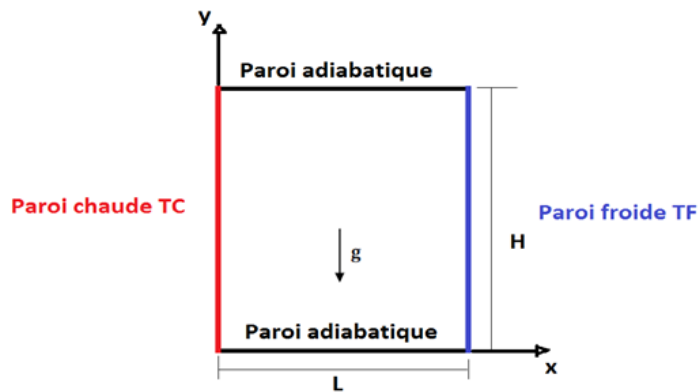
$q$  : Puissance volumique dissipée.

$\beta T \frac{Dp}{DT}$  : La variation d'énergie due à la compressibilité.

$\mu \Phi$  : La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

## 2.2. Configuration de la cavité :

Une enceinte rectangulaire de dimension  $H \times L$  différentiellement chauffée. La cavité est constituée de deux parois verticales se faisant face, dites parois mobiles, maintenues à une différence de température (TC, TF), les autres parois étant supposées adiabatiques.



**Figure II.1** : Schéma d'une cavité avec un gradient de température horizontal

### 2.2.1. Les hypothèses :

Dans le but de faciliter la résolution du problème considéré, les hypothèses simplificatrices suivantes sont appliquées :

- Le problème est considéré comme bidimensionnel.
- Le fluide est newtonien et incompressible.
- L'écoulement est en régime laminaire permanent.
- l'approximation de Boussinesq est appliquée : la masse volumique du fluide ne dépend que de la température.
- Les autres propriétés physiques du fluide sont supposées constantes et sont calculées à la température moyenne du fluide.
- L'enceinte se trouve dans le champ gravitationnel de la Terre.
- Les parois de l'enceinte sont rigides.
- Le transfert de chaleur par rayonnement n'est pas pris en compte.

**2.2.2. Approximation de Boussinesq :**

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

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (\text{II.4})$$

Où :

$\rho_0$  et  $T_0$  dénotent respectivement, la masse volumique et la température de référence et  $\beta$  est le coefficient de dilatation thermique donné par l'expression suivante :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (\text{II.5})$$

Cette approximation peut être utilisée dans le cas où la différence de température est très faible pour que les propriétés physiques du fluide puissent être considérées comme constantes, les variations de la masse volumique au sein du fluide sont faibles. Par conséquent, le fluide peut être considéré comme quasi-incompressible. Les variations de  $\rho$  sont négligées excepté pour les équations de mouvement.

**2.3. Les équations du problème :**

On peut établir les différentes équations nécessaires à la résolution du problème considéré dans notre étude, en coordonnée cartésienne comme suit :

**2.3.1. Equation de continuité :**

Après l'application des précédentes hypothèses on obtient :

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

$u$  et  $v$  étant les composantes du champ de vitesse  $V (u, v)$  dans la direction  $x$  et  $y$  respectivement.

**2.3.2. Equation de quantité de mouvement :**

Dans notre cas, la forme de l'équation de quantité de mouvement est comme suit :

Suivant  $x$  :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

Suivant  $y$  :

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

**2.3.3. Equation de l'énergie :**

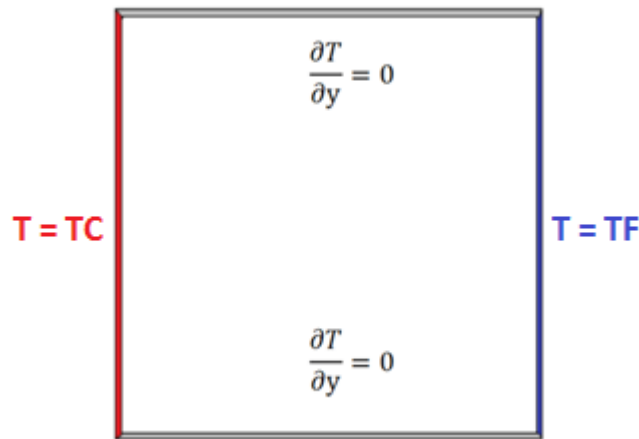
L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le principe de la conservation de l'énergie dans la direction x et y comme suit :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{(II.9)}$$

Les équations différentielles de la continuité, de la quantité de mouvement et de l'énergie forment le modèle mathématique de l'écoulement de la convection naturelle laminaire [9-10-16].

**2.4. Conditions aux limites :**

La résolution du système d'équations précédemment obtenu nécessite d'incorporer des conditions aux limites pour chaque variable dépendante, représentant les conditions aux limites thermiques appliquées (Figure II.2).



**Figure II.2 :** Les conditions aux limites

Le tableau II.1 résume les différentes conditions aux limites (hydrodynamiques et thermiques).

**Tableau II.1 :** Les conditions aux limites appliquées

Limites	Conditions hydrodynamiques	Conditions thermiques
<b>Paroi chaude</b> $x=0 ; 0 < y < H$	$u=0$ $v=0$	$T=T_C$
<b>Paroi froide</b> $x=L ; 0 < y < H$	$u=0$ $v=0$	$T=T_F$
<b>Paroi supérieure</b> $y=H ; 0 < x < L$	$u=0$ $v=0$	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$
<b>Paroi inférieure</b> $y=0 ; 0 < x < L$	$u=0$ $v=0$	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$

## 2.5. Code de calcul et simulation numérique

Vu la complexité de la résolution de système d'équations qui permettent de décrire le mouvement convectif dans les cavités, nous sommes amenés à faire des simulations numériques.

Dans notre travail, nous aurons recours au code de calcul numérique de dynamique des fluides Fluent qui est basé sur la méthode des volumes finies pour la discrétisation du système d'équations aux dérivées partielles décrivant l'écoulement.

L'avantage des méthodes numériques est que tous les phénomènes physiques liés à l'écoulement (champ de température, champ de vitesse, contraintes, etc.) sont immédiatement obtenus en tout point de l'écoulement.

Toute étude numérique des écoulements commence par la définition de la grille de calcul. La nature et la précision des solutions obtenues dépendent du maillage utilisé. Parmi les logiciels de maillage les plus connus en CFD (Computational Fluid Dynamics), on trouve Gambit.

### 2.5.1. Maillage :

#### 2.5.1.1. Types de maillage :

Sous Gambit, on peut utiliser plusieurs types de maillages :

- a) **Maillage structuré** : est composé de mailles quadrilatérales en 2D et hexaédriques en 3D.

Ses avantages :

- Economique en nombre d'éléments (par rapport à un maillage non structuré équivalent) ;
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients :

Pour certaines géométries complexes, c'est difficile de générer le maillage, c'est difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage.

- b) **Maillage non structuré** : est composé de mailles quadrilatérales ou triangulaires en 2D et hexaédriques ou tétraédriques en 3D.

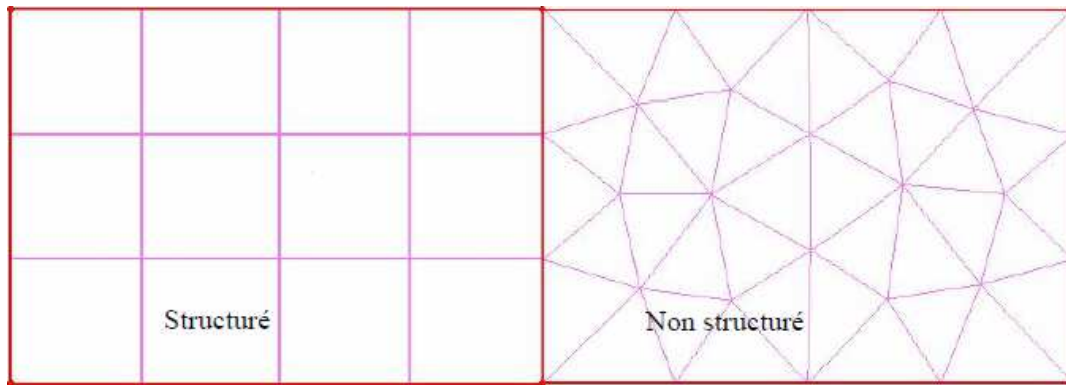
Il présente les avantages suivants :

- Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments ;
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés.

Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles si l'on compare avec le maillage structuré ;
- Engendre des erreurs numériques qui peuvent être plus importantes comparativement au maillage structuré.

- c) **Maillage hybride (mixte)** : maillage généré par un mélange d'éléments de différents types. Il combine les avantages des maillages structurés et non structurés.



**Figure II.3:** Maillage structuré et non structuré [15]

Gambit nous donne les types suivant des éléments de maillage surfacique :

**Tableau II.2 :** Schéma des éléments face [17]

Option	Définition
<b>Quad</b>	Le maillage contient seulement des éléments quadrilatéraux
<b>Tri</b>	Le maillage contient seulement des éléments triangulaires
<b>Quad/Tri</b>	Le maillage contient des éléments quadrilatéraux mais peut aussi contenir des éléments triangulaires

**Tableau II.3:** Les différents types de maillage [17]

Option	Définition
<b>Map</b>	Crée un maillage structuré
<b>Submap</b>	Divise une face complexe en régions plus régulières et crée en chaque région un maillage structuré
<b>Pave</b>	Crée un maillage non structuré
<b>Tri Primitive</b>	Divise une face à trois cotés en trois régions quadrilatérales et crée un maillage mappé dans chaque région
<b>Wedge Primitive</b>	Crée des éléments triangulaires à l'extrémité d'une face en forme de coin et crée un maillage radial vers l'extérieur à partir de l'extrémité

**Tableau II.4:** Types de maillage des éléments face [17]

Type de maillage	Type d'éléments de maillage		
	Quad	Tri	Quad/Tri
Map	x		x
Submap	x		
Pave	x	x	x
Tri Primitive	x		
Wedge Primitive			x

### 2.5.1.2. Qualité du maillage

La qualité du maillage a un vrai impact sur la convergence, le temps de calcul et la précision de la solution. Une bonne qualité de maillage repose sur la minimisation des éléments présentant des distorsions (skewness) et aussi sur une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (ondes de choc, couches limites...etc.). [17]

Les grandes valeurs du facteur de distorsion induisent des erreurs de calcul ; quelques distorsions peuvent être tolérées si elles sont situées dans des régions à faible gradient.

Le tableau suivant donne la variation de la qualité de maillage en fonction de la valeur du coefficient de distorsion  $F_d$  :

**Tableau II.5 :** Variation de la qualité de maillage en fonction de la valeur du coefficient de distorsion  $F_d$  [17]

$F_d$	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.99	0.99-1
Qualité	Excellent	Bon	acceptable	pauvre	très pauvre	Mauvais

### 2.5.2. Le meilleur Gambit

Gambit est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur), Il est utilisé pour créer le domaine d'étude et de le mailler. Il permet de construire des géométries simples ou complexes, en 2D ou 3D.

#### 2.5.2.1. Les différentes étapes d'utilisation de Gambit :

Après l'exécution du logiciel, l'interface d'utilisation apparait, cette interface est divisée en 6 parties :

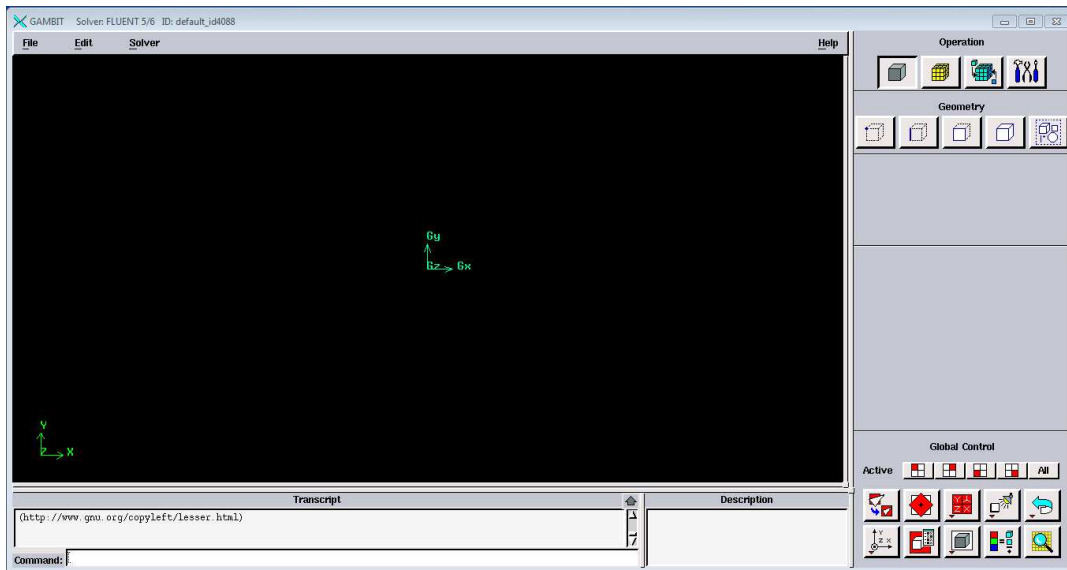


Figure II.4 : Interface générale

a. **Une zone graphique :** elle donne l'accès à une liste de menus (File, Edit, Solver).

File : permet d'ouvrir, de fermer et de sauvegarder des sessions, d'importer et d'exporter des fichiers ;

Edit : permet de modifier la configuration de Gambit ;

Solver : permet de choisir le type de code de calcul utilisé, choisissez FLUENT 5/6 pour l'utilisation du code Fluent.

b. **Une fenêtre de contrôle global :** permet entre autres, de zoomer, de changer de repère et de vérifier le maillage.

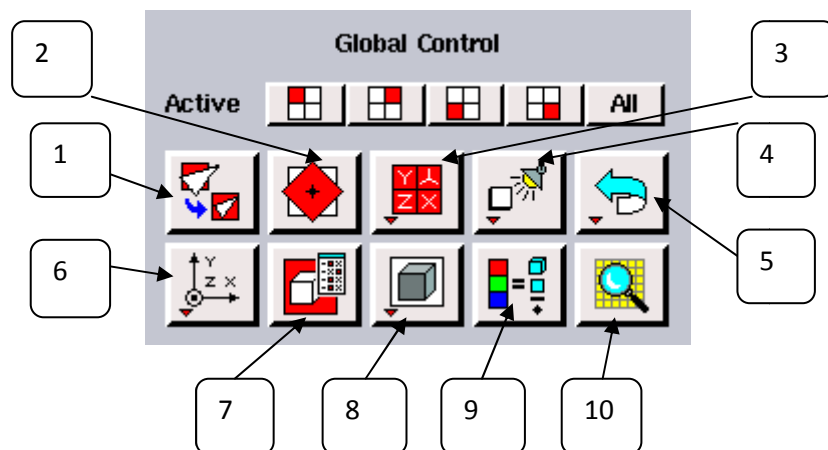


Figure II.5 : Menu contrôle global

La première ligne (Active), représente les fenêtres graphiques utilisées lorsque l'on divise le panel graphique en 4.

1-Fit to window : recadre la fenêtre sur la dimension de la géométrie ;

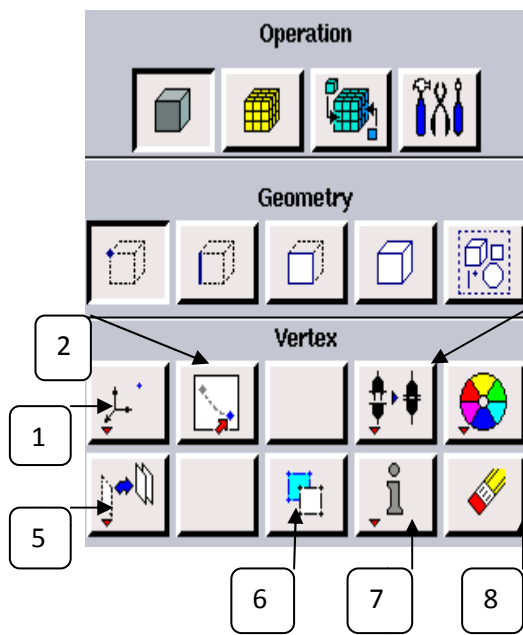
2-Select Pivot : choix du type de rotation ;

- 3-Select Preset Configuration: ouvre un menu de configurations qui divise le panel graphique en 4 fenêtres ;
- 4-Modify Light Source, Annotate, Specify Label : permet de modifier les orientations de la source lumineuse et les propriétés, nommer les pièces ;
- 5-Undo Redo : annuler la dernière opération ;
- 6-Orient Model : ouvre le menu des orientations ;
- 7-Specify Model Display Attribute : donne les options de visualisation ;
- 8-Render Model : spécifie l'apparence du modèle avec des lignes de définition, ombré ou caché ;
- 9-Specify Color Mode : pour la définition des couleurs (points, lignes, faces, volumes...etc.) ;
- 10-Examine Mesh : vérification de la qualité du maillage.

**c. Fenêtre d'outils d'opération :** concerne la construction de la géométrie, la génération du maillage, définition des frontières et des domaines fluides et solides.

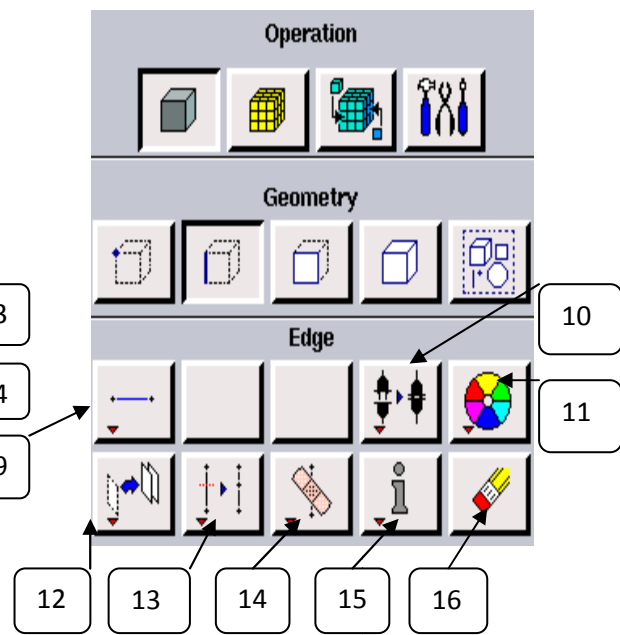
**c1. Construction de la géométrie :**

- **Menu point et menu segment :**



**Figure II.6.a:** Menu point

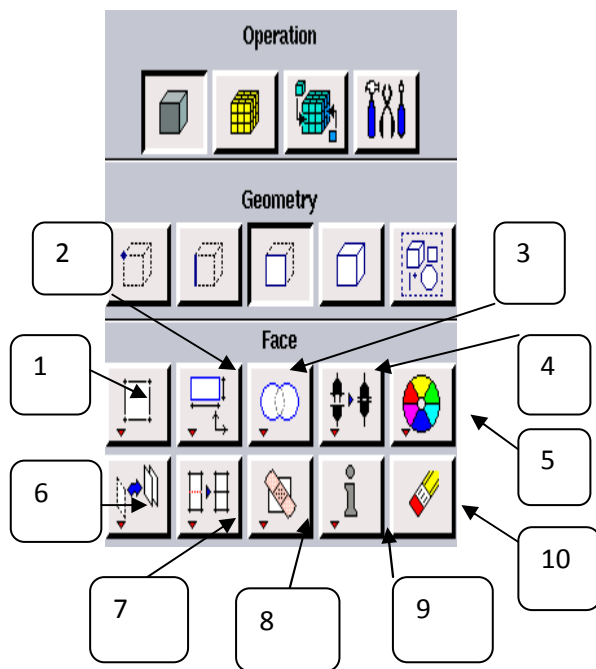
- 1-créer un point
- 2-glisser un point virtuel
- 3- connecter ou séparer des points
- 4-modifier la couleur d'un point
- 5-déplacer ou copier un point
- 6-convertir les points virtuels en réels
- 7-contrôle des points créés
- 8-supprimer un point



**Figure II.6.b:** Menu segment

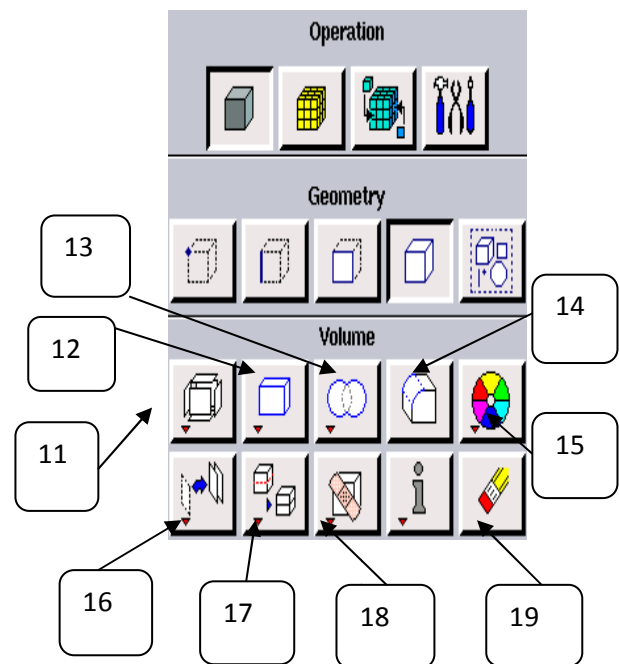
- 9-créer un segment (diverses formes)
- 10-connecter ou séparer des segments
- 11- changer la couleur d'un segment
- 12-déplacer ou copier un segment
- 13-fractionner ou merger des segments
- 14-convertir les segments virtuels en réels
- 15-contrôle des segments créés
- 16-supprimer des segments

• **Menu face et menu volume :**



**Figure II.7.a :** Menu face

- 1-créer une surface à partir de segments existant
- 2-créer une surface à partir d'une forme primitive
- 3-opérations booléennes sur les faces
- 4-connecter ou déconnecter des faces
- 5-changer la couleur des surfaces
- 6-déplacer ou copier une surface
- 7-fractionner ou merger des surfaces
- 8- convertir une face virtuelle en réelle
- 9-contrôle des faces créées
- 10-supprimer des surfaces



