

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie Civil

**Spécialité** : Structure : Efficacité énergétique dans les bâtiments de constructions

**Par** : Hedeili Ikram & Komichi Abdelmounaim

**Sujet**

**Simulation numérique de modèle de Mur Trombe**

**Soutenu le 12 /06/2024 , devant le jury composé de :**

SELKA G.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Président
BENAHMED L.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Examinatrice
HENAOUI M.	Ingénieur de Laboratoire	Université de Tlemcen	Encadrant
EL HOUARI N.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Co-Encadrante

Année universitaire : 2023 /2024

## **Dédicaces**

*Ce travail de mémoire est destiné à nos chers parents pour les remercier du fond du cœur.*

*Nous tenons à leur exprimer notre profonde gratitude pour tous les sacrifices et les efforts fournis. Vous étiez une véritable inspiration pour nous. Merci*

*A nos familles et amis qui étaient présents et à qui nous souhaitons beaucoup de succès.*

*A toute la promotion EEBC 2023/2024*

*A tous ceux que nous aimons, un grand merci*

**Hedeili Ikram & Komichi Abdelmounaim**

## **Remerciements**

*Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à nos encadrants, Mr Henaoui Mustapha Ingénieur de laboratoire à l'Université de Tlemcen et M<sup>me</sup> EL Houari Nesrine, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, pour leurs précieux conseils, leur patience et leur disponibilité, en particulier pour le confort et la facilité amenés pendant tous ces mois de travail.*

*Nous tenons également à remercier vivement M<sup>r</sup> Sleka Ghouti., Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, qui nous a fait l'honneur de présider ce jury. Nous remercions respectueusement M<sup>me</sup> Benahmed Lamai. Maître de conférences à l'Université de Tlemcen d'avoir bien voulu examiner ce mémoire.*

*Enfin nous remercions toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

***Merci à tous***

## Résumé

Le secteur du bâtiment en Algérie représente près de la moitié de la consommation énergétique nationale, principalement en raison de la nécessité de répondre aux besoins des occupants en matière de confort thermique. Face à cette réalité, l'énergie solaire émerge comme une solution prometteuse et avantageuse, notamment dans le domaine de l'habitat. Au sein de ce dernier, le mur trombe se distingue par sa capacité à capter et redistribuer la chaleur solaire de manière uniforme à l'intérieur des espaces habités, faisant de lui l'un des systèmes les plus efficaces pour le chauffage passif des bâtiments. C'est dans ce contexte que notre mémoire se focalise et ceci en visant à évaluer le confort thermique dans les habitations en premier lieu et ensuite à approfondir la recherche dans le domaine du chauffage solaire passif et actif en analysant le comportement thermodynamique de trois types de murs capteurs solaires, notamment le mur trombe. Le but principal est d'encourager l'utilisation de l'énergie solaire dans la construction de maisons. Des simulations numériques pour étudier qualitativement les aspects dynamique et thermique des trois types de murs trombe ont été menés dans le but de déterminer le modèle le plus performant répondant aux besoins de chauffage d'une habitation. Les résultats obtenus à travers cette simulation, réalisée avec le logiciel FLUENT, mettent en évidence les avantages du mur cannelé rond en termes d'efficacité et d'optimisation énergétique, comparativement aux deux autres types de murs (mur cannelé carré et mur classique).

**Mots-clés :** Énergie solaire, mur trombe, confort thermique, chauffage solaire, simulation numérique.

## Abstract

The building sector in Algeria represents almost half of the national energy consumption, mainly due to the need to meet the needs of occupants in terms of thermal comfort. Faced with this reality, solar energy is emerging as a promising and advantageous solution, especially in the field of housing. Within the latter, the trombe wall stands out for its ability to capture and redistribute solar heat in a uniform way inside inhabited spaces, making it one of the most efficient systems for passive heating of buildings. It is in this context that our thesis focuses and this by aiming to evaluate the thermal comfort in homes in the first place and then to deepen the research in the field of passive and active solar heating by analyzing the thermodynamic behavior of three types of solar collector walls, in particular the trombe wall. The main purpose is to encourage the use of solar energy in the construction of houses. Numerical simulations to qualitatively study the dynamic and thermal aspects of the three types of trombe walls were conducted in order to determine the most efficient model meeting the heating needs of a home. The results obtained through this simulation, carried out with the FLUENT software, highlight the advantages of the round fluted wall in terms of efficiency and energy optimization, compared to the other two types of walls (square fluted wall and classic wall).