**Figure II.7.b :** Menu volume

- 11-former un volume à partir de surfaces
- 12-créer un volume à partir d'une forme primitive
- 13-opérations booléennes sur les volumes
- 14-changer la couleur des volumes
- 15-déplacer ou copier un volume
- 16-fractionner ou merger des volumes
- 17-convertir un volume virtuel en volume réel
- 18-contrôle des volumes créés
- 19-supprimer des volumes

- **Menu groupe :**

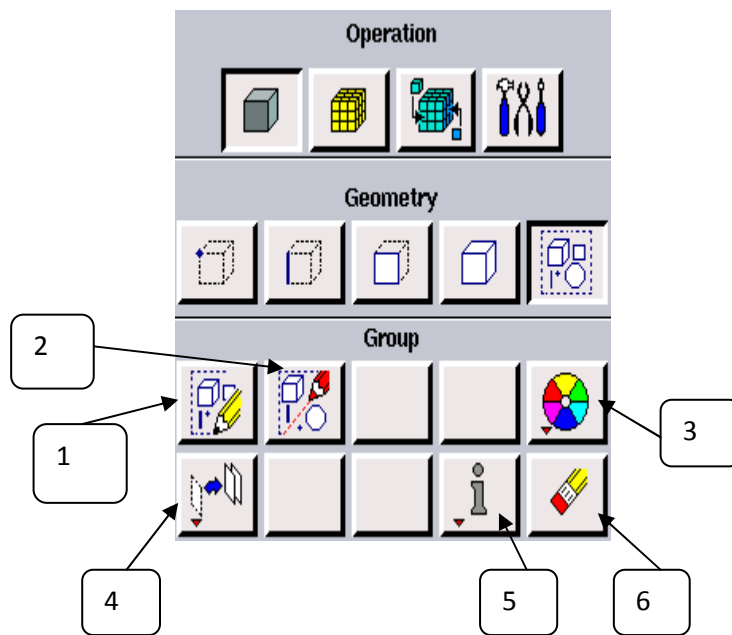


Figure II.8 : Menu groupe

- 1-créer un groupe
- 2-modifier un groupe
- 3-changer la couleur d'un groupe
- 4-déplacer ou copier un groupe
- 5-contrôle des groupes créés
- 6-supprimer des groupes

**c.2. Génération de maillage :**

- **Menu couches limites :**

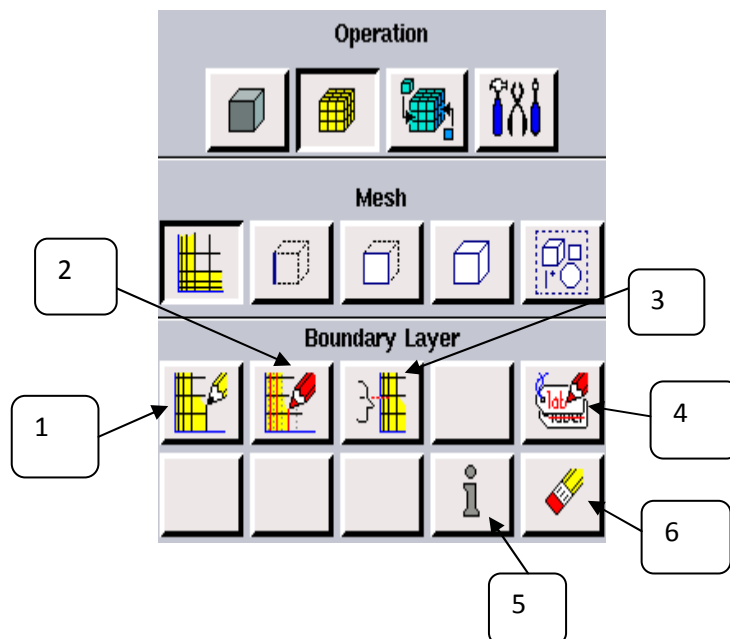
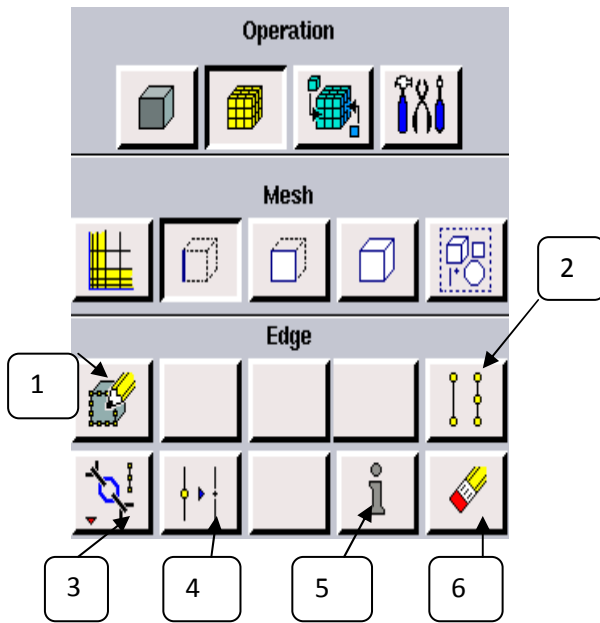


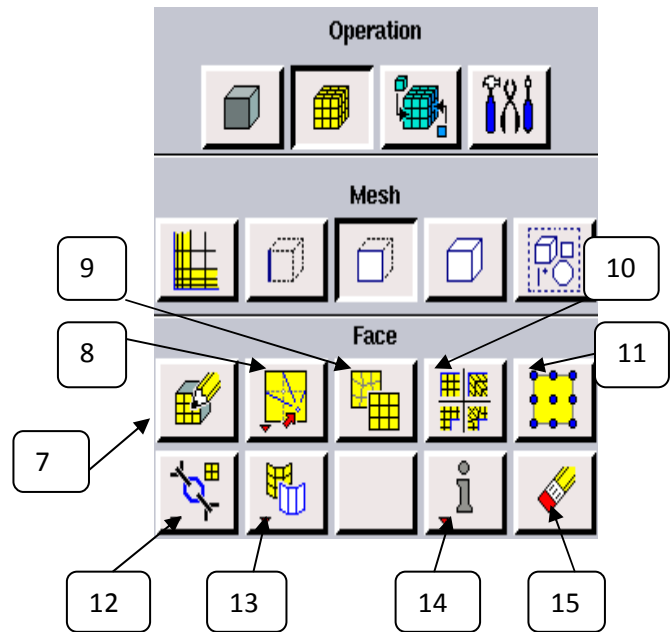
Figure II.9 : Menu couches limites

- 1-créer un maillage de la couche limite
- 2-modifier le maillage de la couche limite
- 3-affichage de la couche limite en 3D
- 4-changer la couleur de la couche limite
- 5-contrôle de la couche limite créée
- 6-supprimer une couche limite

• **Menu maillage des segments et menu maillage des surfaces :**



**Figure II.10.a :** Maillage des segments

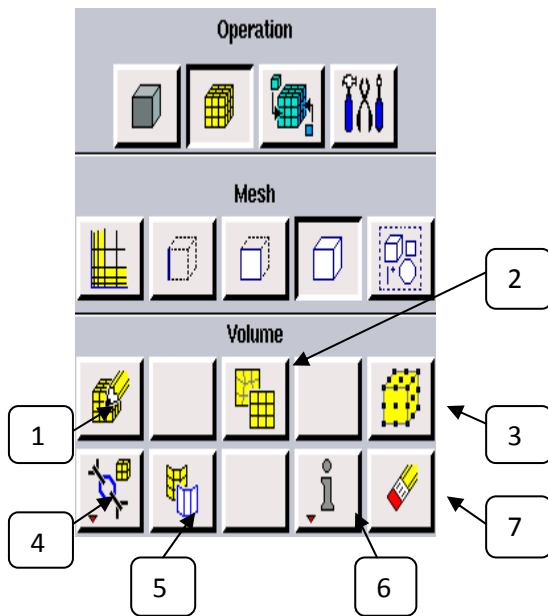


**Figure II.10.b :** Maillage des surfaces

- 1-créer ou modifier un maillage sur un segment
- 2-définir le type d'élément de maillage de segment
- 3-lier ou délier un maillage de type (segment)
- 4-découper un segment
- 5-contrôle de maillage des segments
- 6-supprimer le maillage des nœuds d'un segment

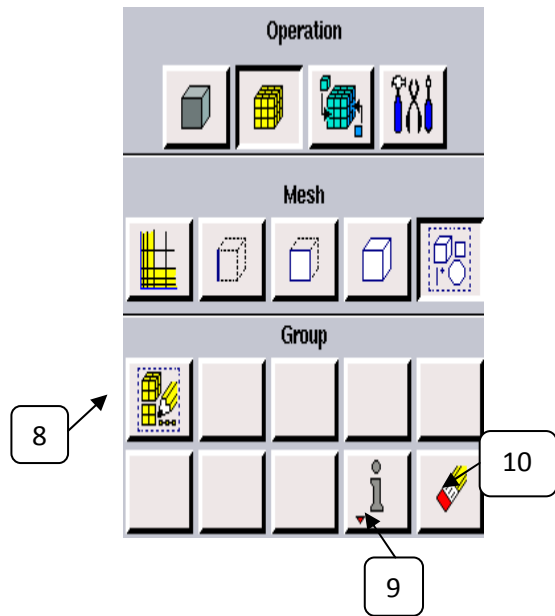
- 7- créer un maillage sur une surface
- 8-déplacer des nœuds sur un maillage
- 9-lisser le maillage sur une face
- 10-définir le type des points sur une face
- 11- définir le type d'élément d'une face
- 12-lier ou délier un maillage de type (face)
- 13-modifier la géométrie maillée importée
- 14-contrôle de maillage créé
- 15-supprimer le maillage des surfaces

- **Menu maillage des volumes et menu maillage des groupes :**



**Figure II.11.a :** Menu maillage des volumes

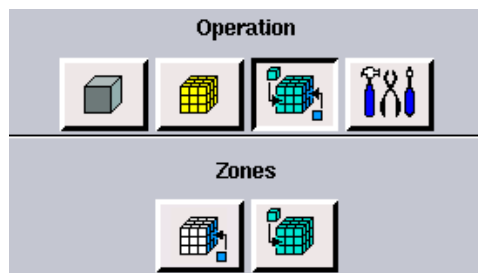
- 1-créer ou modifier un maillage dans un volume
- 2-lisser le maillage dans un volume
- 3-définir le type d'élément
- 4-lier ou délier un maillage de type (volume)
- 5-modifier la géométrie maillée importée
- 6-contrôle de maillage créé
- 7-supprimer le maillage des volumes



**Figure II.11.b:** Menu maillage des groupes

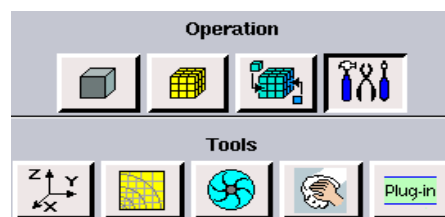
- 8- créer un maillage dans un groupe
- 9-contrôle de maillage créé
- 10-supprimer le maillage des groupes

**c.3. Conditions aux limites et définition du domaine :**



**Figure II.12 :** Définition des frontières et des domaines fluides et solides

**c.4. Outils :** permettent de créer et de modifier les systèmes de coordonnées et de grilles.



**Figure II.13 :** Barre d'outils

- d. **Fenêtre des descriptions** : donne les définitions des différents boutons.

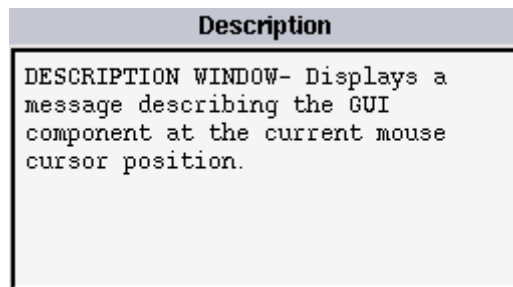


Figure II.14 : Fenêtre des descriptions

- e. **fenêtre (Transcript)** : donne des différentes informations comme les actions réalisées, leurs résultats, ainsi que les messages liés aux commandes.
- f. **Fenêtre de la liste des commandes** : un panel permettant d'insérer des commandes directement.

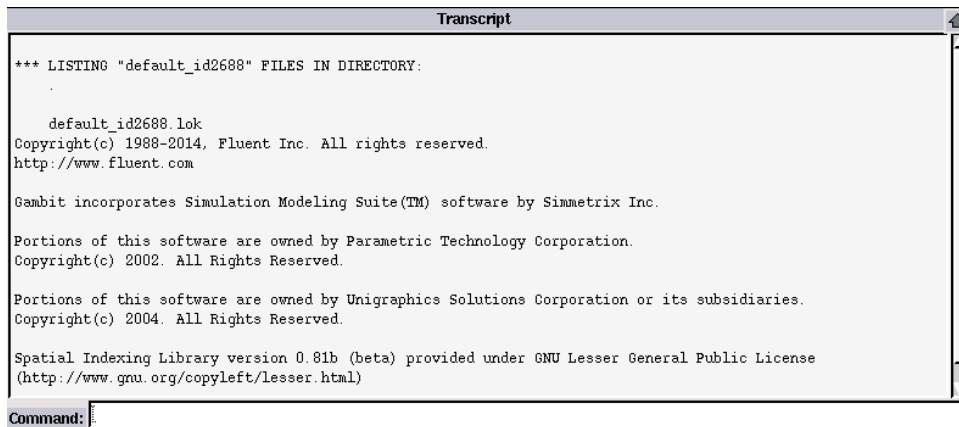


Figure II.15 : Fenêtre (Transcript), Fenêtre de la liste des commandes

### 2.5.2.2. Exportation du maillage :

Après avoir enregistré le travail (File-Save), il faut exporter le maillage (File-Export-Mesh), pour que Fluent soit capable de lire le fichier (Nom-fichier.msh).

### 2.5.2.3. Procédure de modélisation de la géométrie sous Gambit :

- 1-Ouverture d'une session ;
- 2-Création des points ;
- 3-Recadrage de la zone graphique ;
- 4-Création des segments ;
- 5-Création des surfaces ;
- 6-Maillage des segments ;
- 7-Maillage des surfaces ;
- 8-Mise en plan des conditions aux limites, types des matériaux ;
- 9-Exportation du maillage et sauvegarde de la session.

### 2.5.3. Méthode des volumes finis :

Il existe plusieurs méthodes de discrétisation des équations aux dérivées partielles telles que : la méthode des différences finis, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis. Dans notre étude, on utilisera la méthode des volumes finis.

La méthode des volumes finis consiste à diviser le domaine de calcul en un nombre fini de volumes de contrôle, entourant chaque point appelé « nœud ». Pour deux points voisins, les volumes de contrôle respectifs doivent posséder un côté commun appelé interface. Les équations différentielles sont intégrées sur chaque volume de contrôle. Son avantage est qu'elle est conservative : tout ce qui sort d'un volume de contrôle entre dans le volume voisin. Le principe de la méthode des volumes finis est basé sur une technique de discrétisation qui convertit le système d'équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. [15]

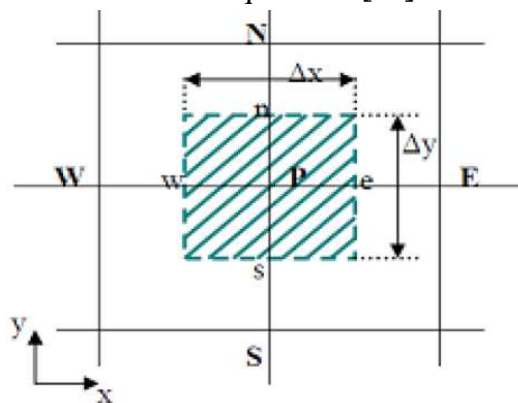


Figure II.16 : Volume de contrôle bidimensionnel

Dans notre étude, la méthode des volumes finis qui a été adoptée consiste à exprimer le bilan de la grandeur étudiée sur un volume de contrôle.

Les étapes utilisées dans la méthode des volumes finis :

La division du domaine considéré en volumes de contrôle ;

La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles ;

Ecriture des équations algébriques aux nœuds du maillage ;

Résolution du système algébrique linéaire obtenu.

### 2.5.4. Le solveur Fluent :

Fluent est un outil conçu pour la simulation des écoulements de fluides et de transfert thermique dans des géométries complexes, il est programmé en langage (C) et offre toute la flexibilité et la puissance de ce langage. Fluent utilise la méthode des volumes finis dans la discrétisation des équations gouvernantes. [15]

La méthode des volumes finis a prouvé son efficacité dans l'approximation de la solution de systèmes de lois de conservation, elle est très utilisée dans beaucoup de domaines de l'ingénierie gouvernés par des systèmes conservatifs.

### 2.5.4.1. Les différentes étapes d'utilisation de Fluent :

Ouverture d'une session : Définir le type de problème

Notre géométrie du domaine d'étude est de forme bidimensionnelle, on utilise la version 2DDP (double précision) dans notre étude de simulation.

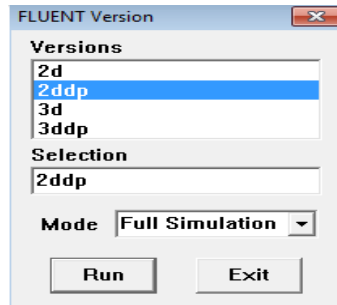


Figure II.17 : Type de résolution

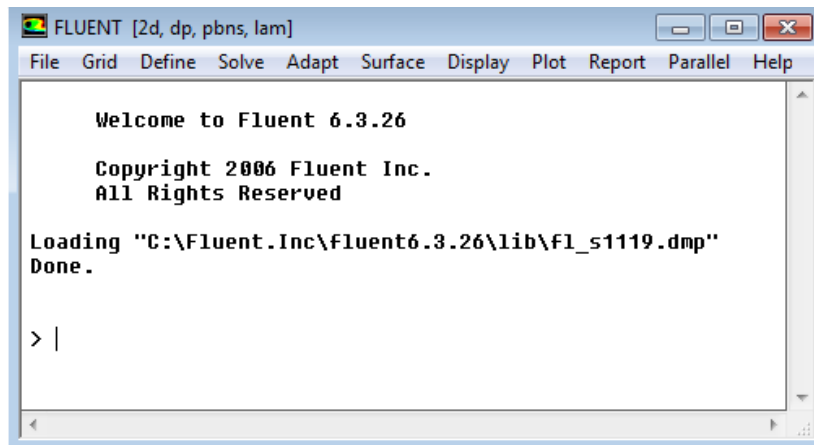


Figure II.18 : Interface de Fluent

1-Importation de la géométrie : lire le fichier exporté.

File → Read → Case...

2-Vérification du maillage : permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs.

Grid → Check

3-Vérification de l'échelle : définir les dimensions physiques du problème.

Grid → Scale

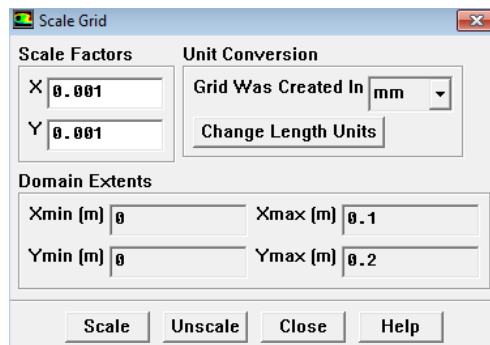


Figure II.19 : Vérification de l'unité

4-Choix du solveur : la fenêtre solveur permet de définir la dimension de notre espace de travail, la méthode utilisée, choix de vitesse (absolue ou relative).

Define → Models → Solver...

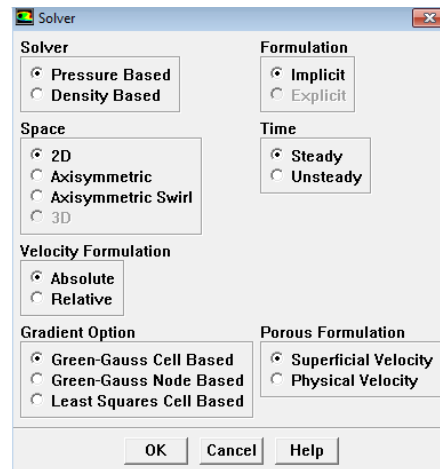


Figure II.20 : Choix du solveur

5-Affichage de la grille : permet d'afficher le maillage utilisé sous Gambit et de vérifier les conditions.

Display → Grid

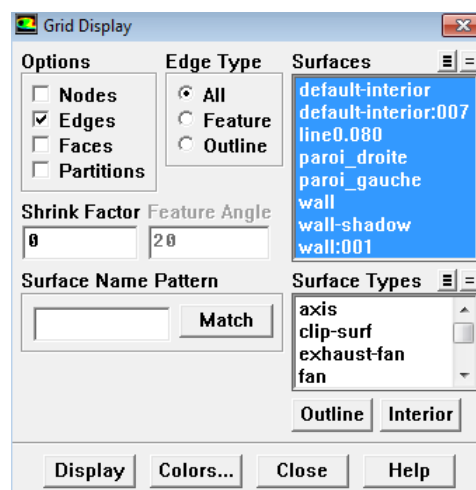


Figure II.21 : Affichage de la grille

6-Etablir l'équation de l'énergie : dans le cas d'un problème dynamique et thermique, il faut inclure l'équation d'énergie dans le système d'équations à résoudre, pour obtenir une solution réaliste et aussi pour faciliter la convergence.

Define → Models → Energy

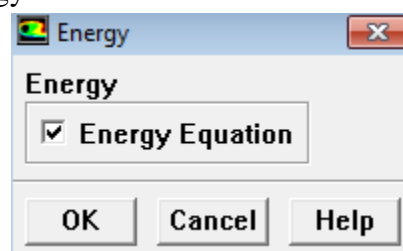


Figure II.22 : Etablir l'équation de l'énergie

7-Choix du modèle de turbulence : permet de choisir le régime d'écoulement.

Define → Models → Viscous...

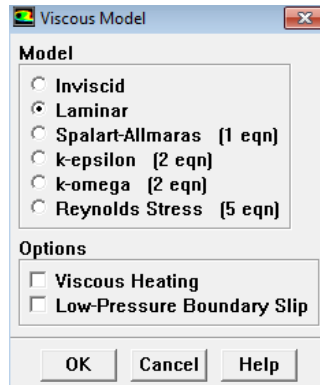


Figure II.23 : Différentes modélisations de l'écoulement

8-Définition des caractéristiques (fluide/solide) : permet d'introduire les propriétés des matériaux utilisés. Avec  $\beta = 0.003298 \text{ K}^{-1}$

Define → Materials...

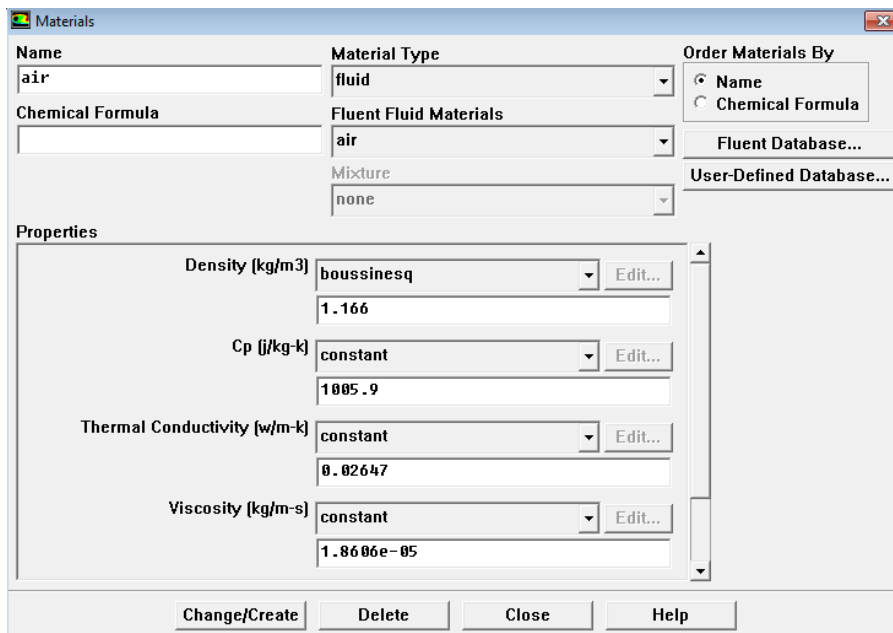
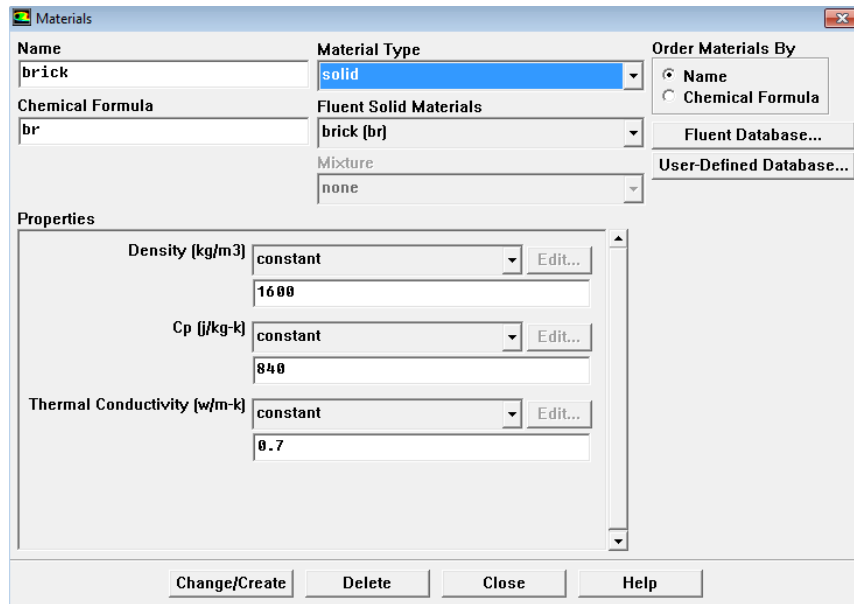


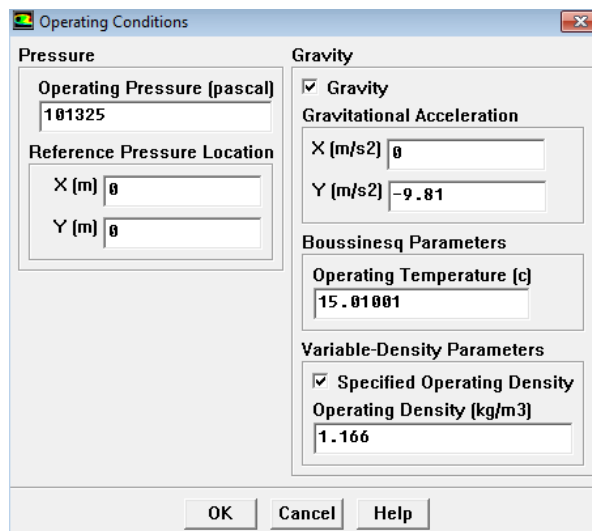
Figure II.24 : Définition des propriétés de l'air



**Figure II.25 :** Définition des propriétés de la brique utilisée

9-Choix des conditions opératoires : permet d'introduire des conditions de fonctionnement comme la gravité et la pression de référence.

Define → Operating Conditions...



**Figure II.26 :** Définition des conditions opératoires

10-Définition des conditions aux limites : sert à fixer les conditions aux limites du problème étudié et les donner des valeurs numériques.

Define → Boundary conditions...

a-La condition à la limite de la paroi gauche :

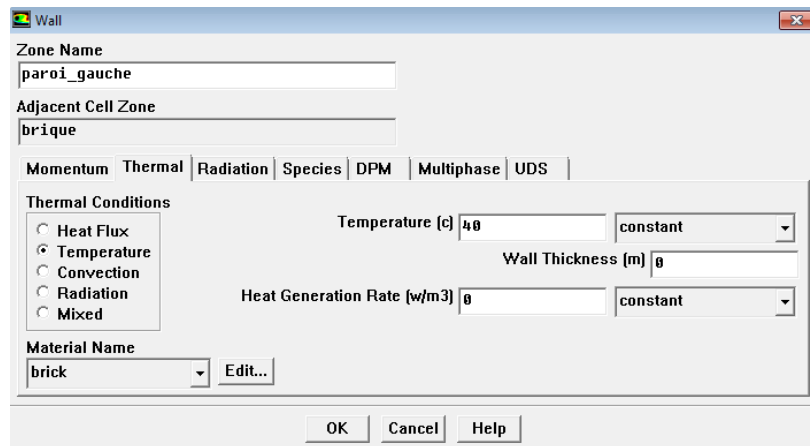


Figure II.27 : Définir la condition à la limite de la paroi gauche (chaude)

b-La condition à la limite de la paroi droite :

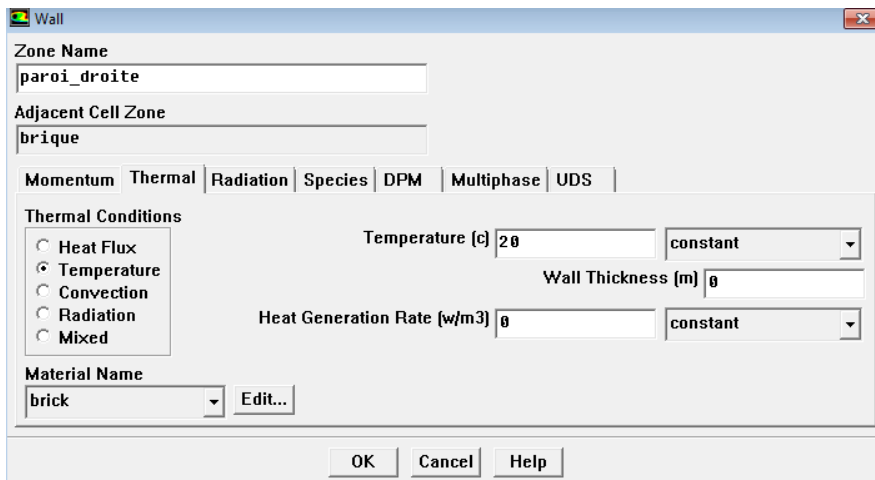


Figure II.28 : Définir la condition à la limite de la paroi droite (froide)

11-Choix de l'unité : permet de fixer l'unité d'une grandeur physique.

Define → Units...

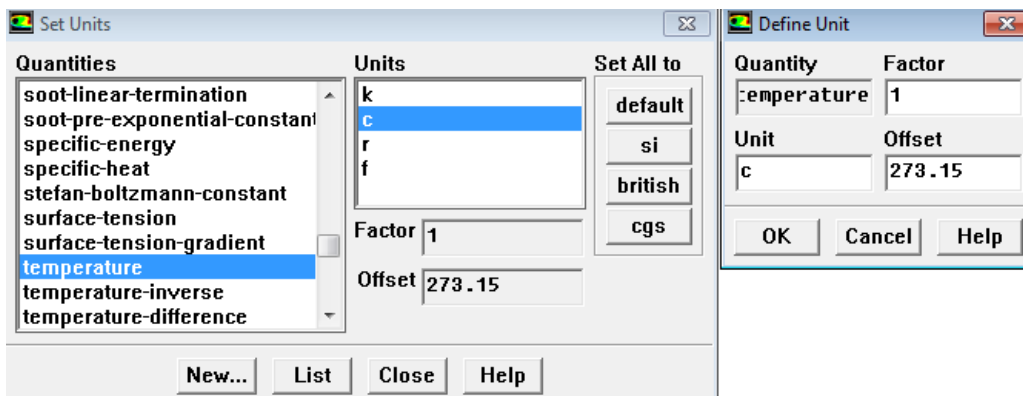
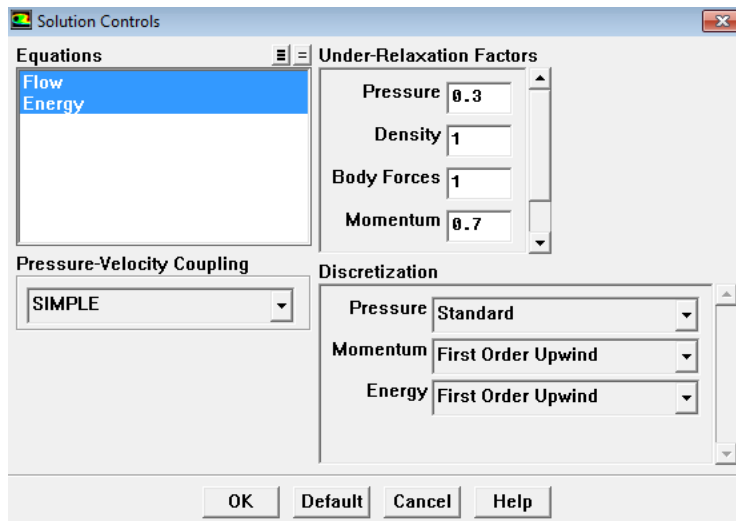


Figure II.29 : Définition de l'unité

12-Contrôle de la solution : permet de modifier les facteurs de sous-relaxation, qui jouent un rôle sur la convergence du système.

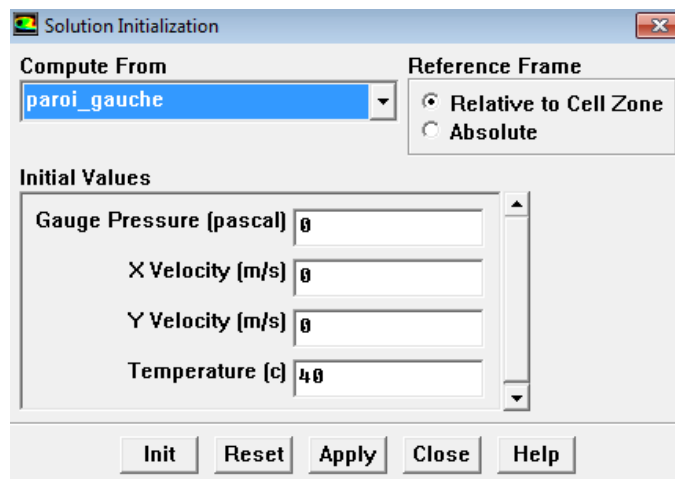
Solve → Controls → Solution...



**Figure II.30 :** Les paramètres de sous-relaxation

13-Initialisation des calculs : permet de fixer les conditions initiales du système. Dans plusieurs cas, il est conseillé d'initialiser les calculs aux conditions de l'entrée (température, vitesse, pression...etc.).

Solve → Initialize → Initialize...



**Figure II.31 :** Initialisation de la solution

14-Choix des critères de convergence : permet de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation numérique s'arrêtent. Pour afficher l'évolution des résidus sous forme d'un graphe, il faut cocher l'option Plot.

Solve → Monitors → Residual...

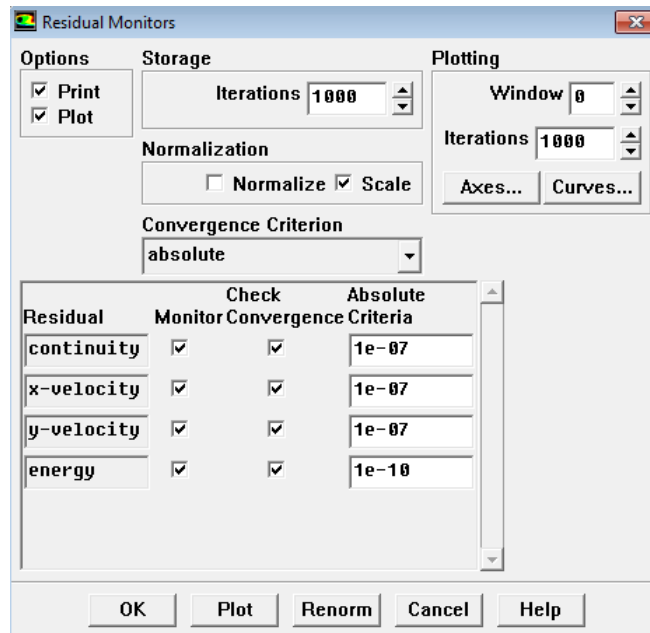


Figure II.32 : Affichage des critères de convergence

15-Lancement du calcul et affichage de la courbe des résidus : permet de choisir le nombre d'itérations et de lancer les calculs.

Solve → Iterate...

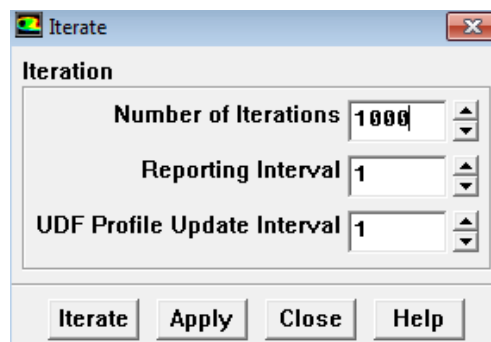


Figure II.33 : Lancement des itérations

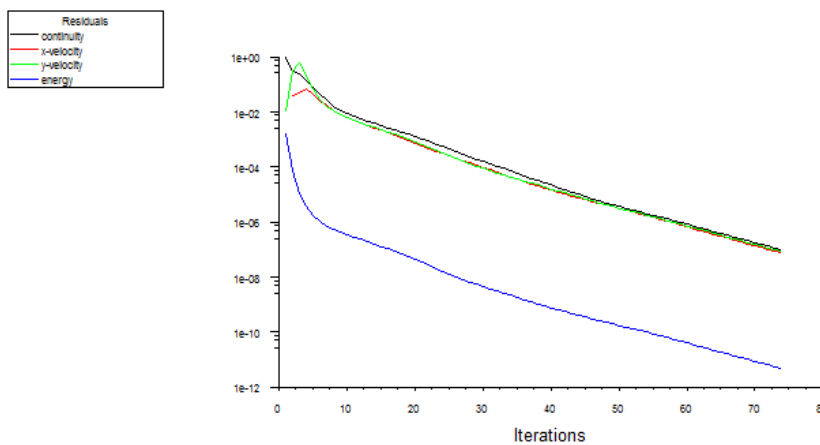


Figure II.34 : Evolution des résidus de calcul

16-Sauvegarde du fichier (Nom-fichier.cas) : permet d'enregistrer les données de paramétrage de la simulation (Nom-fichier.cas) ainsi que les résultats de cette simulation numérique (Nom-fichier.dat).

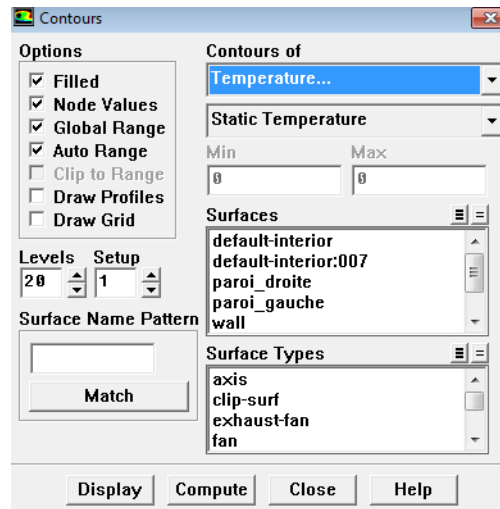
File → Write → Case & Data

### 2.5.4.2. Traitement des résultats :

Après avoir atteint la convergence, on peut visualiser les résultats de calcul grâce au post-traitement de code Fluent.

1-Affichage de contours des différentes grandeurs : permet d'observer les variations des variables (pression, température, vitesse, lignes de courant...etc.).

Display → Contours...



**Figure II.35 :** Evolution de différentes variables

2-Affichage des contours de vecteurs : permet de traduire les valeurs par des vecteurs, ceci est surtout utile pour la visualisation des vecteurs vitesses.

Display → Vectors...

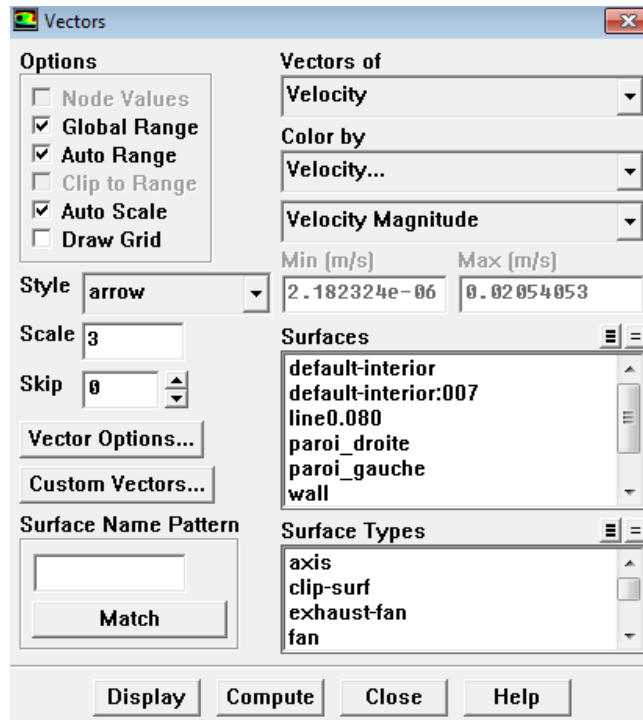


Figure II.36 : Affichage des vecteurs de vitesse

3-La fenêtre Line/Rake Surface : permet de créer des lignes et des plans.

Surface → Line/Rake...

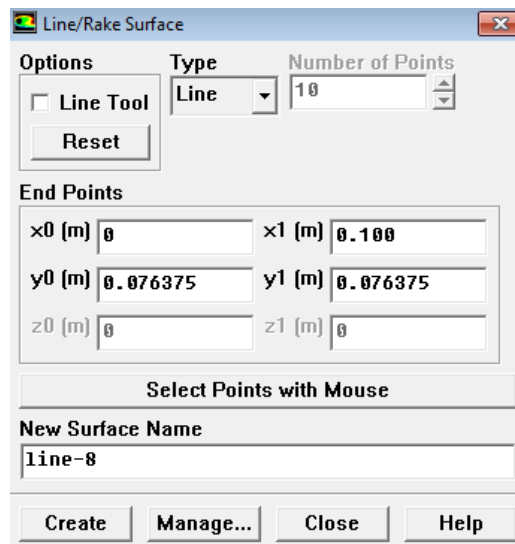
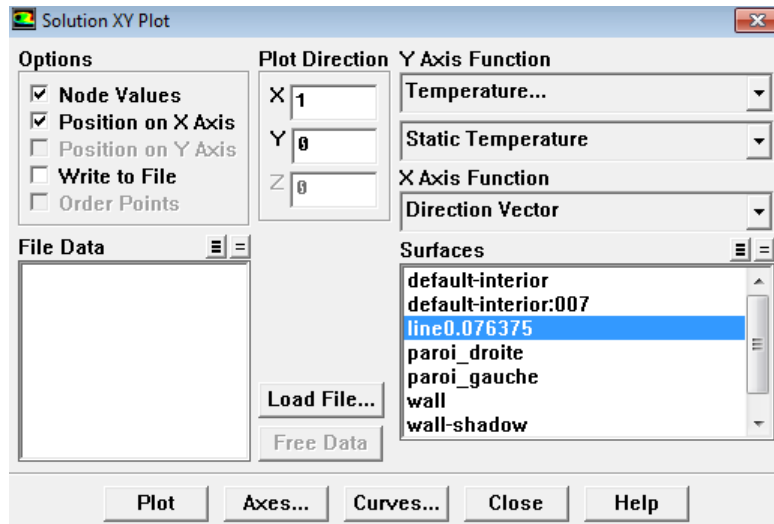


Figure II.37 : Création des lignes/plans

4-La fenêtre Solution XY Plot : permet de tracer des graphes de toutes les variables sur les lignes créées.

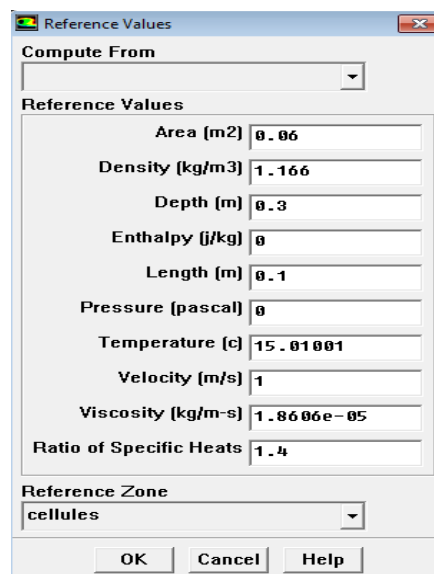
Plot → XY Plot...