**Keywords:** Solar energy, storm wall, thermal comfort, solar heating, digital simulation.

## ملخص

يمثل قطاع البناء في الجزائر ما يقرب من نصف استهلاك الطاقة الوطني، ويرجع ذلك أساسا إلى الحاجة إلى تلبية احتياجات الركاب من حيث الراحة الحرارية. في مواجهة هذا الواقع، تظهر الطاقة الشمسية كحل واعد ومفيد، خاصة في مجال الإسكان. ضمن هذا الأخير ، يتميز جدار ترومب بقدرته على التقاط وإعادة توزيع الحرارة الشمسية بطريقة موحدة داخل المساحات المأهولة ، مما يجعله أحد أكثر الأنظمة كفاءة للتدفئة السلبية للمباني. في هذا السياق تركز أطروحتنا وهذا من خلال السعي لتقييم الراحة الحرارية في المنازل في المقام الأول ثم تعميق البحث في مجال التسخين الشمسي السلبي والنشط من خلال تحليل السلوك الديناميكي الحراري لثلاثة أنواع من جدران تجميع الطاقة الشمسية ، ولا سيما جدار ترومب. الغرض الرئيسي هو تشجيع استخدام الطاقة الشمسية في بناء المنازل. تم إجراء عمليات محاكاة عديدة لدراسة الجوانب الديناميكية والحرارية للأنواع الثلاثة لجدران ترومب من أجل تحديد النموذج الأكثر كفاءة الذي يلبي احتياجات التدفئة في المنزل. النتائج التي تم الحصول عليها من خلال هذه المحاكاة ، والتي تم إجراؤها باستخدام البرنامج بطلاقة ، تسلط الضوء على مزايا الجدار المستدير المخدد من حيث الكفاءة وتحسين الطاقة ، مقارنة بالأنواع الأخرى من الجدران (الجدار المخدد المربع والجدار الكلاسيكي).

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الشمسية ، جدار ترومب ، الراحة الحرارية ، التدفئة الشمسية ، المحاكاة الرقمية.

## Listes des figures et tableaux

### Chapitre 1 : Le Confort Thermique

Figure 1. 1 : Le confort thermique .....	6
Figure 1. 2 : L'énergie solaire thermique .....	10
Figure 1. 3 : L'énergie solaire photovoltaïque .....	Erreur ! Signet non défini.11
Figure 1. 4 : Définition mode de transfert de chaleur .....	11
Figure 1. 5 : La spécificité du mur Trombe .....	22
Figure 1. 6 : Principe du fonctionnement du mur trombe .....	23
Figure 1. 7 : Fonctionnement hiver : l'air extérieur est réchauffé par le mur Trombe .....	24
Figure 1. 8 : Fonctionnement été : l'air intérieur est aspiré par le capteur .....	25
Figure 1. 9 : Fonctionnement de jour en période de chauffe .....	26
Figure 1. 10 : Fonctionnement de nuit en période de chauffe .....	27
Figure 1. 11 : Fonctionnement Hiver .....	27
Figure 1. 12 : Fonctionnement d'été .....	28

### Chapitre 2 : Formulation Mathématique

Figure 2. 1 : Mur trombe simple .....	33
Figure 2. 2 : Mur trombe rainure carré.....	33
Figure 2. 3 : Mur trombe rainure circulaire.....	34
Figure 2. 4 : Principe de calcul numérique.....	35
Figure 2. 5 : Conditions aux limites .....	41
Tableau 2. 1 : Propreté thermo-physique de l'air 298K.....	42

### Chapitre 3 : Simulation Numérique

Figure 3. 1 : Lancement du Gambit.....	46
Figure 3. 2 : Réalisation de la géométrie sous GAMBIT .....	47
Figure 3. 3 : Les opérations pour construire une géométrie.....	48
Figure 3. 4 : Maillage de la géométrie Définition des frontières du mur trombe simple.....	48
Figure 3. 5 : Maillage de la géométrie Définition des frontières du mur trombe (rainure carré) .....	49

## Listes des figures et tableaux

---

Figure 3. 6 : Maillage de la géométrie Définition des frontières du mur trombe (rainure circulaire) .....	49
Figure 3. 7 : Exportation du maillage.....	50
Figure 3. 8 : Importation de la géométrie .....	51
Figure 3. 9 : Vérification du maillage sous Fluent .....	51
Figure 3. 10 : Vérification des unités .....	52
Figure 3. 11 : Choix du solveur sous fluent .....	52
Figure 3. 12 : Equation de l'énergie .....	53
Figure 3. 13 : Choix du modèle d'écoulement .....	53
Figure 3. 14 : Définition des caractéristiques du fluide .....	54
Figure 3. 15 : Choix de la pression de référence.....	55
Figure 3. 16 : Valeurs des conditions aux limites .....	56
Figure 3. 17 : Vitesse d'entrée .....	56
Figure 3. 18 : Pression de sortie .....	57
Figure 3. 19 : Parois du mur trombe.....	57
Figure 3. 20 : Choix d'ordre des équations .....	58
Figure 3. 21 : Choix du nombre des itérations .....	59

### Chapitre 4

Figure 4. 1 Maillage des géométries étudiées .....	62
Figure 4. 2 Contour lignes de courant pour les 3 cas .....	64
Figure 4. 3 Contour de vitesse pour les 3 cas.....	66
Figure 4. 4 Contour de l'énergie cinétique pour les trois cas.....	68
Figure 4. 5 Contour température total pour les trois cas .....	70
Figure 4.6 Profil de la distribution de la température à la sortie pour les trois cas .....	71
Tableau 4. 1 : Valeur moyenne de la vitesse et de la température et de pour les trois cas .....	71
Tableau 4. 2 : Valeur moyenne de la vitesse et de la température « cas1 et cas2 ». .....	72
Tableau 4. 3 : Valeur moyenne de la vitesse et de la température «cas2 et cas3 ». .....	72

---

---

# Table des matières

<b>Dédicaces .....</b>	<b>I</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>II</b>
<b>Listes des figures et tableaux .....</b>	<b>VI</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>IX</b>
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Le confort thermique.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Confort thermique .....</b>	<b>5</b>
2.1. Définition .....	5
2.2. Paramètres du confort thermique.....	6
2.2.1. Température .....	6
2.2.2. Vitesse de l'air.....	7
2.2.3. Humidité .....	7
2.3. Amélioration du confort thermique .....	7
2.3.1. Confort d'hiver .....	7
2.3.1.1. Isolation des murs par l'intérieur .....	8
2.3.1.2. Isolation des murs par l'extérieur .....	8
2.3.2. Confort d'été.....	9
<b>3. L'énergie solaire .....</b>	<b>9</b>
<b>4. L'énergie solaire active .....</b>	<b>9</b>
4.1. L'énergie solaire thermique.....	10
<b>5. L'énergie solaire passive .....</b>	<b>10</b>
<b>6. Mode de transfert de chaleur .....</b>	<b>11</b>
6.1. La conduction .....	12
6.2. La convection.....	12
6.3. Le rayonnement.....	13
<b>7. L'échange thermique entre l'individu et l'espace.....</b>	<b>13</b>
7.1. La température ambiante.....	13
7.2. L'humidité.....	13
7.3. La vitesse de l'air.....	13
7.4. L'activité physique .....	13
7.5. Les vêtements.....	13
<b>8. Paramètres affectant les conditions thermiques des bâtiments .....</b>	<b>14</b>
8.1. Les facteurs liés aux conditions climatiques .....	14
8.1.1. Facteurs naturels .....	14
8.1.2. Facteurs anthropiques .....	15
8.1.3. Conséquences du changement climatique .....	15
8.2. Les facteurs du confort thermique lié aux occupants .....	15
8.2.1. Facteurs physiologiques.....	15
8.2.2. Facteurs psychologiques.....	16
8.2.3. Facteurs individuels .....	16
8.3. Les facteurs liés au cadre bâtiment .....	17
8.3.1. La forme architecturale.....	17
8.3.2. L'orientation.....	18