**Figure II.38 :** Affichage des courbes sur des lignes créées

5-La fenêtre Reference Values : permet d'introduire les valeurs de référence.

Report → Reference Values...



**Figure II.39 :** Définir les valeurs de référence

6-La fenêtre Flux Reports : après avoir défini les valeurs de référence, cette fenêtre nous permet de calculer les flux de chaleur.

Report → Fluxes...

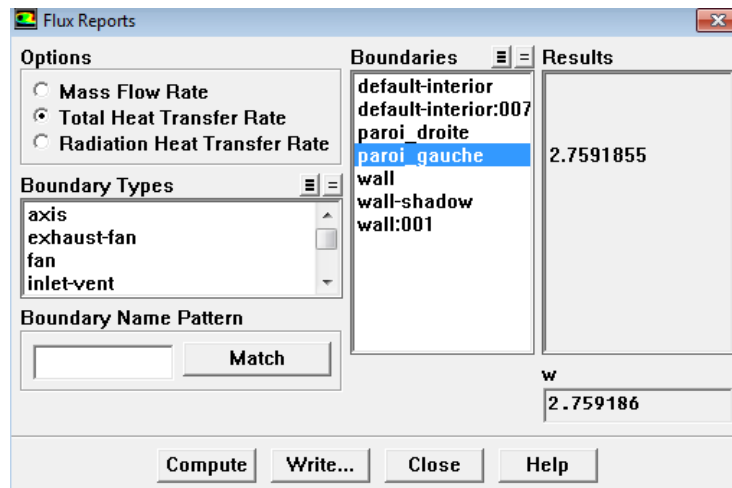


Figure II.40 : Affichage de la fenêtre Flux Reports

7-La fenêtre Volume Integrals : après avoir défini les valeurs de référence, cette fenêtre nous permet de calculer le volume de la matière.

Report → Volume Integrals...

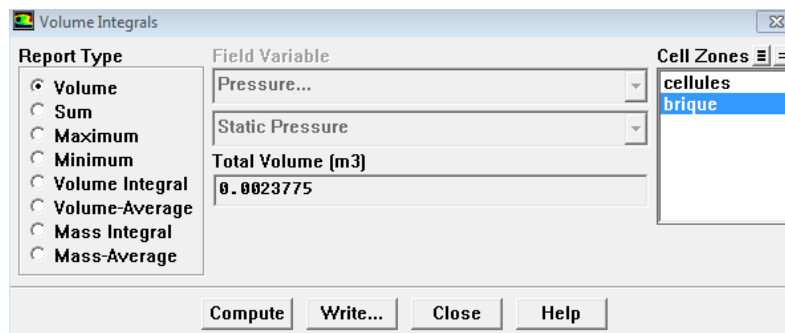


Figure II.41 : Affichage de la fenêtre Volume Integrals

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présentés les équations gouvernantes régissant la convection naturelle dans des cavités fermées, ainsi les conditions aux limites appropriées.

Dans la deuxième partie, nous avons explicité la procédure de la résolution numérique sur les logiciels Gambit et Fluent, allant de la création de la géométrie, la génération du maillage et l'exportation du fichier sur Gambit jusqu'à la définition des conditions de résolution et la visualisation des résultats sous Fluent.

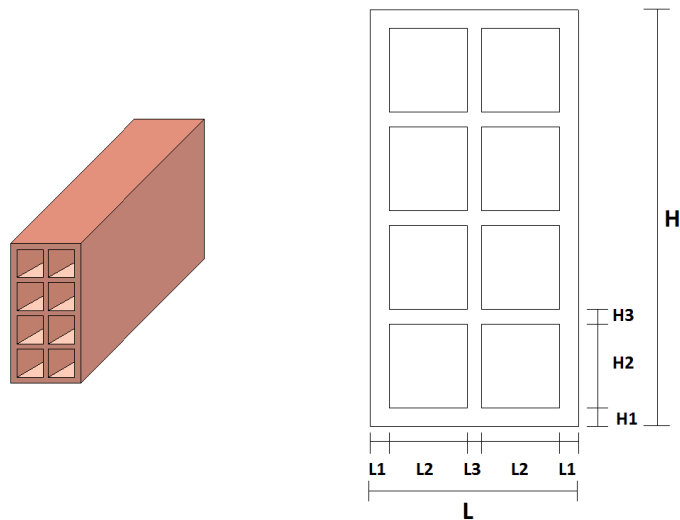
## **CHAPITRE III**

### **Résultats de la Simulation sous Fluent et Discussion**

Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des différents résultats obtenus lors de la simulation numérique. L'objectif consiste à étudier le transfert de chaleur dans des différentes géométries construites et déduire les résistances thermiques.

**3.1. Représentation de différentes configurations :**

**3.1.1. La brique standard :**



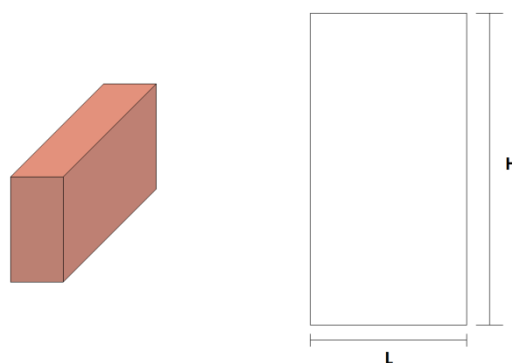
**Figure III.1 :** Représentation de la brique standard

Le tableau III.1 suivant donne les dimensions de la brique standard :

**Tableau III.1 :** Dimensions de la brique standard

Hauteur	Largeur	Longueur
H = 200 mm	L = 100 mm	l = 300 mm
H1 = 9 mm	L1 = 9 mm	
H2 = 40.25 mm	L2 = 37.5 mm	
H3 = 7 mm	L3 = 7 mm	

**3.1.2. La brique pleine :**



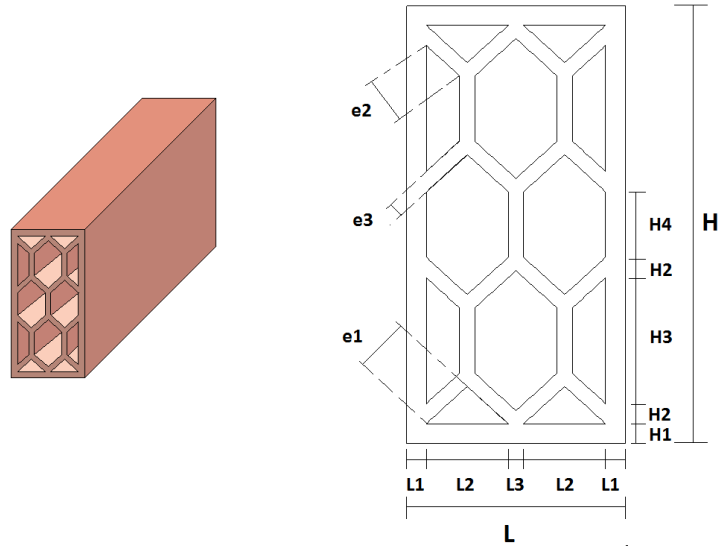
**Figure III.2 :** Représentation de la brique pleine

Le tableau III.2 suivant donne les dimensions de la brique pleine :

**Tableau III.2 :** Dimensions de la brique pleine

Hauteur	Largeur	Longueur
H = 200 mm	L = 100 mm	l = 300 mm

**3.1.3. La brique à trois types de cavités :**



**Figure III.3 :** Représentation de la brique à trois types de cavités

Le tableau III.3 suivant donne les dimensions de la brique à trois types de cavités :

**Tableau III.3 :** Dimensions de la brique à trois types de cavités

Hauteur	Largeur	Epaisseur	Longueur
H = 200 mm	L = 100 mm	e1 = 25.31 mm	l = 300 mm
H1 = 9 mm	L1 = 9 mm	e2 = 20.58 mm	
H2 = 9.235 mm	L2 = 37.5 mm	e3 = 7 mm	
H3 = 57.57 mm	L3 = 7 mm		
H4 = 29.92 mm			

3.1.4. La brique à cavités triangulaires :

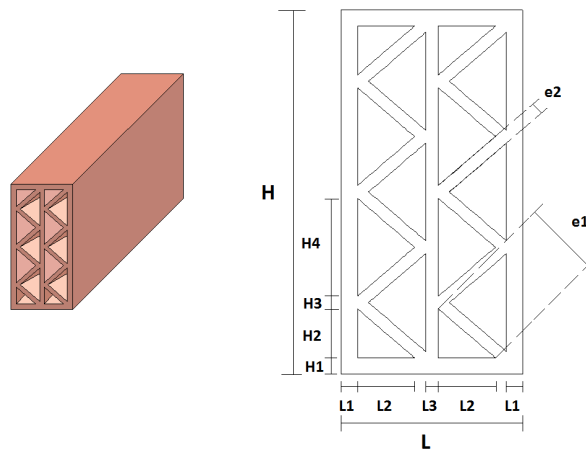


Figure III.4 : Représentation de la brique à cavités triangulaires

Le tableau III.4 suivant donne les dimensions de la brique à cavités triangulaires :

Tableau III.4 : Dimensions de la brique à cavités triangulaires

Hauteur	Largeur	Epaisseur	Longueur
H = 200 mm	L = 100 mm	e1 = 41.33 mm	l = 300 mm
H1 = 9 mm	L1 = 9 mm	e2 = 7 mm	
H2 = 26.83 mm	L2 = 31.44 mm		
H3 = 7 mm	L3 = 7 mm		
H4 = 53.67 mm			

3.1.5. La brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type) :

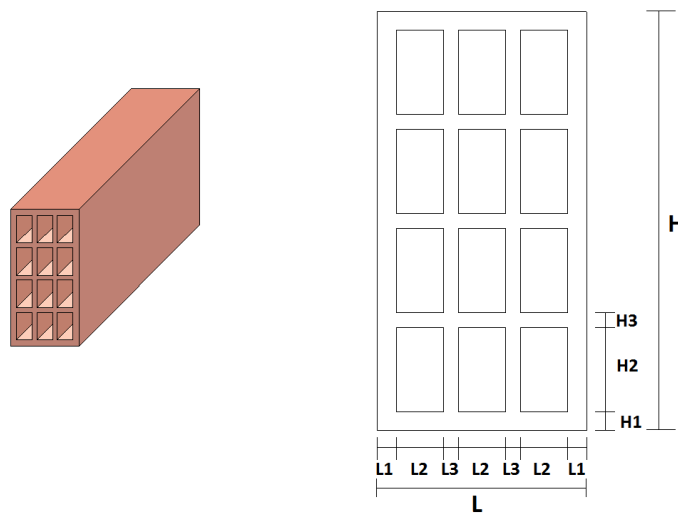


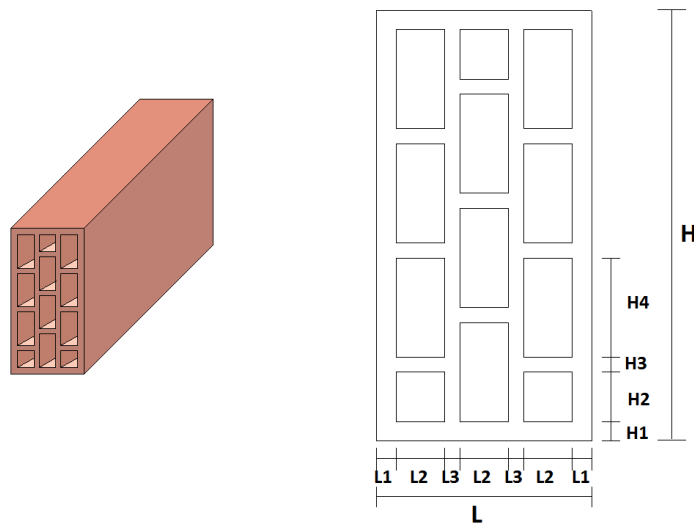
Figure III.5 : Représentation de la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)

Le tableau III.5 suivant donne les dimensions de la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type) :

**Tableau III.5 :** Dimensions de la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)

Hauteur	Largeur	Longueur
H = 200 mm	L = 100 mm	l = 300 mm
H1 = 9 mm	L1 = 9 mm	
H2 = 40.25 mm	L2 = 22.67 mm	
H3 = 7 mm	L3 = 7 mm	

**3.1.6. La brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type) :**



**Figure III.6 :** Représentation de la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

Le tableau III.6 suivant donne les dimensions de la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type) :

**Tableau III.6 :** Dimensions de la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

Hauteur	Largeur	Longueur
H = 200 mm	L = 100 mm	l = 300 mm
H1 = 9 mm	L1 = 9 mm	
H2 = 23 mm	L2 = 22.67 mm	
H3 = 7 mm	L3 = 7 mm	
H4 = 46 mm		

**3.2. Conditions de simulation :**

Les configurations géométriques sont soumises à un gradient de température horizontal. Les conditions aux frontières sont de type Dirichlet (températures imposées) :

La paroi gauche est soumise à une température constante égale à 40°C.

La paroi droite est soumise à une température constante égale à 20°C.

La température moyenne égale à 30°C (303,15K).

Le tableau III.7 suivant donne les propriétés de l'air à la pression atmosphérique :

**Tableau III.7** : Propriétés de l'air à la pression atmosphérique [18]

Température (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp (j/kg.K)	k (W/m.K)	$\mu$ kg/m.S
100	3.6010	1026.6	0.009246	0.6924
150	2.3675	1009.9	0.013735	1.0283
200	1.7684	1006.1	0.01809	1.3289
250	1.4128	1005.3	0.02227	1.5990
300	1.1774	1005.7	0.02624	1.8462
350	0.9980	1009.0	0.03003	2.075

Le tableau III.8 suivant donne les propriétés de l'air à  $T_{moy} = 303.15K$  :

**Tableau III.8** : Propriétés de l'air à  $T_{moy} = 303.15K$

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp (j/kg.K)	k (W/m.K)	$\mu$ kg/m.S	$\beta$ (1/K)
Air	1.1660	1005.9	0.02647	$1.8606 \times 10^{-5}$	0.003298

Le tableau III.9 suivant donne les propriétés de la brique utilisée :

**Tableau III.9** : Propriétés de la brique utilisée [19]

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp (j/kg.K)	k (W/m.K)
Brique	1600	840	0.7

### 3.3. Maillage :

#### 3.3.1. Choix du maillage :

La précision des résultats dépend dans une large mesure de la qualité du maillage utilisé. Le travail fait dans la référence [20] donne une comparaison entre les résultats d'un maillage uniforme et ceux trouvés en utilisant un maillage raffiné aux parois de l'enceinte. Dans un premier temps, nous avons essayé d'utiliser un maillage aux pas d'espace réguliers, mais les résultats trouvés n'étaient pas très satisfaisants. A cause des phénomènes de couche limite, il est apparu évident qu'il était préférable d'utiliser un maillage resserré aux parois. Un maillage structuré est choisi pour la région de convection, tandis qu'un maillage non structuré est sélectionné pour le cadre solide. Ce type de maillage a donc été utilisé pour la suite de l'étude.

Avant de réaliser une simulation numérique, il est donc important de bien choisir un maillage s'adaptant au mieux aux problèmes considérés.

### 3.3.2. Vérification du maillage :

Pour vérifier le maillage sous Gambit, on clique sur l'icône Examine Mesh et on sélectionne l'option [Range], le critère de qualité à vérifier et l'intervalle à vérifier en déplaçant les bornes inférieures et supérieures. Les cellules comprises dans cet intervalle seront alors montrées dans la fenêtre graphique de visualisation. [17]

La mesure la plus importante de la qualité du maillage est l'angle d'inclinaison (EquiAngle Skew). Selon le tableau II.5, pour obtenir un maillage de qualité acceptable sous Gambit, il faut que le coefficient de distorsion (skewness) soit inférieur à la valeur de qualité de 0.8.

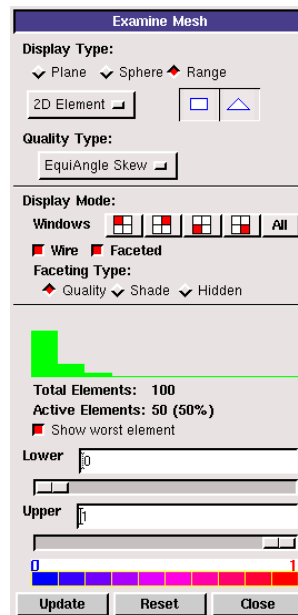


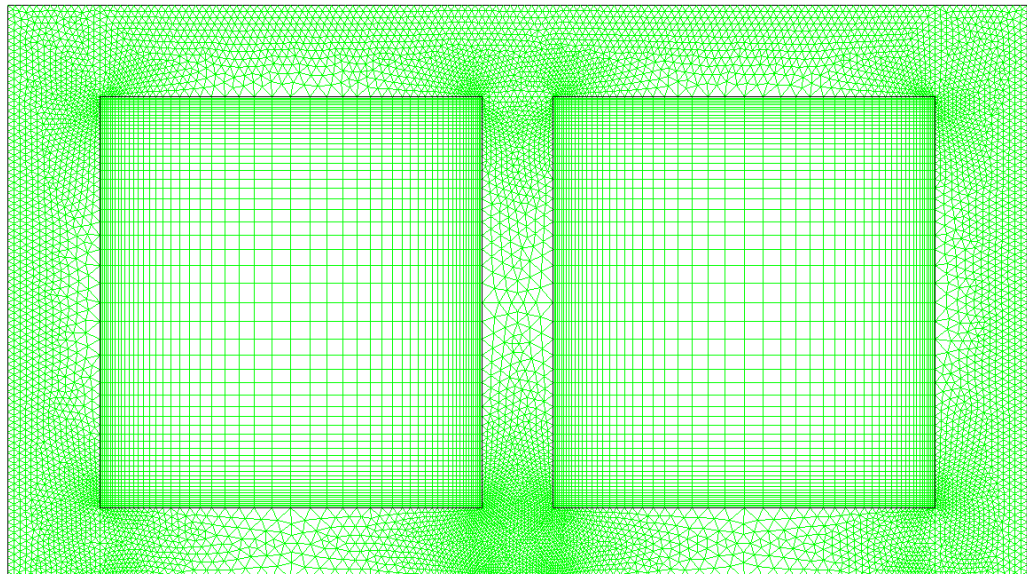
Figure III.7 : Vérification du maillage

### 3.3.3. Indépendance de la solution du maillage :

Pour être sûr du réalisme de la solution obtenue après convergence, le résultat doit être indépendant de la densité du maillage. [17]

- a. La brique standard :

Affichage du maillage :



**Figure III.8 :** Grille étirée,  $60 \times 56$  (grille interne)

Le tableau III.10 suivant donne les valeurs de flux de chaleur traversant la brique standard en utilisant une grille uniforme :

**Tableau III.10 :** Valeurs de flux de chaleur traversant la brique standard en utilisant une grille uniforme

Taille d'intervalle entre deux nœuds	Maillage d'une cavité (nombre d'éléments)	Nombre total des nœuds	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)	Différence absolue (%)
2	$20 \times 19$	6006	2.843	2.672
1.35	$30 \times 28$	12854	2.808	1.408
1	$40 \times 38$	23456	2.793	0.867
0.67	$60 \times 56$	44253	2.782	0.469
0.51	$80 \times 74$	79401	2.776	0.253
0.34	$120 \times 112$	179400	2.771	0.072
0.25	$160 \times 149$	318003	2.769	0.000

Les résultats dans le tableau III.10 suggèrent que la solution avec  $160 \times 149$  (grille interne) peut être considérée comme une solution de référence.

Le résultat avec  $120 \times 112$  (grille interne) est une solution indépendante de la densité du maillage.

Le tableau III.11 suivant donne les valeurs de flux de chaleur traversant la brique standard en utilisant une grille étirée :

**Tableau III.11** : Valeurs de flux de chaleur traversant la brique standard en utilisant une grille étirée

Taille d'intervalle entre deux nœuds	Maillage d'une cavité (nombre d'éléments)	Nombre total des nœuds	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)	Différence absolue (%)
2	20 × 19	6006	2.799	0.901
1.35	30 × 28	12854	2.788	0.505
1	40 × 38	23456	2.783	0.324
0.67	60 × 56	44253	2.776	0.072
0.51	80 × 74	79401	2.774	0.000

Le tableau III.11 résume l'effet du raffinement du maillage sur le flux de chaleur calculé :

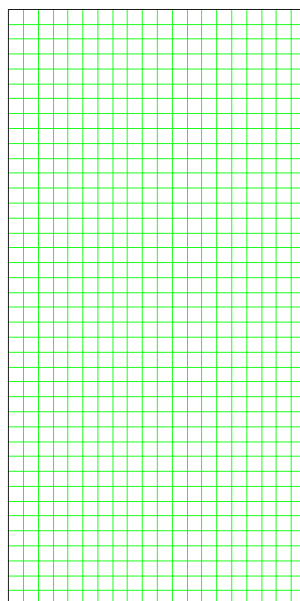
Les résultats dans tableau III.11 suggèrent que la solution avec 80 × 74 (grille interne) peut être considérée comme une solution de référence.

Le résultat avec 60 × 56 (grille interne) est une solution indépendante de la densité du maillage.

Le tableau III.11 montre que la convergence pour la grille étirée est meilleure que celle de la grille uniforme.