## Table des matières

<b>9. Schéma de principe du mur trombe .....</b>	<b>19</b>
9.1. Qu'est –ce que c'est le mur trombe .....	19
9.2. Définition du mur trombe .....	19
9.3. Composantes du mur trombe .....	19
9.4. Les techniques des murs trombes .....	21
9.5. Principe de fonctionnement de mur trombe.....	22
9.6. Le fonctionnement d'un mur Trombe .....	23
9.6.1. Fonctionnement de la paroi thermique en hiver .....	23
9.6.2. Fonctionnement de la paroi thermique en été.....	24
<b>10. Description de système de chauffage par mur trombe.....</b>	<b>25</b>
10.1. Fonctionnement de mur Trombe pendant le jour (période de chauffe).....	25
10.2. Fonctionnement de mur Trombe pendant la nuit.....	26
10.3. Caractéristiques du vitrage et de la lame d'air .....	28
<b>11. Avantages et inconvénients .....</b>	<b>28</b>
<b>12. Le cout d'un mur trombe .....</b>	<b>29</b>
<b>13. Conclusion .....</b>	<b>30</b>
<b>Chapitre 2 : Formulation mathématique.....</b>	<b>31</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>32</b>
<b>2. Modèle physique.....</b>	<b>32</b>
2.1. Premier cas : Mur trombe simple .....	32
2.2. Deuxième cas : Mur trombe (rainure carré).....	33
2.3. Troisième cas : Mur trombe (rainure circulaire).....	34
<b>3. Hypothèses simplificatrices .....</b>	<b>34</b>
<b>4. Calcul numérique .....</b>	<b>34</b>
<b>5. Les différentes méthodes numériques de discrétisation .....</b>	<b>35</b>
5.1. Méthode des différences finis .....	35
5.2. Méthode des éléments finis .....	36
5.3. La méthode des volumes finis .....	36
5.3.1. Avantages et inconvénients .....	37
<b>6. Principe de la méthode des volumes finis.....</b>	<b>37</b>
6.1. Maillage .....	37
6.2. Discrétisation des équations gouvernantes .....	38
6.3. Les équations gouvernantes.....	38
6.3.1. Equation de continuité.....	38
6.3.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement.....	38
6.3.3. Equation de la conservation de l'énergie .....	38
<b>7. Approximation de Boussinesq .....</b>	<b>39</b>
<b>8. Le modelé de turbulence .....</b>	<b>39</b>
<b>9. Les nombres adimensionnels.....</b>	<b>40</b>
9.1. Le nombre de Reynolds .....	40
9.2. Le nombre de Prandtl .....	40
9.3. Le nombre de Nusselt .....	40
9.4. Nombre de Rayleigh .....	41
<b>10. Les conditions aux limites .....</b>	<b>41</b>
<b>11. Conclusion .....</b>	<b>42</b>
<b>Chapitre 3 : Présentation des Logiciels.....</b>	<b>43</b>

## Table des matières

<b>Gambit et Fluent.....</b>	<b>43</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>44</b>
<b>2. Définition CFD.....</b>	<b>44</b>
2.1. Le rôle de CFD.....	44
<b>3. Présentation de gambit et de fluent.....</b>	<b>45</b>
3.1. Initiation au logiciel GAMBIT.....	45
3.1.1. Démarrage de Gambit.....	45
3.1.2. Construction de la géométrie.....	46
3.1.3 Réalisation du maillage.....	48
3.1.4. Exportation du maillage.....	50
3.2. Initiation au logiciel FLUENT.....	50
3.2.1. Importation de la géométrie.....	50
3.2.2. Vérification du maillage importé.....	51
3.2.3. Vérification de l'échelle.....	52
3.2.4. Choix du solver.....	52
3.2.5. L'équation de l'énergie.....	53
3.2.6. Choix du modèle de l'écoulement.....	53
3.2.7. Définition des caractéristiques du fluide.....	54
3.2.8. Operating conditions.....	55
3.2.9. Conditions aux limites.....	56
3.2.10. Choix d'ordre des équations et l'algorithme.....	58
3.2.11. Lancement de calcul.....	58
<b>4. Conclusion.....</b>	<b>59</b>
<b>Chapitre 4 : Résultats et interprétations des simulations numériques.....</b>	<b>60</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>61</b>
<b>2. Maillages.....</b>	<b>61</b>
<b>3. Les lignes de courant.....</b>	<b>63</b>
<b>4. Distribution de la vitesse.....</b>	<b>64</b>
<b>5. Distribution de l'énergie cinétique.....</b>	<b>67</b>
<b>6. Distribution de la température totale.....</b>	<b>68</b>
<b>7. Discussion et interprétations.....</b>	<b>71</b>
<b>8. Conclusion.....</b>	<b>73</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>74</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>76</b>
<b>Webographie.....</b>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

---

Au fil des années, la recherche sur la convection thermique dans les espaces confinés a gagné en importance en raison de son application dans divers secteurs industriels tels que le refroidissement des composants électroniques, les réacteurs nucléaires et les pertes thermiques dans les collecteurs solaires. Cette tendance a suscité de nombreux travaux visant à comprendre ce phénomène dans différentes configurations géométriques et avec différents types de fluides, qu'ils soient newtoniens, non newtoniens ou des nano fluides.

L'Algérie détient un potentiel considérable en termes d'énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne, la géothermie, la biomasse et surtout l'énergie photovoltaïque, grâce à l'abondance du rayonnement solaire dans le pays.

Parmi les sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire occupe une place prépondérante, étant une ressource exploitée depuis des millénaires. L'utilisation de l'énergie thermique solaire est particulièrement écologique, ne produisant aucune émission de CO<sub>2</sub>. Ainsi, son adoption peut contribuer à atténuer les effets néfastes des systèmes énergétiques traditionnels, basés sur les combustibles fossiles.

Une solution prometteuse pour réduire les pertes énergétiques et promouvoir une utilisation rationnelle de l'énergie est l'intégration d'un système de chauffage solaire passif dans les habitations. Ce système repose sur la minimisation des pertes énergétiques, offrant ainsi une solution attrayante pour l'économie d'énergie. [6]

Parmi les systèmes innovants, celui développé par le professeur Trombe est particulièrement intéressant. Il implique l'utilisation d'un mur en maçonnerie lourde orienté vers le sud, placé derrière un vitrage et doté de deux orifices. Ce système vise à chauffer l'air grâce au soleil, puis à le diffuser dans un espace intérieur. Cette approche, en harmonie avec les principes de l'architecture bioclimatique, fait l'objet d'une réévaluation contemporaine visant à optimiser son efficacité.

Ce mémoire se concentre sur l'analyse du comportement d'un système de mur Trombe et son impact sur la distribution de l'air et le confort thermique à l'intérieur d'un espace clos.

Ce travail en s'inscrit dans le cadre de la modélisation numérique d'un mur Trombe sous les hypothèses suivantes : on considère que l'écoulement au sein de la lame d'air du mur Trombe est un écoulement incompressible, stationnaire transitoire et que la convection est mixte (convection naturelle et convection forcée) en tenant compte de la théorie de

## Introduction Générale

---

Boussinesq. La technique CFD (Computational Fluid Dynamics) est utilisé pour résoudre les équations gouvernantes.

Afin d'aboutir à cet objectif, le mémoire sera structuré en quatre chapitres deux chapitres bibliographiques, suivi de deux dernier chapitres exposant la partie originale de ce mémoire ;

Le premier chapitre : est consacré à des généralités sur les notions du confort dans un habitat et l'efficacité énergétique et présente une étude détaillée sur le mur trombe.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter la formulation mathématique qui comprend les méthodes numériques méthode des différences finies (MDF), méthode des éléments finis (MEF) et la méthode des volumes finis (MVF), aussi, nous présentons les équations gouvernantes, l'approximation de Boussinesq et les nombres adimensionnels.

Le troisième chapitre abordera les simulations numériques basées sur trois modèles de mur Trombe : le premier est un mur simple dit mur Trombe classique. Le deuxième est un mur Trombe rainure carrée et troisième est un mur trombe rainure circulaire. L'utilisation du logiciel Gambit basée sur la MVF nous a permis la création de la géométrie, de faire le maillage et les conditions aux limites sur les trois géométries étudiées. La résolution, le traitement et le post-traitement des résultats sont réalisés par le code de calculs Fluent.

Les résultats numériques en termes de la vitesse, énergie cinétique et la distribution de la température et sont donnés dans le quatrième chapitre. Les dépouillements des résultats pour chacun des trois modèles de mur trombe sont discutés pour différents vitesse de fonctionnement des trois modèles du mur Trombe.

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale et des perspectives de recherche dans cette thématique.