- **b. La brique pleine :**

**Affichage du maillage :**



**Figure III.9** : Grille uniforme, 40 × 20

Le tableau III.12 suivant donne les valeurs de flux de chaleur traversant la brique pleine :

**Tableau III.12 :** Valeurs de flux de chaleur traversant la brique pleine

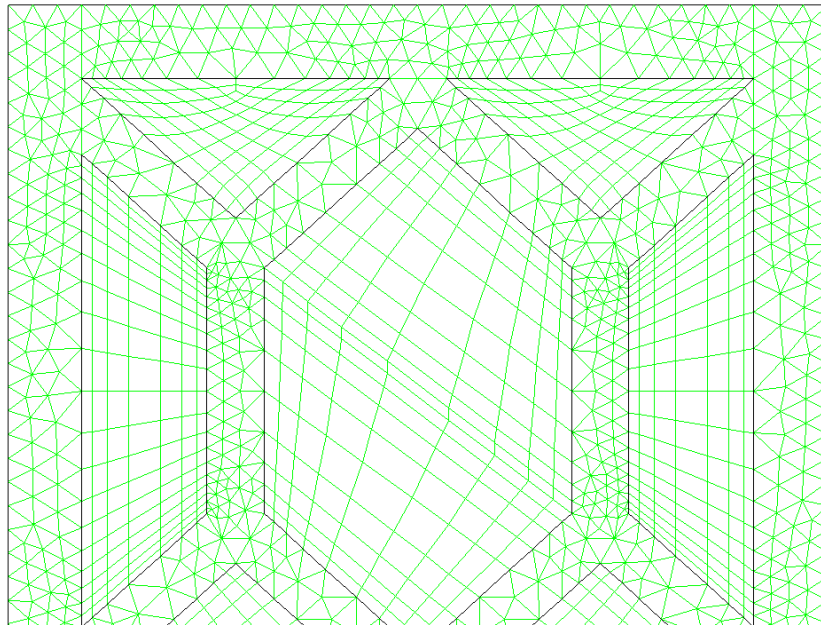
Taille d'intervalle entre deux nœuds	Nombre d'éléments	Nombre total des nœuds	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)	Différence absolue (%)
5	40 × 20	861	8.399999	0.000060
3.33	60 × 30	1891	8.399994	0.000000

Les résultats dans le tableau III.12 suggèrent que la solution avec 60 × 30 peut être considérée comme une solution de référence.

Le résultat avec 40 × 20 est une solution indépendante de la densité du maillage.

- **c. La brique à trois types de cavités :**

**Affichage du maillage :**



**Figure III.10 :** Grille étirée, 20 × 7, 14 × 9, 10 × 9 (grilles internes)

Le tableau III.13 suivant donne les valeurs de flux de chaleur traversant la brique à trois types de cavités :

**Tableau III.13 :** Valeurs de flux de chaleur traversant la brique à trois types de cavités

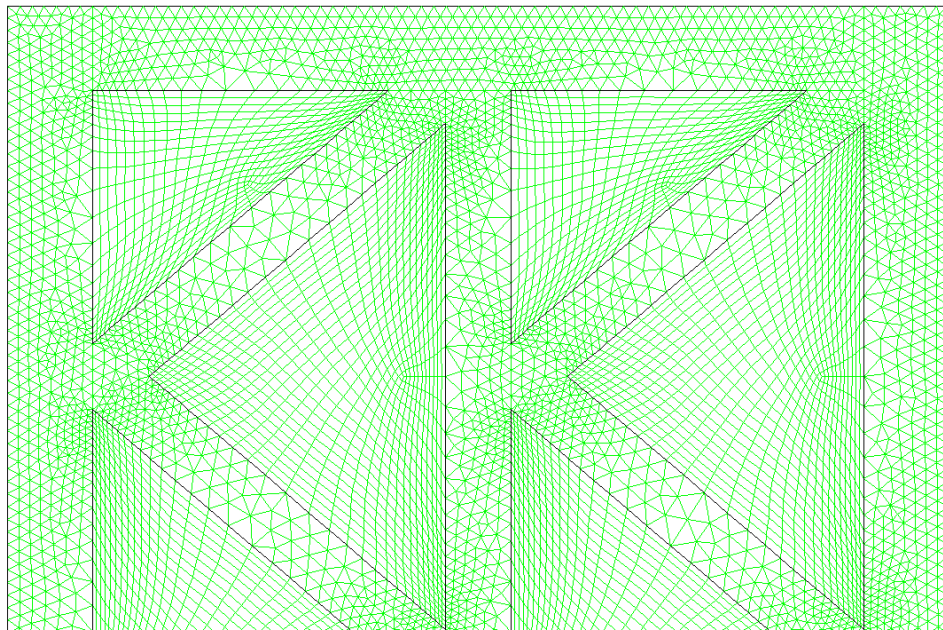
Taille d'intervalle entre deux nœuds	Maillage de la cavité trapézoïdale (nombre d'éléments)	Maillage de la cavité triangulaire (nombre d'éléments)	Maillage de la cavité en nid d'abeille (nombre d'élément)	Nombre total des nœuds	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)	Différence absolue (%)
2.88	20 × 7	14 × 9	10 × 9	3064	2.6067	0.0192
1.92	30 × 11	20 × 13	16 × 13	7003	2.6072	0.0000

Les résultats dans le tableau III.13 suggèrent que la solution avec  $30 \times 11$ ,  $20 \times 13$ ,  $16 \times 13$  (grilles internes) peut être considérée comme une solution de référence.

Le résultat avec  $20 \times 7$ ,  $14 \times 9$ ,  $10 \times 9$  (grilles internes) est une solution indépendante de la densité du maillage.

- **d. La brique à cavités triangulaires :**

Affichage du maillage :



**Figure III.11 :** Grille étirée,  $40 \times 31$ ,  $31 \times 23 \times 20$  (grilles internes)

Le tableau III.14 suivant donne les valeurs de flux de chaleur traversant la brique à cavités triangulaires :

**Tableau III.14 :** Valeurs de flux de chaleur traversant la brique à cavités triangulaires

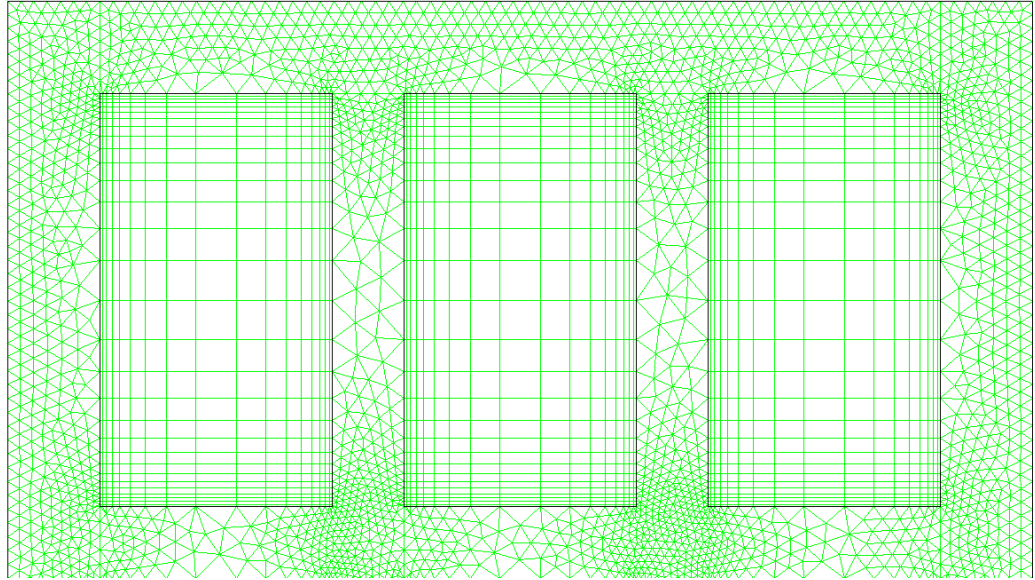
Taille d'intervalle entre deux nœuds	Maillage d'une cavité triangulaire (nombre d'éléments)	Maillage d'une cavité triangle rectangle (nombre d'éléments)	Nombre total des nœuds	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)	Différence absolue (%)
2.68	$20 \times 15$	$15 \times 12 \times 10$	4395	2.607	1.479
1.79	$30 \times 23$	$23 \times 18 \times 15$	9766	2.574	0.195
1.34	$40 \times 31$	$31 \times 23 \times 20$	17216	2.568	0.039
0.89	$60 \times 46$	$46 \times 36 \times 30$	38132	2.569	0.000

Les résultats dans le tableau III.14 suggèrent que la solution avec  $60 \times 46$ ,  $46 \times 36 \times 30$  (grilles internes) peut être considérée comme une solution de référence.

Le résultat avec  $40 \times 31$ ,  $31 \times 23 \times 20$  (grilles internes) est une solution indépendante de la densité du maillage.

- e. La brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type) :

Affichage du maillage :



**Figure III.12 :** Grille étirée,  $30 \times 17$  (grille interne)

Le tableau III.15 suivant donne les valeurs de flux de chaleur traversant la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type) :

**Tableau III.15 :** Valeurs de flux de chaleur traversant la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)

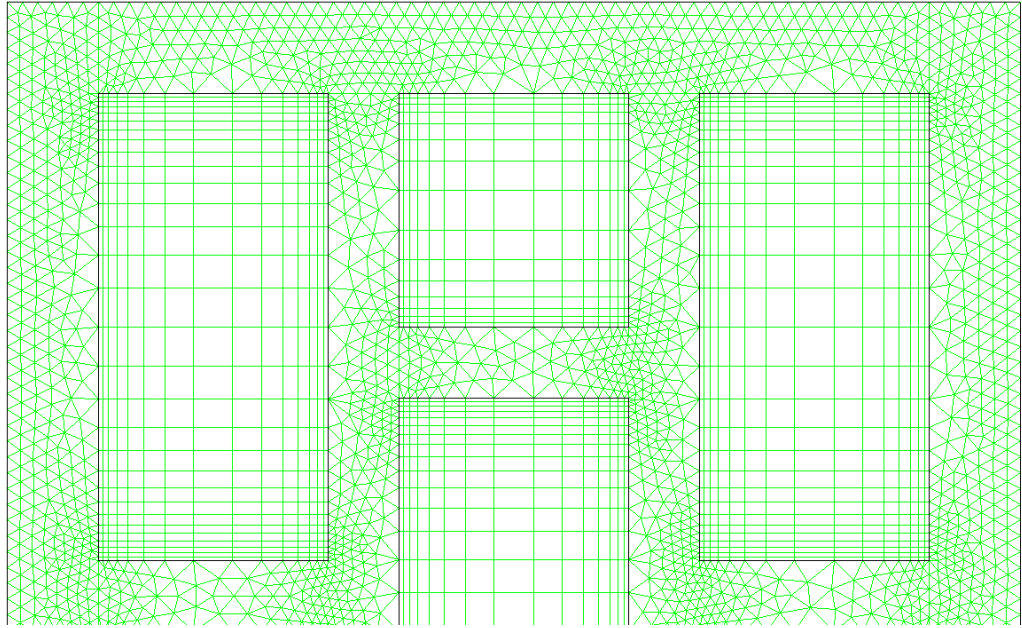
Taille d'intervalle entre deux nœuds	Maillage d'une cavité (nombre d'éléments)	Nombre total des nœuds	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)	Différence absolue (%)
2	$20 \times 11$	5904	2.493	0.322
1.35	$30 \times 17$	13222	2.487	0.080
1	$40 \times 23$	23573	2.485	0.000

Les résultats dans le tableau III.15 suggèrent que la solution avec  $40 \times 23$  (grille interne) peut être considérée comme une solution de référence.

Le résultat avec  $30 \times 17$  (grille interne) est une solution indépendante de la densité du maillage.

- f. La brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type) :

Affichage du maillage :



**Figure III.13 :** Grille étirée,  $30 \times 15$ ,  $15 \times 15$  (grilles internes)

Le tableau III.16 suivant donne les valeurs de flux de chaleur traversant la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type) :

**Tableau III.16 :** Valeurs de flux de chaleur traversant la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

Taille d'intervalle entre deux nœuds	Maillage de la grande cavité (nombre d'éléments)	Maillage de la petite cavité (nombre d'éléments)	Nombre total des nœuds	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)	Différence absolue (%)
2.25	$20 \times 10$	$10 \times 10$	4538	2.3496	0.3266
1.55	$30 \times 15$	$15 \times 15$	10050	2.3570	0.0127
1.15	$40 \times 20$	$20 \times 20$	17795	2.3573	0.0000

Les résultats dans le tableau III.16 suggèrent que la solution avec  $40 \times 20$ ,  $20 \times 20$  (grilles internes) peut être considérée comme une solution de référence.

Le résultat avec  $30 \times 15$ ,  $15 \times 15$  (grilles internes) est une solution indépendante de la densité du maillage.

3.4. Résultats du calcul numérique :

3.4.1. La brique standard :

Champs de température :

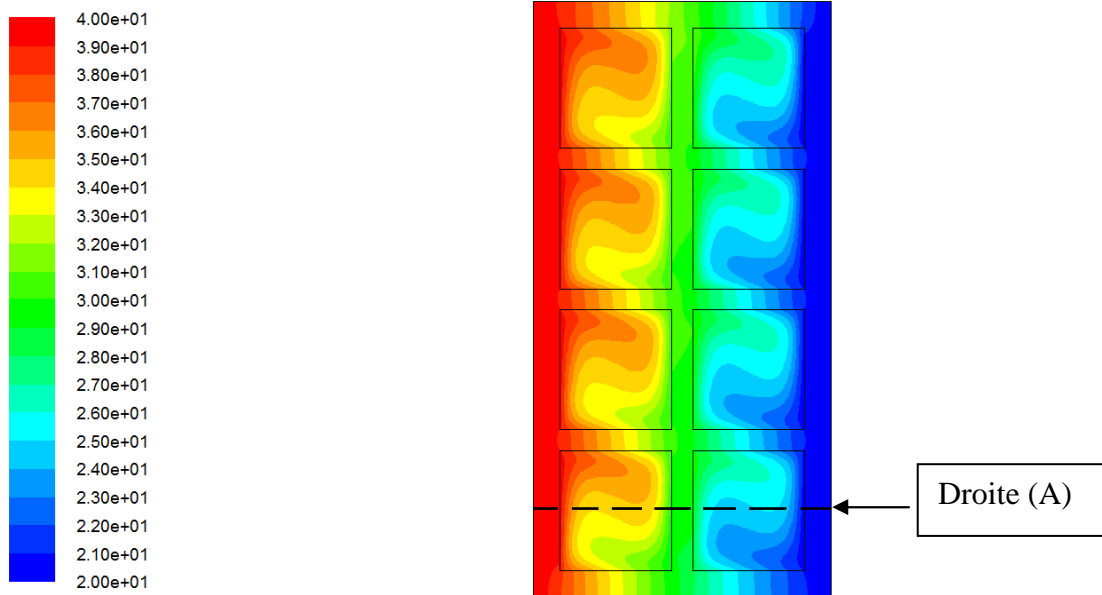


Figure III.14 : Evolution de la température dans la brique standard

Les isothermes :

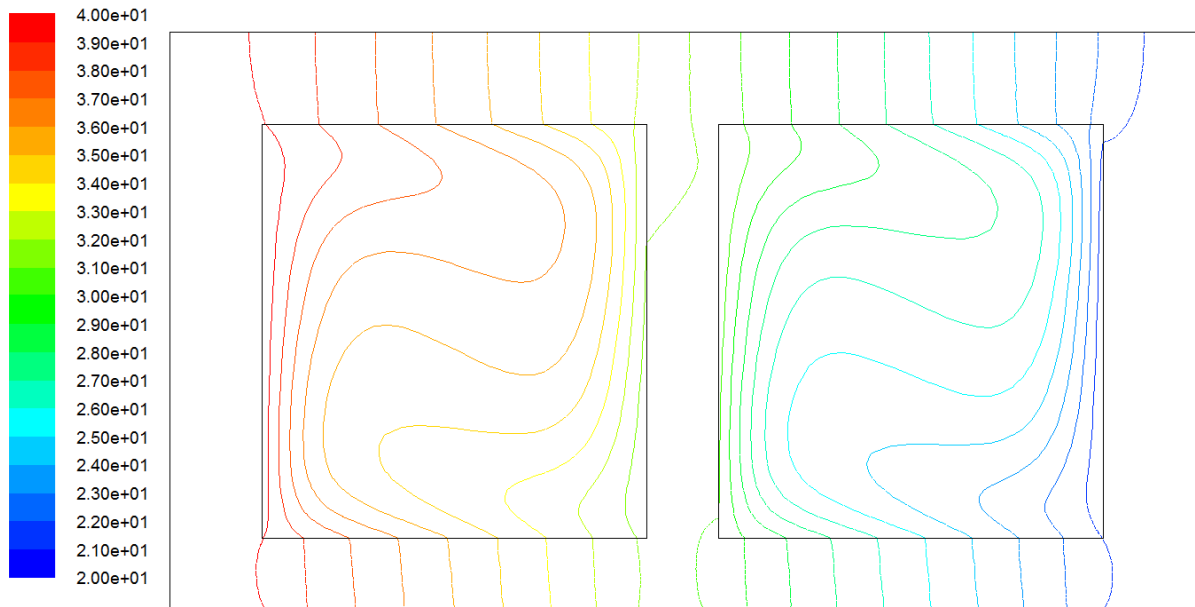
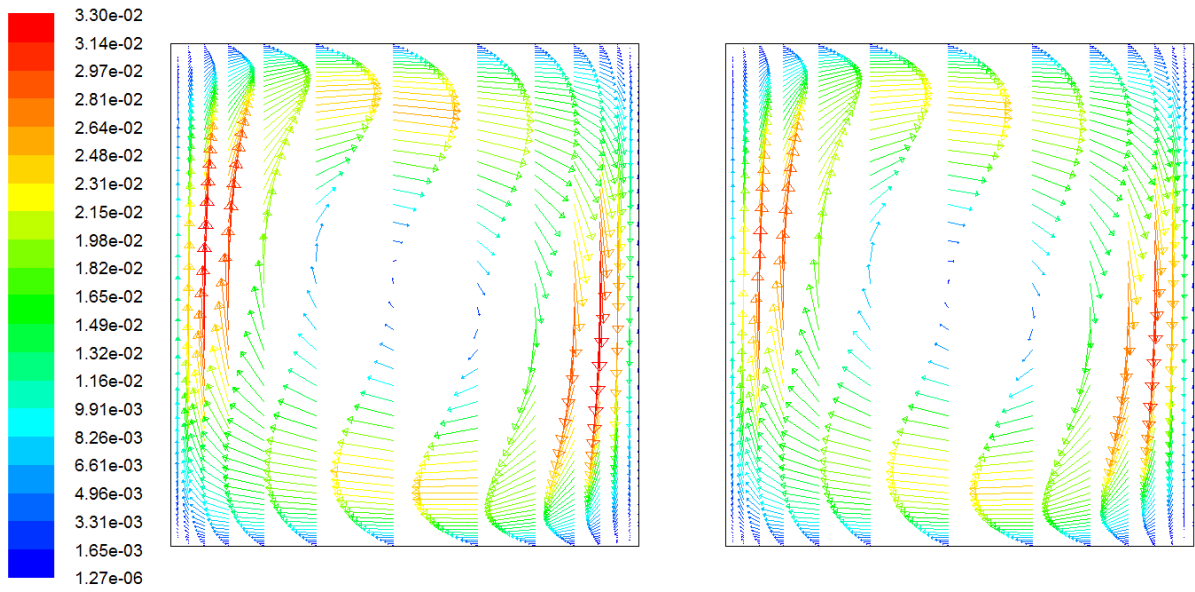


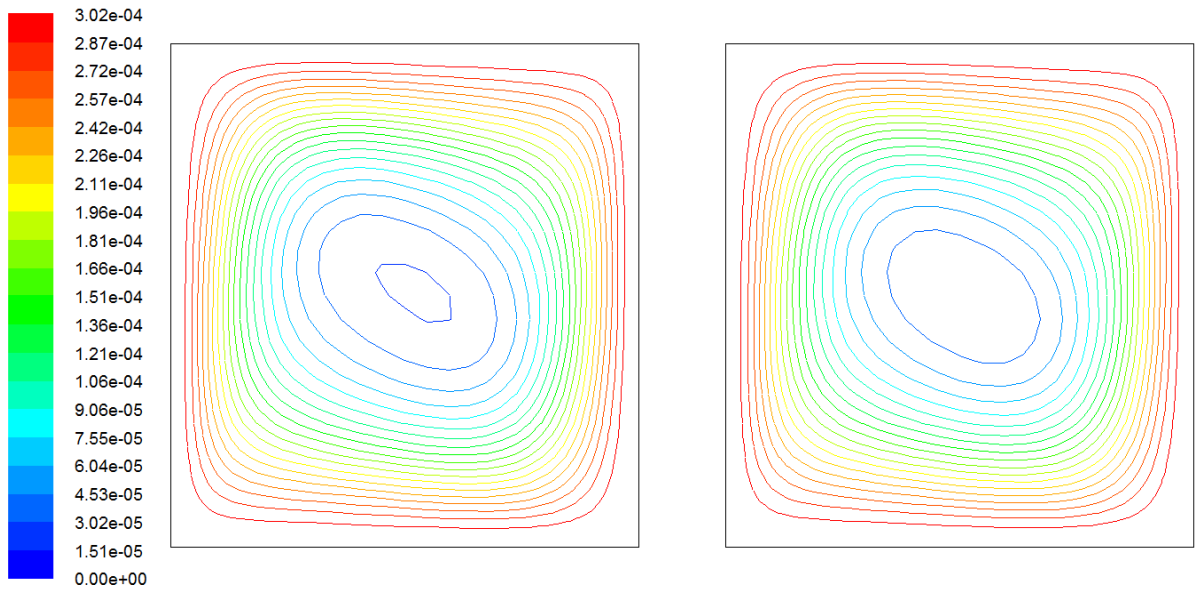
Figure III.15 : Répartition des isothermes dans la brique standard

**Vecteurs de vitesse dans les cellules :**

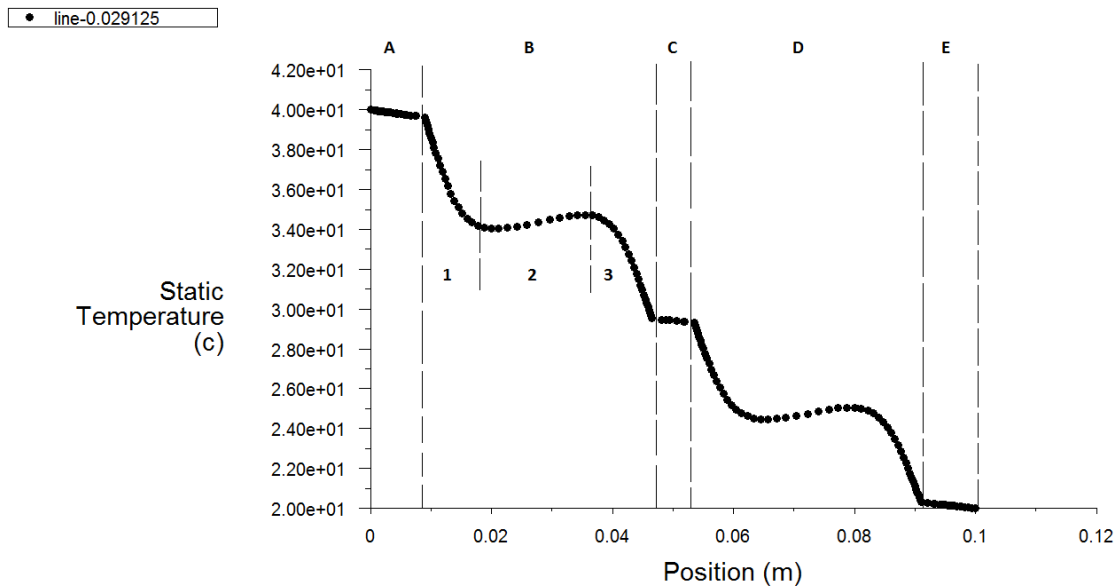


**Figure III.16 :** Affichage des vecteurs de vitesse dans les cavités de la brique standard

**Lignes de courant :**



**Figure III.17 :** Evolution des lignes de courant dans les cavités de la brique standard

**Evolution de la température à  $Y = 29.125$  mm (Droite (A)) :****Figure III.18 :** Evolution de la température à  $Y = 29.125$  mm (Droite (A))

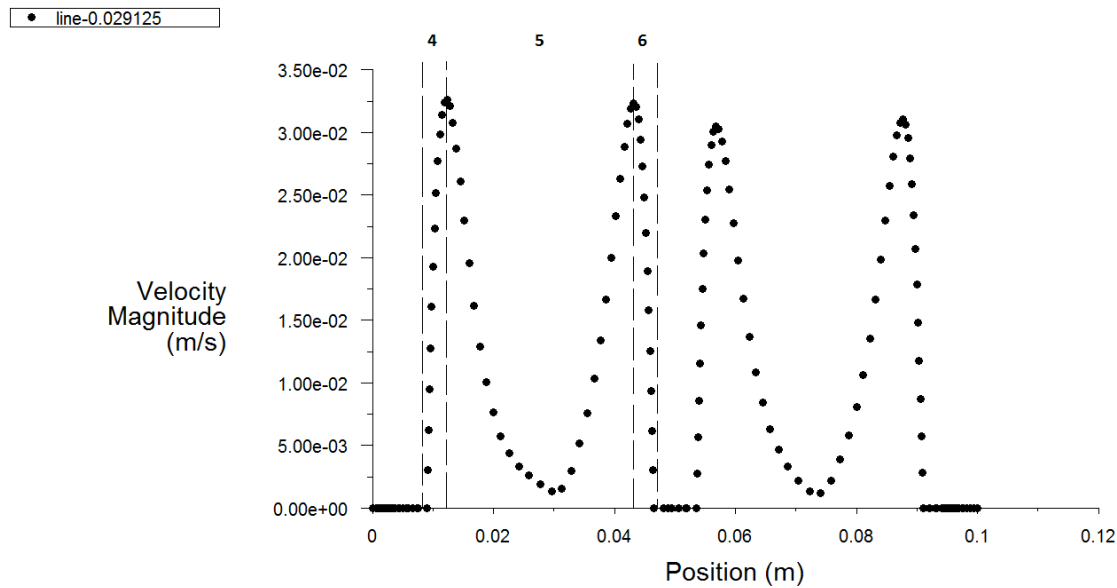
Les zones (A), (C), (E) : le profil de température est linéaire, ce qui veut dire que le transfert de chaleur se fait par conduction (la zone solide).

Les zones (B) et (D) : le transfert de chaleur se fait par convection (la zone fluide) :

La zone (1) : représente l'évolution de la température du fluide (air) à l'intérieur de la couche limite thermique du fluide adjacent à la face chaude.

La zone (3) : représente l'évolution de la température du fluide à l'intérieur de la couche limite thermique du fluide adjacent à la face froide.

La zone (2) : en dehors des couches limites thermiques, la température est plus ou moins uniforme.

**Evolution de la vitesse à  $Y = 29.125$  mm (Droite (A)) :****Figure III.19 :** Evolution de la vitesse à  $Y = 29.125$  mm

La zone (4) : représente l'évolution de la vitesse dans la couche limite dynamique du fluide ascendant.

La zone (6) : représente l'évolution de la vitesse dans la couche limite dynamique du fluide descendant.

La zone (5) : représente l'évolution de la vitesse du fluide en dehors des couches limites dynamiques.

Le fluide (air) se déplace sous effet de variation de sa masse volumique.

**Remarque et conclusion :**

A travers la figure III.14, on remarque l'existence des ponts thermiques qui facilitent la diffusion de la chaleur dans la brique.

Dans la figure III.15, on constate une présence de la convection dans les milieux confinés.

La figure III.16 représente des boucles de vitesse et donne le sens d'écoulement de fluide (l'air) dans les cellules.

La figure III.17 donne l'évolution des lignes de courant dans les cavités. On remarque que le fluide s'écoule le long de la paroi en filets qui restent parallèles (le régime d'écoulement est laminaire).

Les figures III.18 et III.19 montrent que le transfert de chaleur à l'intérieur des cavités se fait par convection.

Tout cela confirme que la résistance thermique de la brique standard est faible.

3.4.2. La brique pleine :

Champs de température :

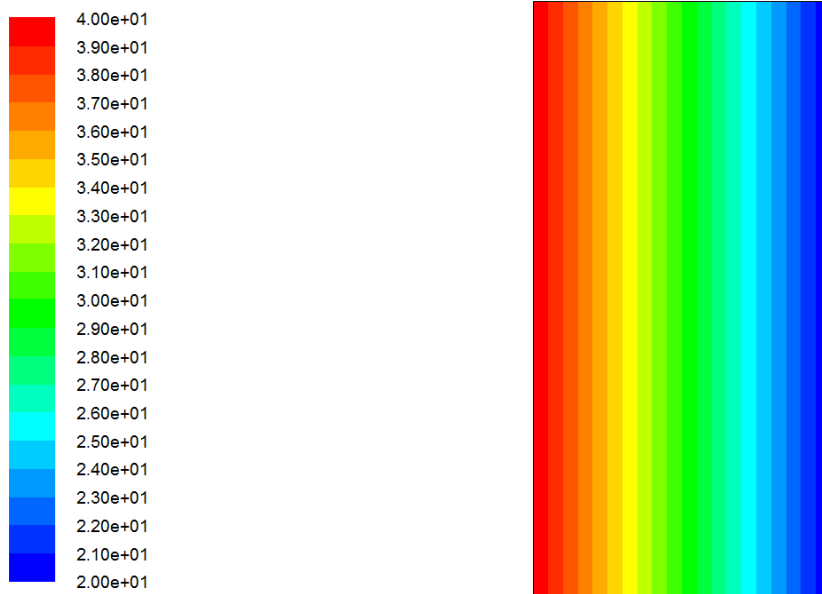


Figure III.20 : Evolution de la température dans la brique pleine

Les isothermes :

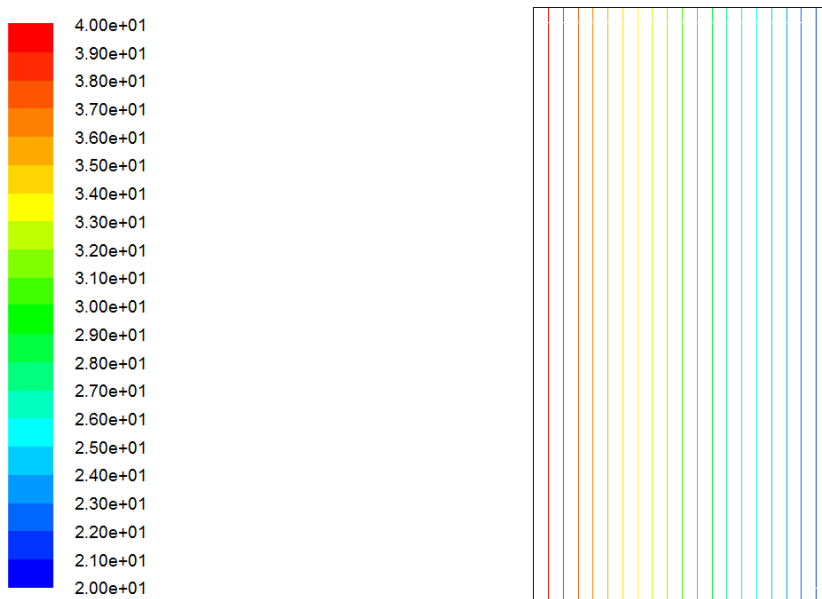


Figure III.21 : Répartition des isothermes dans la brique pleine

Evolution de la température dans la brique pleine :

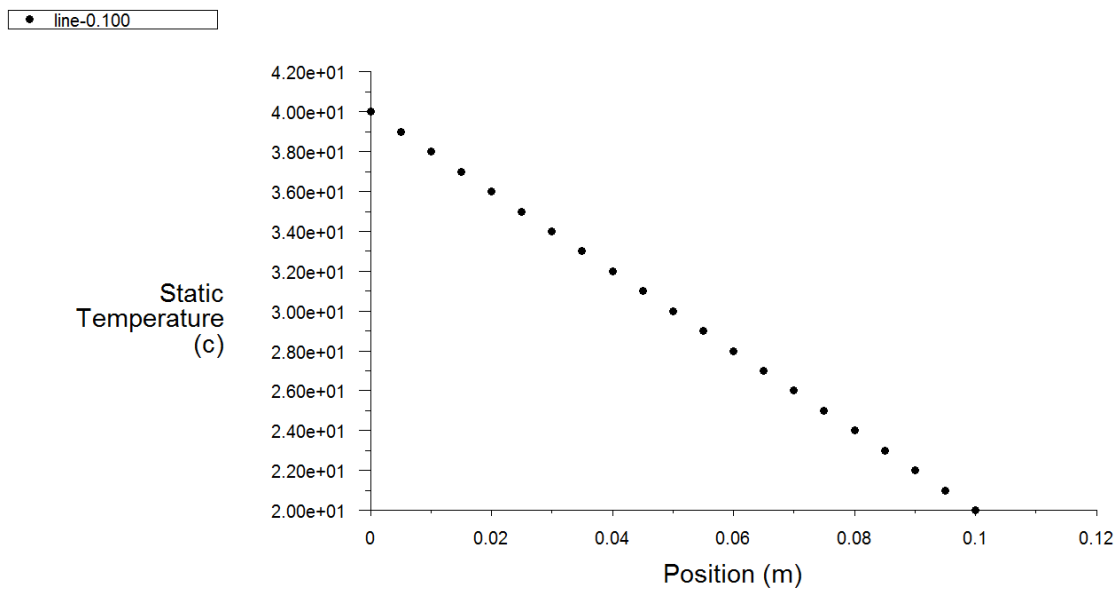


Figure III.22 : Evolution de la température dans la brique pleine

Remarque et conclusion :

En comparant la brique standard à la brique pleine, on comprend le rôle des cavités dans l'isolation thermique.

3.4.3. La brique à trois types de cavités :

Champs de température :

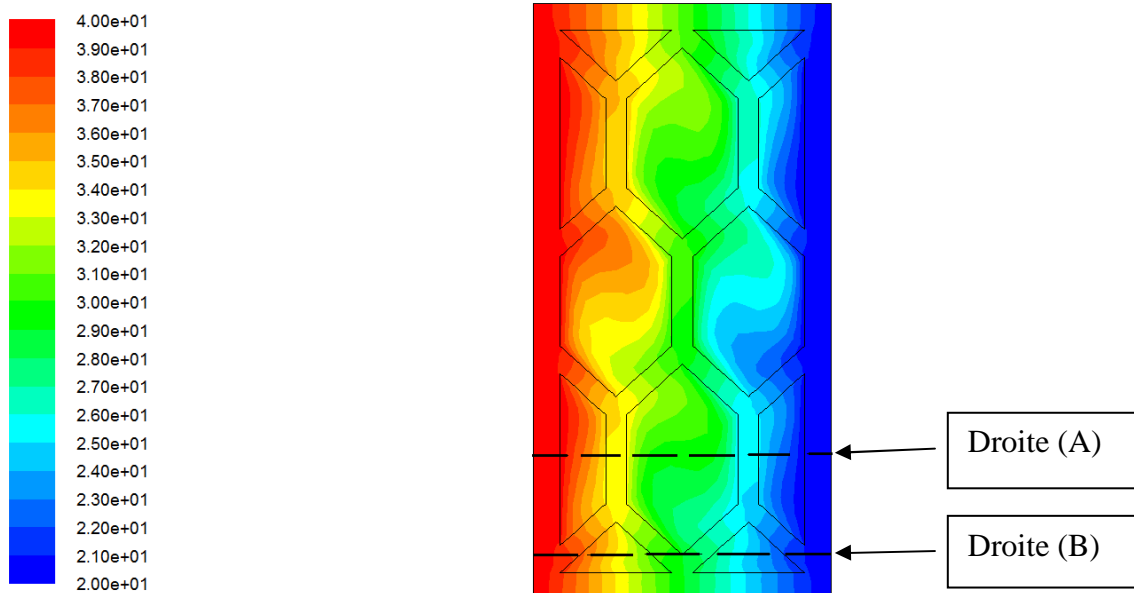


Figure III.23 : Evolution de la température dans la brique à trois types de cavités

Les isothermes :

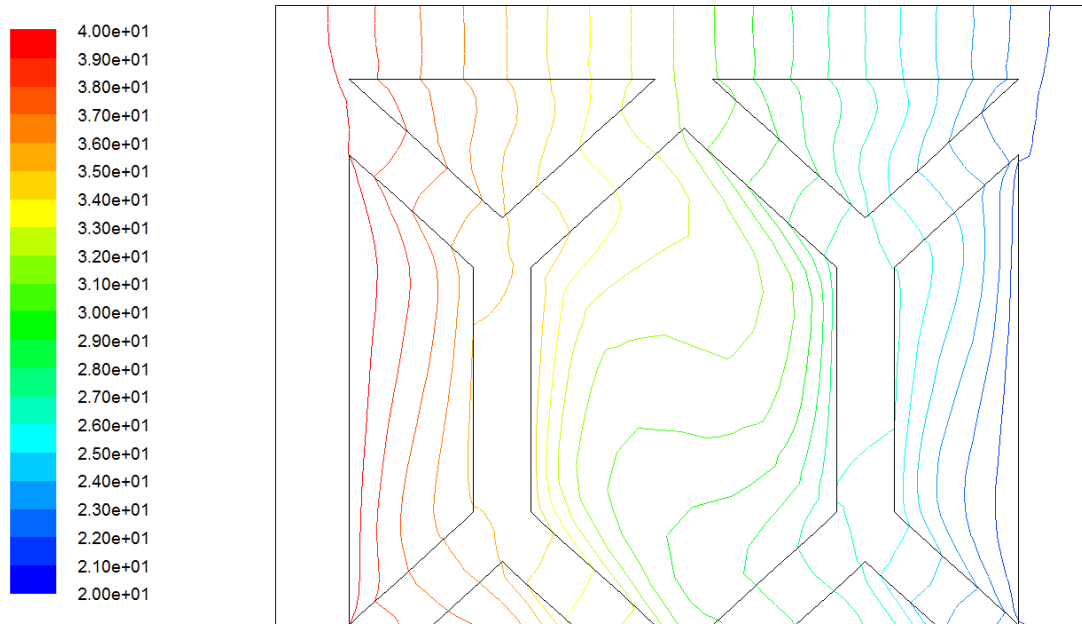


Figure III.24 : Répartition des isothermes dans la brique à trois types de cavités

Lignes de courant :

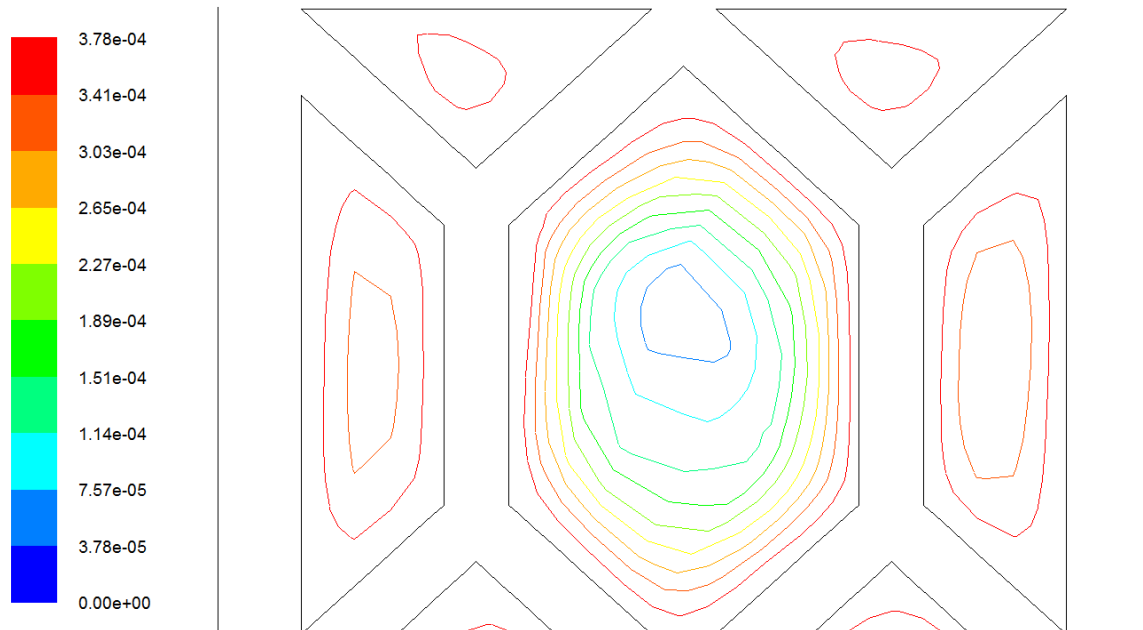
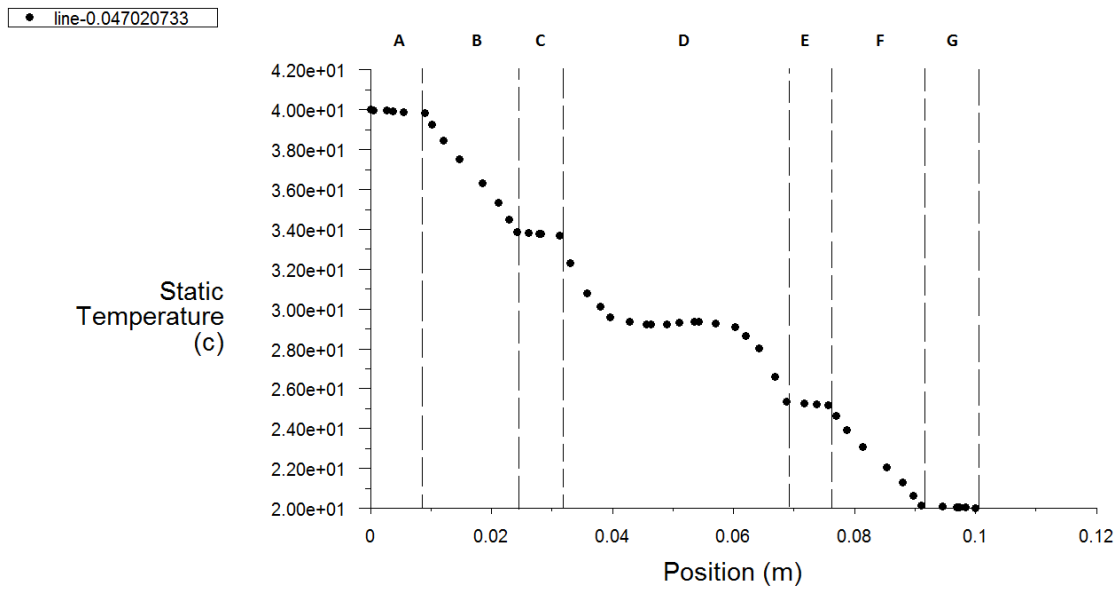


Figure III.25 : Evolution des lignes de courant dans la brique à trois types de cavités

**Evolution de la température à Y = 47.02 mm (Droite (A)) :**



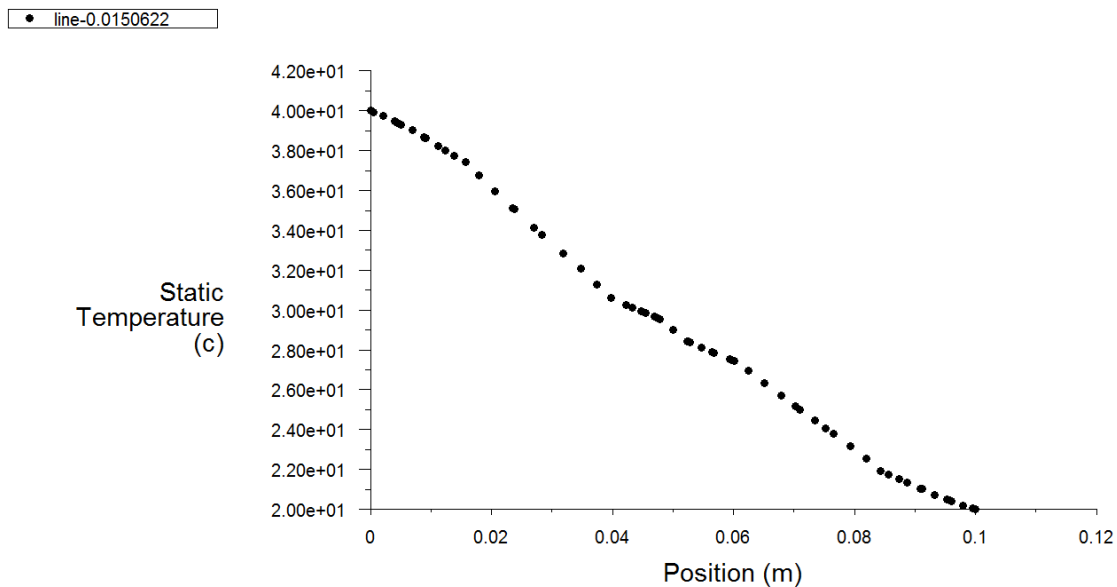
**Figure III.26 :** Evolution de la température à Y = 47.02 mm (Droite (A))

Les zones (A), (C), (E), et (G) : le profil de température est linéaire, ce qui veut dire que le transfert de chaleur se fait par conduction (la zone solide).