# **Chapitre 1 : Le confort thermique**

## 1. Introduction

Le soleil peut servir à plusieurs fins dans votre maison. Il peut nous éclairer à travers nos fenêtres pendant la journée, tout comme elle peut nous éclairer la nuit si nous captons et stockons l'énergie grâce à des batteries.

En Algérie, le chauffage et la climatisation sont les composantes les plus importantes du budget énergétique domestique, notamment dans le secteur de l'habitat, qui porte une grande part de responsabilité dans la consommation énergétique et la pollution qu'elle génère. C'est pourquoi nous nous limiterons au chauffage solaire et à la climatisation pour minimiser la consommation d'énergie et obtenir un confort agréable. Il est donc nécessaire de développer des stratégies pour utiliser des sources d'énergie économes en énergie, efficaces et renouvelables. Ajouter un système de chauffage solaire passif à votre maison est une solution intéressante qui vous permet d'économiser et d'utiliser l'énergie à bon escient.

Parmi ces systèmes, celui développé par le professeur Trombe consiste à placer derrière la vitre un lourd mur de maçonnerie orienté au sud et à lui ménager deux ouvertures.

Dans ce premier chapitre, nous avons exposé le confort thermique du bâtiment et nous allons examiner d'une manière détaillée un système de chauffage solaire passif qui permet de stocker et de restituer de la chaleur.

Cette technique de chauffage a été développée au C.N.R.S (Centre National de la Recherche Scientifique) en France par le Professeur Trombe.

## 2. Confort thermique

### 2.1. Définition

Le confort thermique représente un sentiment de bien-être dans un environnement intérieur, il ne se résume pas uniquement à la température ambiante.

Il est également influencé par des facteurs tels que l'humidité de l'air, les courants d'air et la qualité de l'air intérieur. La température ressentie dépend d'une combinaison de la température de l'air et des rayonnements provenant des surfaces environnantes.

Par exemple, une température intérieure de 22°C peut ne pas garantir un confort thermique si les murs sont froids, tandis qu'une température de 18°C, avec un rayonnement homogène des surfaces, peut offrir un confort thermique satisfaisant.

De même, en montagne, même à une température de +10°C, le confort thermique peut être atteint grâce à un bon ensoleillement.

Ainsi, pour garantir un confort thermique optimal, il est essentiel de prendre en compte l'ensemble de ces facteurs et d'assurer un équilibre entre la température, le rayonnement et d'autres paramètres environnementaux (figure 1.1) [7].

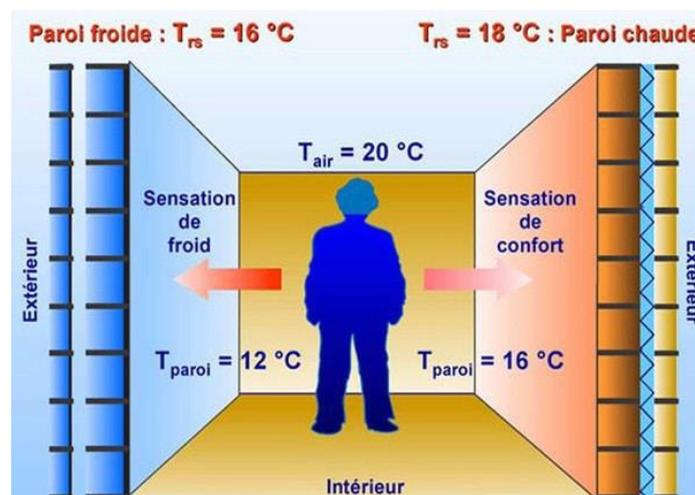


Figure 1. 1 Le confort thermique [8]

## 2.2. Paramètres du confort thermique

La température, la vitesse de l'air et l'humidité sont les principaux paramètres physiques qui contrôlent le confort thermique.

### 2.2.1. Température

Les experts ont établi plusieurs températures pour évaluer les échanges thermiques, notamment par convection et par rayonnement :

- La température de l'air, également appelée "Température humide", est mesurée par un thermomètre dans la pièce.

La plupart des gens considèrent que des températures d'environ 20°C en hiver et 26°C en été sont confortables.

- La température de rayonnement désigne la chaleur échangée avec les surfaces environnantes, telles que les parois.

En hiver, la température de rayonnement des fenêtres est généralement plus basse.