Les zones (B) et (F) : le profil de température est presque linéaire, ce qui veut dire que le transfert de chaleur à l'intérieur des cavités trapézoïdales se fait par conduction.

La zone (D) : le transfert de chaleur dans les cavités en nid d'abeille se fait par convection.

**Evolution de la température à Y = 15.06 mm (Droite (B)) :**



**Figure III.27 :** Evolution de la température à Y = 15.06 mm (Droite (B))

Le profil de température est presque linéaire, ce qui veut dire que le transfert de chaleur à l'intérieur des cavités triangulaires se fait par conduction.

**Remarque et conclusion :**

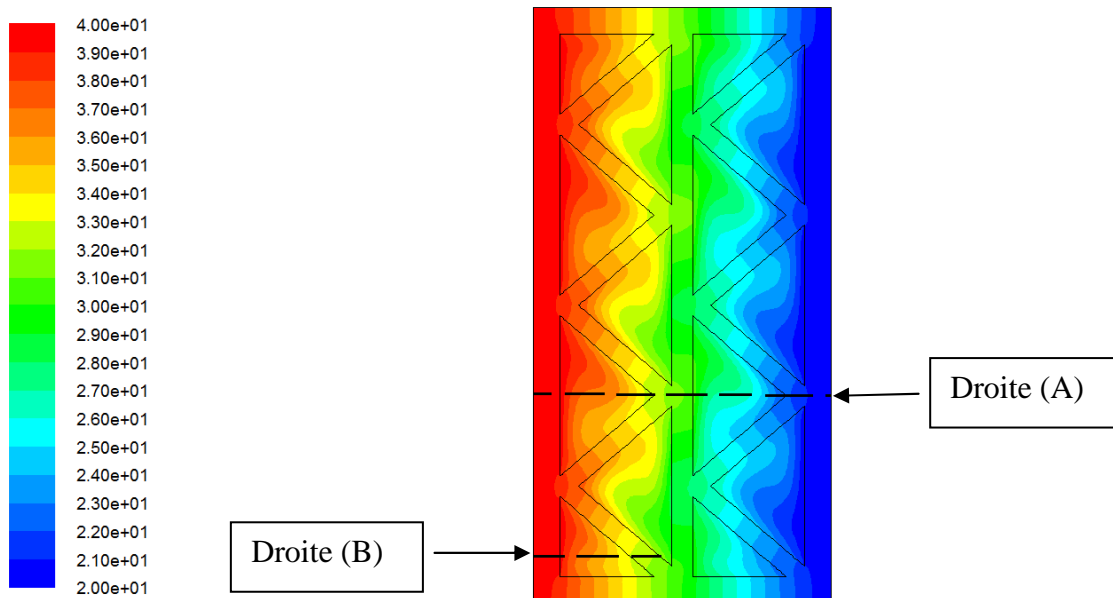
A travers la figure III.23, on remarque que les parois inclinées des cavités nous permettent de rompre les ponts thermiques et réduire ainsi le transfert par conduction.

Dans la figure III.24, la répartition des isothermes indique une présence de la convection dans les cavités en nid d'abeille et une présence réduite de la convection dans les cavités trapézoïdales et les cavités triangulaires. Ce qui est confirmé par le profil de température.

D'après ces résultats, on peut conclure qu'il faut réduire la section des cavités en nid d'abeille pour augmenter plus la résistance thermique de la brique.

**3.4.4. La brique à cavités triangulaires :**

**Champs de température :**



**Figure III.28 :** Evolution de la température dans la brique à cavités triangulaires

Les isothermes :

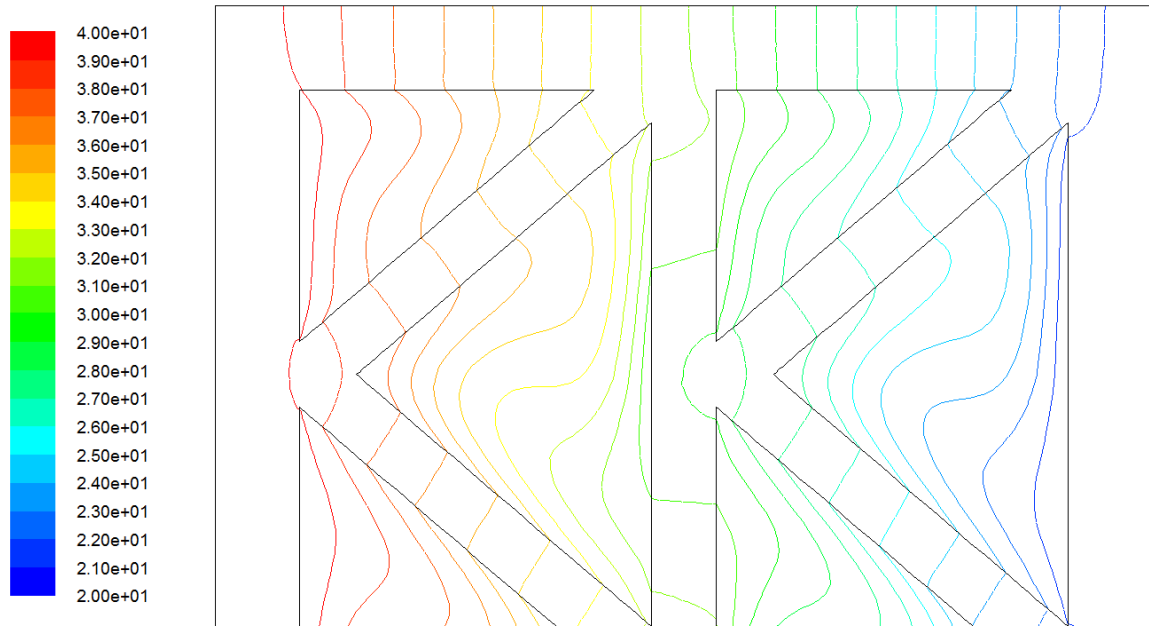


Figure III.29 : Répartition des isothermes dans la brique à cavités triangulaires

Lignes de courant :

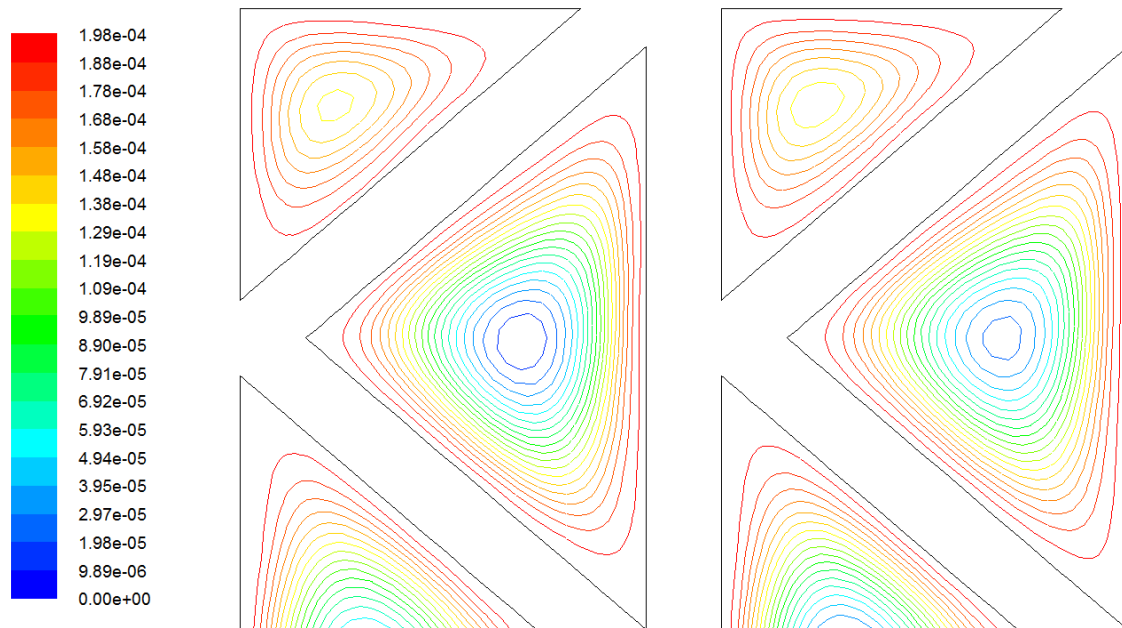
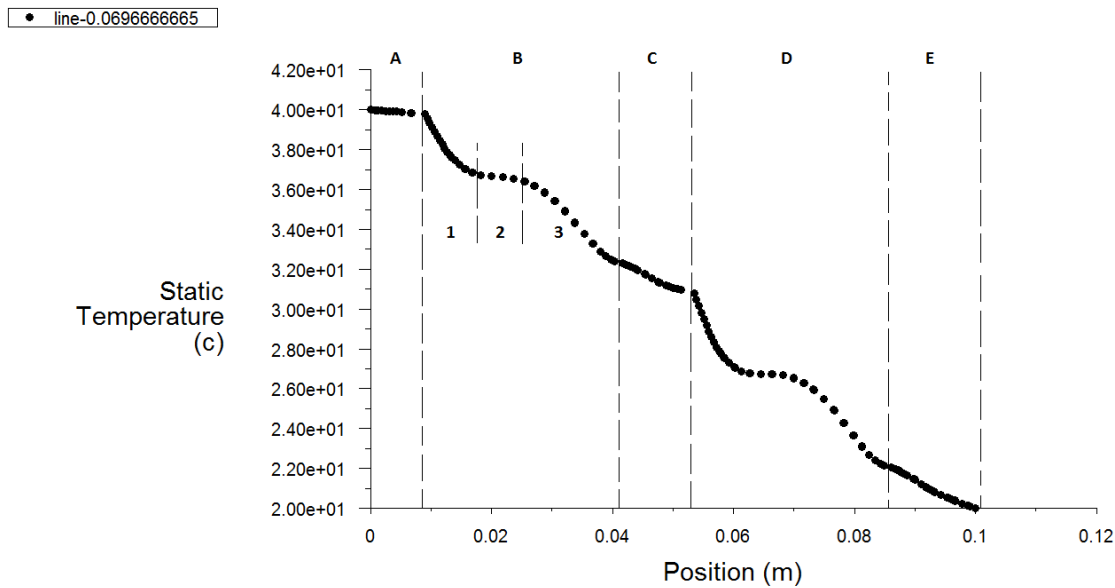


Figure III.30 : Evolution des lignes de courant dans la brique à cavités triangulaires

### Evolution de la température à $Y = 69.67$ mm (Droite (A)) :



**Figure III.31** : Evolution de la température dans les cavités triangulaires

Les zones (A), (C) et (E) : le profil de température est linéaire, ce qui veut dire que le transfert de chaleur se fait par conduction (la zone solide).

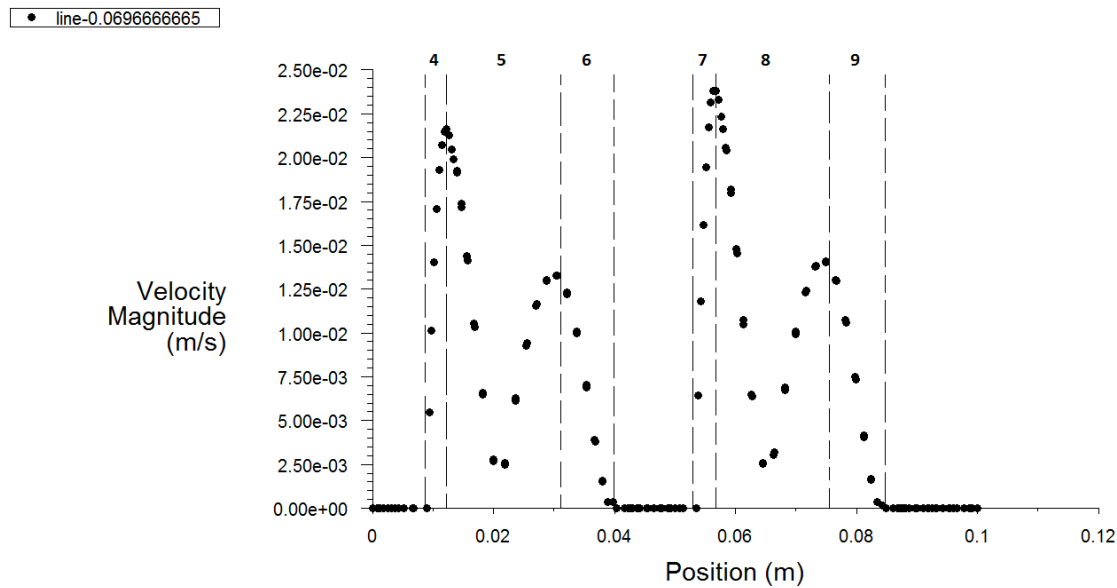
Les zones (B) et (D) : le transfert de chaleur se fait par convection (la zone fluide) :

La zone (1) : représente l'évolution de la température du fluide (air) à l'intérieur de la couche limite thermique du fluide adjacent à la face chaude.

La zone (3) : représente l'évolution de la température du fluide à l'intérieur de la couche limite thermique du fluide adjacent à la face froide. L'épaisseur de la couche limite thermique dans cette zone est plus importante que celle de la zone (1).

La zone (2) : en dehors des couches limites thermiques, la température est plus ou moins uniforme.

### Evolution de la vitesse à $Y = 69.67$ mm (Droite (A)) :



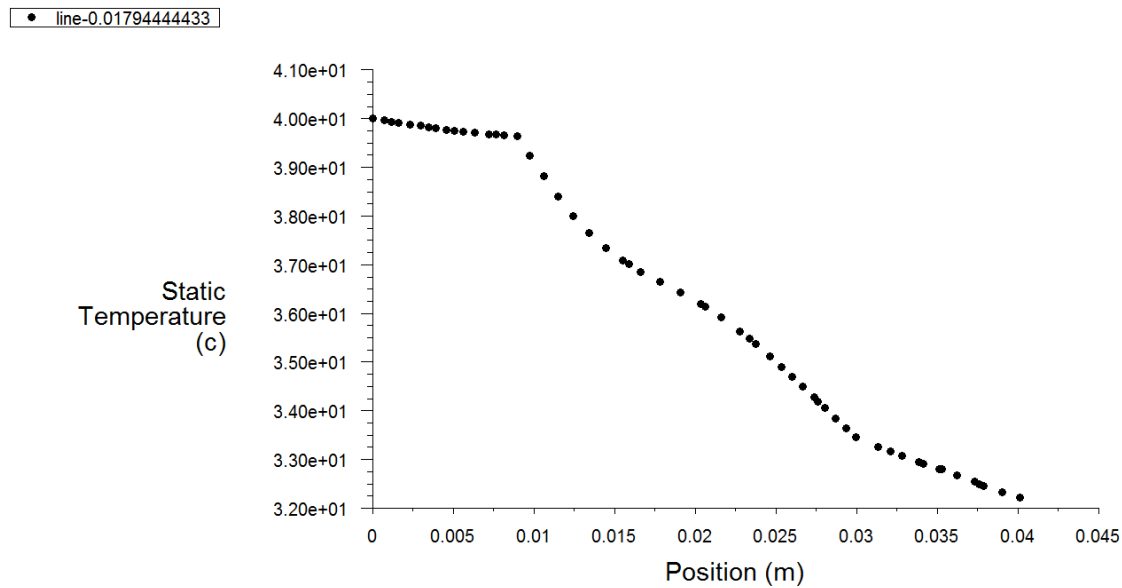
**Figure III.32 :** Evolution de la vitesse dans les cavités triangulaires

Les zones (4) et (7) : représentent l'évolution de la vitesse dans la couche limite dynamique du fluide ascendant.

On remarque que la valeur de la vitesse maximale est atteinte dans la zone (7) à cause de fait que les parois inclinées créent des zones chaudes.

Les zones (6) et (9) : représentent l'évolution de la vitesse dans la couche limite dynamique du fluide descendant. L'épaisseur de la couche limite dynamique est plus important que celle des zones (4) et (7) avec des vitesses moins importantes, cela revient à l'inclinaison des parois des cellules.

Les zones (5) et (8) : représentent l'évolution de la vitesse du fluide (air) en dehors des couches limites dynamiques.

**Evolution de la température à Y = 17.94 mm (Droite (B)) :****Figure III.33 :** Evolution de la température à Y = 17.94 mm (Droite (B))

Le profil de température est presque linéaire, ce qui veut dire que le transfert de chaleur à l'intérieur des cavités triangle-rectangle se fait par conduction.

**Remarque et conclusion :**

On remarque dans la figure III.28 que cette géométrie nous permet d'éviter la présence des ponts thermiques. D'un autre côté, le profil de vitesse illustré dans la figure III.32 montre que les parois inclinées créent des zones chaudes dans la paroi verticale intérieure de la brique. Dans la figure III.29, on constate une présence de la convection dans les cavités triangulaires et une présence réduite de la convection dans les cavités triangle-rectangle. Ce qui est confirmé par le profil de température et le profil de vitesse.

Pour augmenter la résistance thermique de la brique, il faut réduire la section des cavités triangulaires.

3.4.5. La brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type) :

Champs de température :

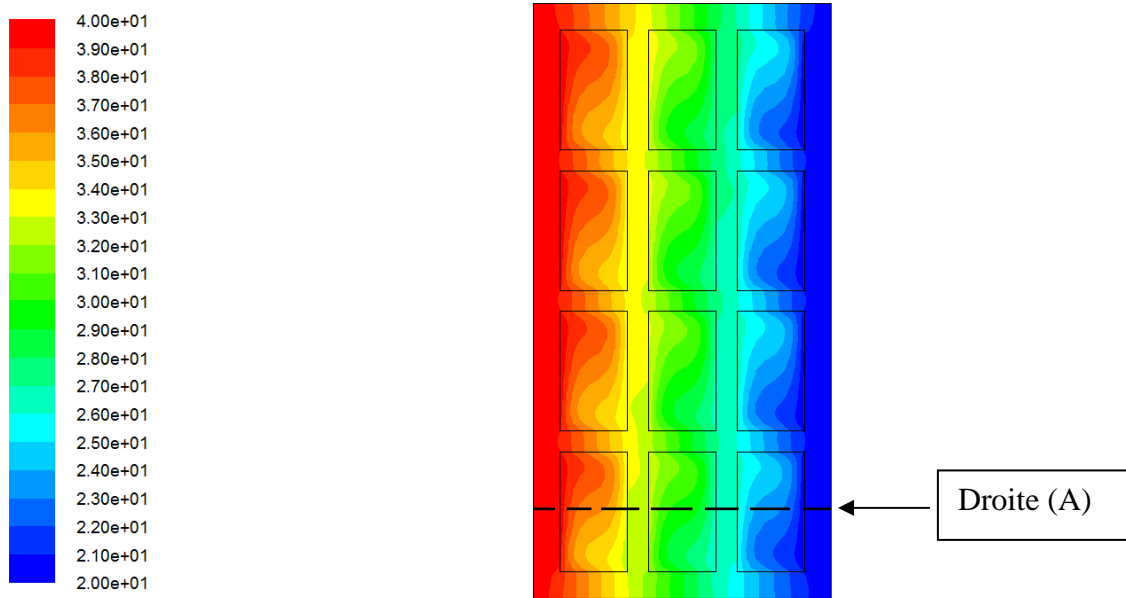


Figure III.34 : Evolution de la température dans la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)

Les isothermes :

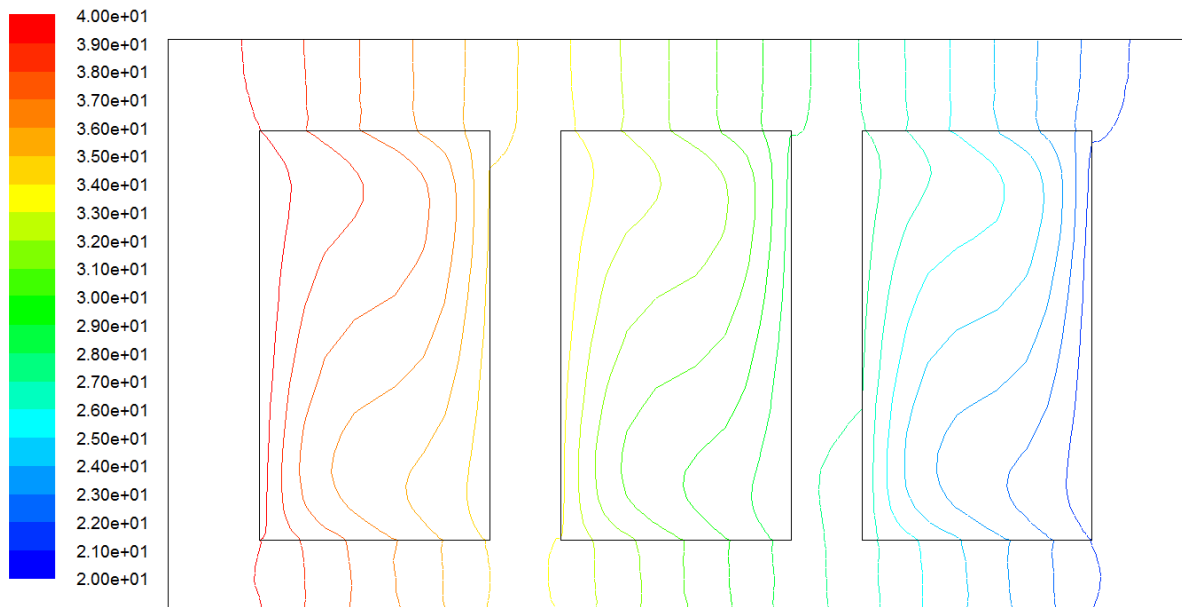
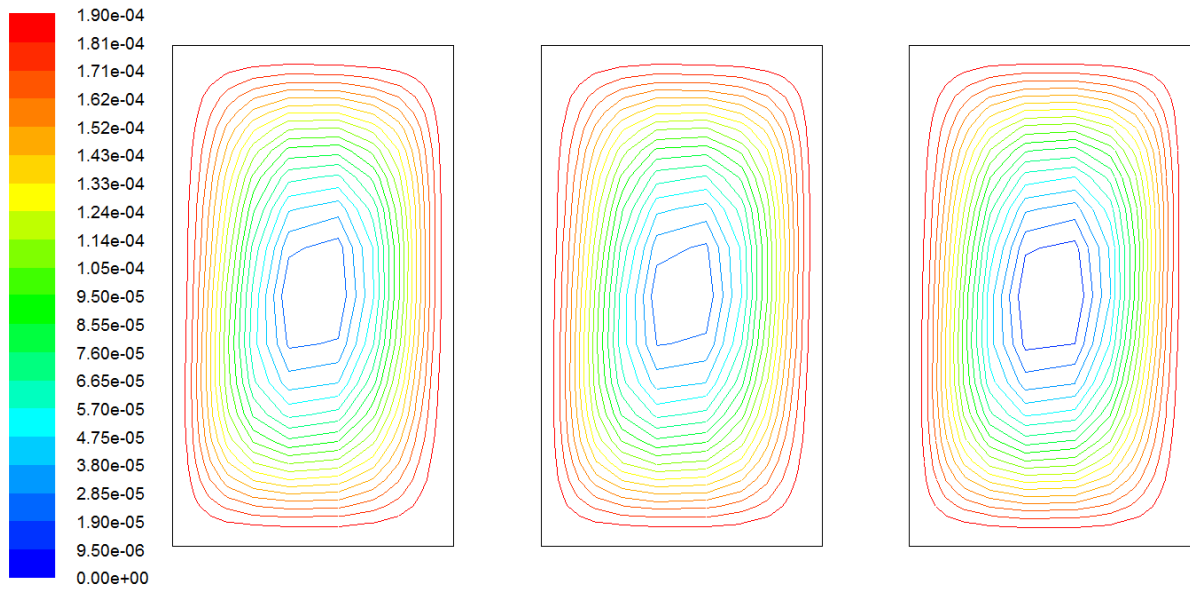


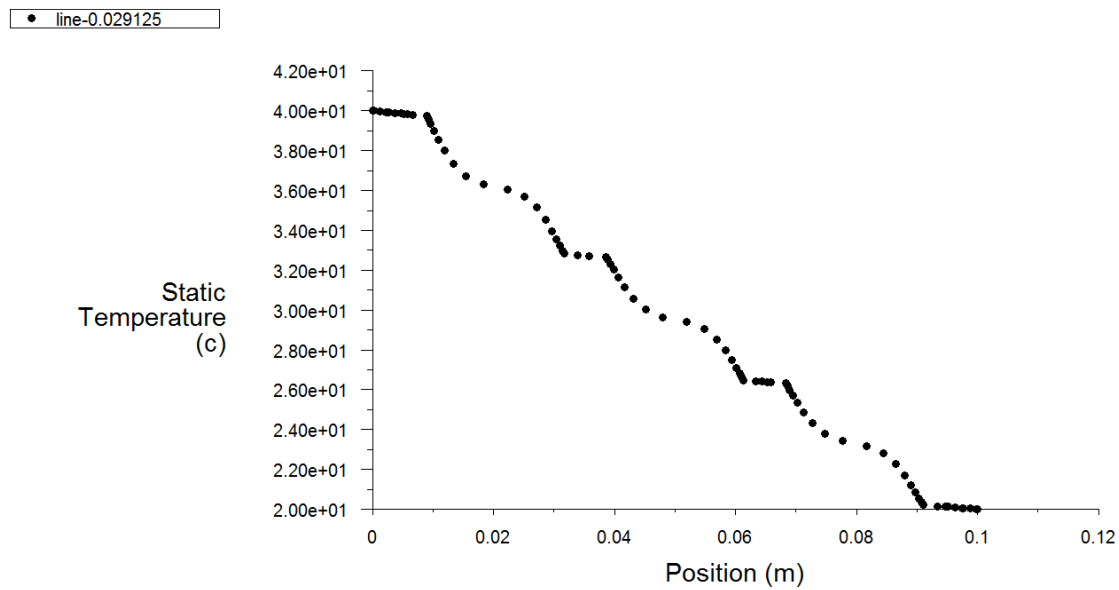
Figure III.35 : Représentation des isothermes

**Lignes de courant :**



**Figure III.36 :** Evolution des lignes de courant dans la brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)

**Evolution de la température à Y = 29.125 mm (Droite (A)) :**



**Figure III.37 :** Evolution de la température à Y = 29.125 mm (Droite (A))

**Remarque et conclusion :**

En ajoutant une troisième rangée des cavités à la brique standard, on a pu augmenter sa résistance thermique.

3.4.6. La brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type) :

Champs de température :

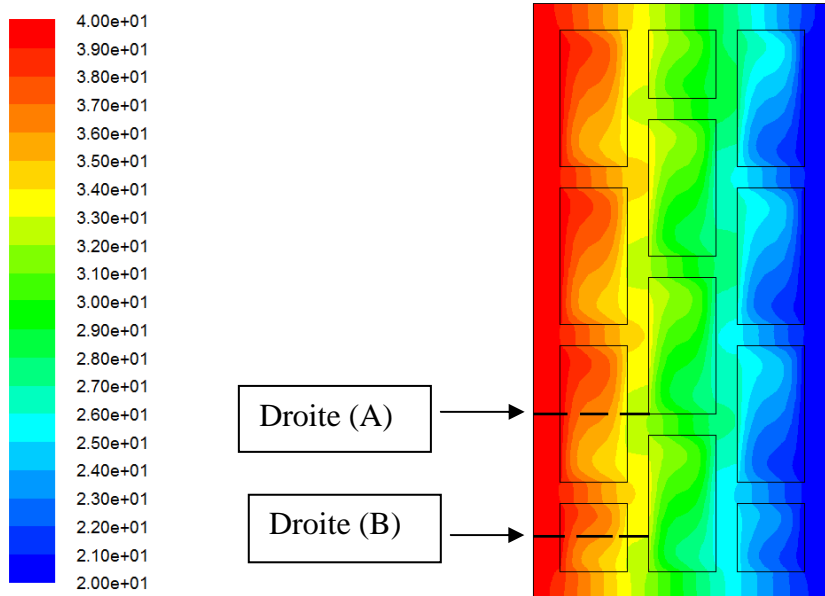


Figure III.38 : Evolution de la température dans la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

Les isothermes :

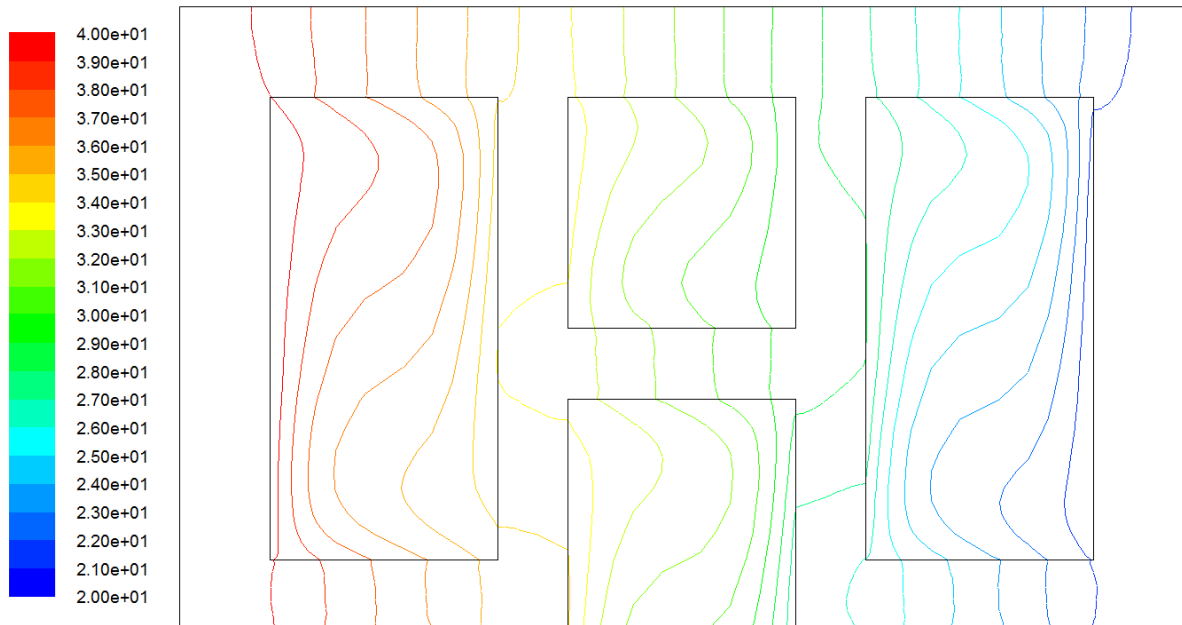
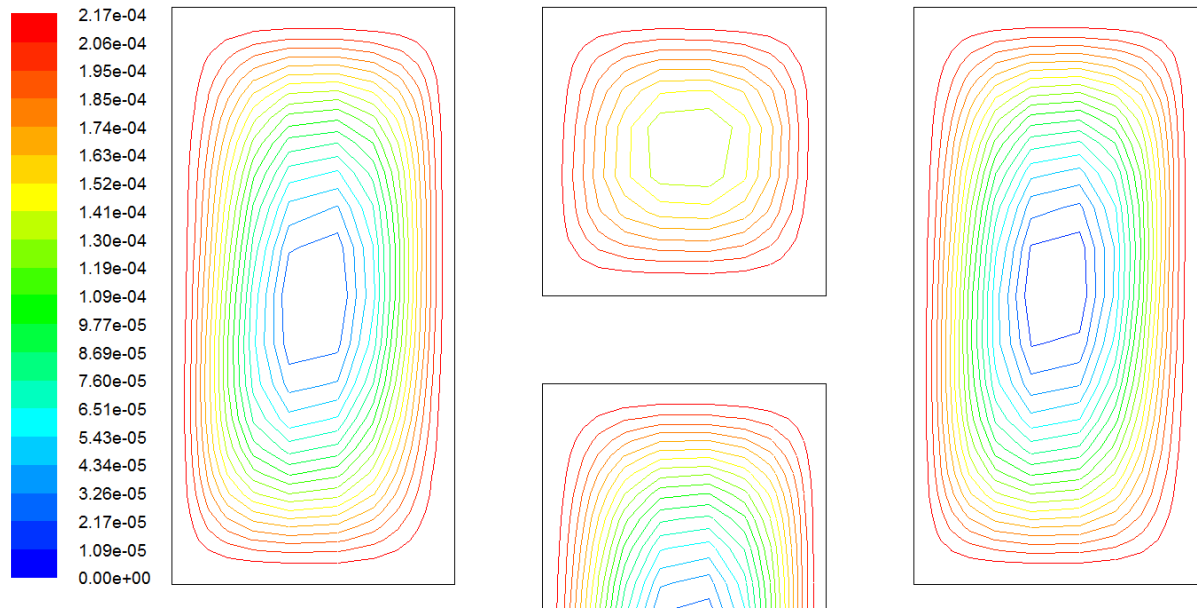


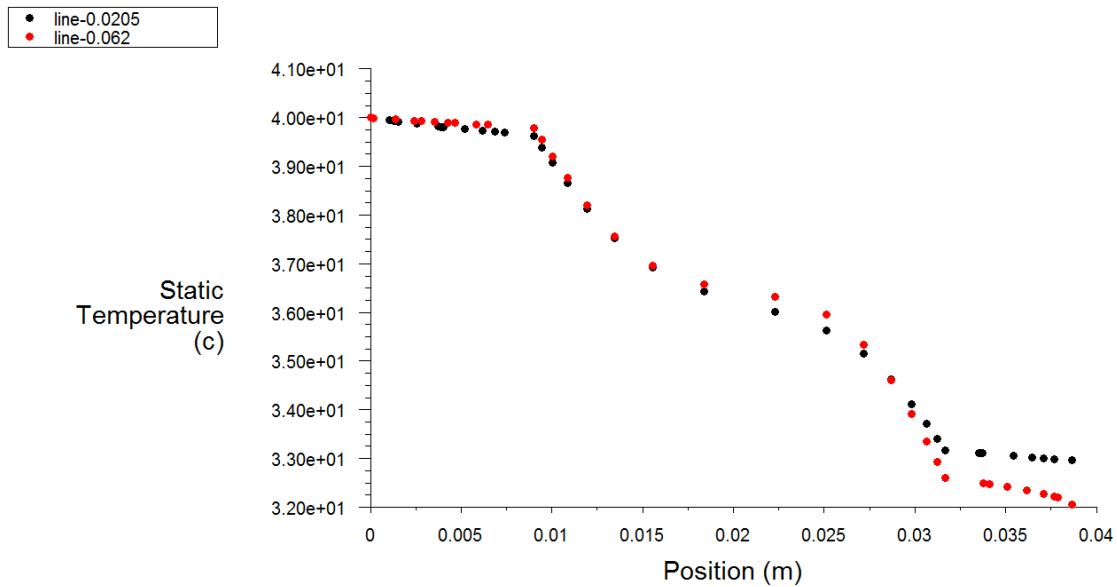
Figure III.39 : Répartition des isothermes dans la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

**Lignes de courant :**



**Figure III.40 :** Evolution des lignes de courant dans la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)

**Evolution de la température à Y = 62 mm (Droite (A)) et à Y = 20.5 mm (Droite (B)) :**



**Figure III.41 :** Evolution de la température pour la droite (A) et la droite (B)

**Remarque et conclusion :**

Cette géométrie s'avère intéressante puisqu'on a pu augmenter sa résistance thermique, en réduisant la largeur des cavités et en évitant la présence des ponts thermiques.

### 3.5. Comparaison entre les briques :

Le tableau III.17 suivant donne les résistances thermiques et les masses de différents types de la brique de construction :

**Tableau III.17 :** Les résistances thermiques et les masses de différents types de la brique de construction

	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)	Résistance thermique de la brique (°C/Watts)	Le volume (m <sup>3</sup> )	La masse (Kg)
La brique standard	2.776	7.205	0.00238	3.808
La brique pleine	8.399999	2.380953	0.006	9.6
La brique à trois types de cavités	2.6067	7.6725	0.00271	4.336
La brique à cavités triangulaires	2.568	7.788	0.00296	4.736
La brique à cavités rectangulaires (1 <sup>er</sup> type)	2.487	8.042	0.00272	4.352
La brique à cavités rectangulaires (2 <sup>ème</sup> type)	2.3570	8.4854	0.00272	4.352

Le tableau III.17 donne la variation de la résistance thermique et de la masse par rapport aux flux de chaleur traversant la brique et aux volumes de la matière respectivement :

On donne la résistance thermique par la relation suivante :  $R_{Th} = \frac{TC-TF}{\Phi}$

$R_{Th}$  : La résistance thermique (°C/Watts)

TC : La température de la paroi chaude (°C)

TF : La température de la paroi froide (°C)

$\Phi$  : Le flux de chaleur (Watts)

On donne la masse de la matière par la relation suivante :  $m = \rho \times V_{me}$

m : La masse (kg)

$\rho$  : La masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)

$V_{me}$  : Le volume (m<sup>3</sup>)

Avant de calculer le flux de chaleur et le volume sous Fluent, il faut définir les valeurs de référence. La méthode de calcul est donnée dans le chapitre précédent, à travers : la figure II.39, la figure II.40 et la figure II.41.

### 3.6. Avantages et inconvénients des différentes configurations :

Il ne suffit pas à la brique d'être un matériau résistant thermiquement, mais il faut aussi que le coût de production soit faible que possible pour maintenir en production une usine donnée, dans une entreprise en bonne santé.

Nous avons pris ici la brique standard comme référence pour la comparer aux autres géométries construites :

Le tableau III.18 suivant donne les avantages et les inconvénients de différentes configurations géométriques :

**Tableau III.18** : Avantages et inconvénients de différentes configurations

	Avantages	Inconvénients
<b>La brique standard</b>	Légèreté Disponibilité	Mauvaise isolation
<b>La brique pleine</b>	Solidité	Mauvaise isolation Lourde
<b>La brique à trois types de cavités</b>	Bonne isolation	Un peut lourde Remplacé les moules existants
<b>La brique à cavités triangulaires</b>	Bonne isolation	Lourde Remplacé les moules existants
<b>La brique à cavités rectangulaires (1<sup>er</sup> type)</b>	Bonne isolation	Un peut lourde Remplacé les moules existants
<b>La brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type)</b>	Meilleure isolation	Un peu lourde Remplacé les moules existants

A partir du tableau III.18, on constate que le modèle proposé de la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type) nous revient un peu cher parce qu'il faut plus de matière pour la fabriquer, mais reste une brique rentable parce qu'elle nous permet de réduire notre consommation énergétique dans le chauffage et la climatisation.

À travers ces simulations, nous avons pu suivre les paramètres concernant le transfert de chaleur tels que la variation de température tout au long des briques, la distribution des isothermes et les contours de lignes de courant.

Nous avons constaté le rôle des cavités dans l'isolation thermique en comparant la brique standard à la brique pleine.

Pour augmenter la résistance thermique de la brique de construction, il faut :

- Réduire la largeur/la section des cavités (pour éliminer ou réduire la convection).
- Incliner les parois des cavités pour rompre les ponts thermiques et diminuer le transfert par conduction.

Nous avons proposé des géométries pour la brique qui nous permet de diminuer le transfert conductif et convectif, mais cela va amener à augmenter le volume de matière (ce qui n'est pas rentable économiquement).

La forme la plus adaptée pour améliorer la résistance thermique de la brique de construction est sans doute la brique à cavités rectangulaires (2<sup>ème</sup> type).

Enfin, pour que la comparaison soit raisonnable, une étude de la résistance mécanique de différentes configurations est nécessaire.

## **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

Une étude numérique de la convection naturelle dans des espaces fermés a été menée moyennant le code de calcul Fluent. L'objectif principal de ce travail était d'améliorer la résistance thermique de la brique de construction en proposant d'autres géométries à différentes formes de cavité, et pour cela il faut réduire au maximum le transfert de chaleur par convection ainsi que les ponts thermiques.

Cette étude nous a permis de bien comprendre le phénomène de convection naturelle en régime laminaire dans des cavités remplies d'air. Les configurations géométriques sont soumises à un gradient de température horizontal. Les conditions aux frontières sont de type Dirichlet (températures imposées).

La formulation mathématique du problème physique est modélisée par des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. La résolution des équations résultantes est effectuée par le logiciel Fluent qui est basé sur la méthode des volumes finis. Un maillage raffiné aux parois dans la région de convection est adopté suite à une étude minutieuse de la sensibilité au maillage.

Les résultats de la simulation sont représentés en termes d'isothermes, de lignes de courant, de profils de température et de profils de vitesse.

Cette étude numérique nous a permis d'optimiser les échanges thermiques dans les structures de la construction moderne. Enfin, tous les résultats de la simulation doivent faire l'objet d'une étude expérimentale pour les valider.

## Références bibliographiques :

- [1] LOAN C. POPA, Modélisation numérique du transfert thermique, Méthode des volumes finis, p. 6-43 Universitaria Craiova (2002).
- [2] EMILIAN KOLLER, Machines thermiques, pp. 71- 92, Edition Dunod (2005).
- [3] ANA-MARIA BIANCHI, YVES FAUTRELLE & JACQUELINE ETAY, Transferts thermiques, pp. 1-12, p. 191-233, pp. 351-405, Agence Universitaire de la Francophonie (2004).
- [4] J. BRAU, Transfert de chaleur et de masse, Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon (2006).
- [5] JEAN-LUC BATTAGLIA, ANDRZEJ KUSIAK, ET JEAN-RODOLPHE PUIGGALI, Introduction aux transferts thermiques, pp. 1-24, pp. 91-128, Dunod, Paris (2010).
- [6] DOMINIQUE MARCHIO, PAUL REBOUX, Introduction Aux Transferts Thermiques, p. 2-9, Collection Les Cours De L'école Des Mines, Paris (2008).
- [7] F. AMPOFO, T. G. KARAYIANNIS, Experimental cas test data for turbulent natural convection in an air filled square cavity, Int. J. Heat Mass Transfer 46 pp. 3551-3735 (2003).
- [8] Introduction aux transferts de chaleur, [www.almohandiss.com](http://www.almohandiss.com), pp.1-3.
- [9] ZOUBIDA HADDAD, Etude des effets d'un nanofluide sur un écoulement de convection naturelle dans une cavité, thèse de doctorat, Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene, soutenu le 2/11/2014.
- [10] EIYAD ABU-NADA ET ALI J. CHAMKHA, Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures filled with a CuOeEGeWater nanofluid, International Journal of Thermal Sciences, (2010) 2339-2352.
- [11] SACI LEBBIHI, Refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur localisée au fond d'une enceinte remplie de nano fluide, mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra, Juin 2014.
- [12] P. LE QUERE, J.A.C. HUMPHREY, F.S. SHERMAN, Numerical calculation of thermally driven two-dimensional unsteady laminar flow in cavities of rectangular cross section, Numer. Heat Transfer 4, pp. 249–283 (1981).
- [13] T. HADJI, Phénomènes couplés thermo-acoustiques dans la convection de Rayleigh-Bénard, Mémoire de magistère en mécanique, Université de Batna, Algérie (2003).
- [14] N. IBRIR, Etude la convection naturelle dans une cavité rectangulaire contenant du métal liquide, Mémoire de magistère en mécanique, Université de Batna, Algérie (2006).

**[15]** DJAMILA BENYOUCEF, Etude de la convection naturelle dans une enceinte à gradient de température pariétal horizontal et vertical, thèse de doctorat, Université El-Hadj Lakhdar - Batna 1.

**[16]** AMEL TRABELSI, Etude de l'échange thermique dans une cavité rectangulaire avec deux côtés partiellement actifs, thèse de magistère, université Kasdi Merbah - Ouargla, soutenue le 12/05/2011.

**[17]** D. FEDALA, Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent-applications, note de cours, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique des Fluides Interne, ENSAM, CER de Paris, (2007).

**[18]** J.P. HOLMAN, Heat Transfer, Department of Mechanical Engineering Southern Methodist University, Tenth Edition, 2009.

**[19]** NADEZHDA S. BONDAREVA and MIKHAIL A. SHEREMET, Natural Convection Melting Influence on the Thermal Resistance of a Brick Partially Filled with Phase Change Material, Laboratory on Convective Heat and Mass Transfer, Tomsk State University, 634050 Tomsk, Russia, Fluids 2021, 6, 258.

**[20]** MAJED M. AL-HAZMY, Analysis of coupled natural convection–conduction effects on the heat transport through hollow building blocks, Energy and Buildings 38 (2006) 515–521.