- La température ambiante est déterminée dans une sphère sombre placée au centre de la pièce lorsque les mouvements d'air sont minimales.

Elle reflète une valeur qui intègre à la fois les échanges par convection et par rayonnement avec les surfaces avoisinantes.

### **2.2.2. Vitesse de l'air**

La perception de la vitesse de l'air autour du corps humain est également significative. Ce qui est considéré comme une vitesse d'air "confortable" peut varier d'une personne à l'autre en fonction de leurs vêtements et de leurs activités.

Lorsque l'air est plus froid que la peau, la sensation de refroidissement due au mouvement de l'air est plus prononcée à des températures ambiantes plus basses.

### **2.2.3. Humidité**

La capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau varie en fonction de la température. Par exemple, à 15°C, chaque kilogramme d'air sec peut contenir environ 10 grammes de vapeur d'eau, tandis qu'à 20°C, cette capacité passe à environ 15 grammes.

Ces paramètres influent sur le confort ou l'inconfort ressenti par les occupants dans les différentes pièces résidentielles, et ils sont donc pris en compte lors de la conception des espaces habitables. [1]

## **2.3. Amélioration du confort thermique**

### **2.3.1. Confort d'hiver**

L'amélioration du confort thermique en hiver nécessite une évaluation approfondie d'état thermique des bâtiments et de leurs systèmes de chauffage.

Des professionnels qualifiés tels que des architectes, des ingénieurs et des bureaux d'études peuvent réaliser ces évaluations et recommander des solutions appropriées. Quelques principes de base guident le choix parmi les différentes mesures proposées :

- Prioriser l'isolation des combles avant celle des murs extérieurs dans les maisons individuelles, étant donné que la majeure partie des pertes de chaleur se produit par le toit.
- Accorder une attention particulière à l'isolation des greniers avant celle des murs extérieurs dans les maisons unifamiliales, car la principale source de perte de chaleur est également le toit.
- Assurer une circulation d'air adéquate dans les logements lors du remplacement des fenêtres, en veillant à ce que les nouvelles fenêtres permettent à l'air de circuler librement à l'intérieur et à l'extérieur.
- Envisager le remplacement des simples vitrages par des doubles vitrages pour améliorer l'efficacité énergétique des fenêtres.
- Mettre en place des réglementations concernant les systèmes de chauffage pour garantir leur efficacité et leur conformité aux normes environnementales.
- Examiner la possibilité de changer de mode de chauffage ou adopter des sources d'énergie alternatives pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. [1]

#### **2.3.1.1. Isolation des murs par l'intérieur**

L'isolation des murs intérieurs implique généralement la couverture de la surface du mur avec des matériaux isolants, suivie de la création d'un revêtement protecteur et isolant pour permettre l'installation d'éléments décoratifs et fonctionnels. Les principales méthodes comprennent les cloisons de doublage maçonnées, les complexes collés et les doublages sur ossature métallique. Le choix entre ces solutions dépend du budget disponible et des caractéristiques des murs, comme leur planéité ou leurs irrégularités de surface. Dans tous les cas, il est essentiel que les murs à isoler soient sains et secs. [1]

#### **2.3.1.2. Isolation des murs par l'extérieur**

L'isolation par l'extérieur implique la pose de l'isolant sur la surface externe du mur, ce qui est souvent considéré comme la méthode la plus onéreuse mais aussi la plus efficace. Cette approche offre une isolation optimale pour le confort thermique tant en été qu'en hiver,

car elle préserve l'inertie thermique élevée des murs intérieurs tout en éliminant les ponts thermiques. [1]

### 2.3.2. Confort d'été

Les stratégies les plus fréquentes pour atténuer la chaleur estivale comprennent:

- Favoriser la ventilation en ouvrant les fenêtres lorsque cela est faisable, en tenant compte des considérations telles que le niveau sonore et les risques potentiels d'intrusion.
- Exploiter l'inertie thermique du bâtiment, qui consiste à utiliser sa capacité à stocker la fraîcheur la nuit afin de limiter l'augmentation de la température pendant la journée.
- Limiter les gains de chaleur solaire à travers les ouvertures en installant des volets ou des stores. Les architectes et les ingénieurs qui conçoivent de nouveaux bâtiments intègrent ces trois approches pour garantir que, selon le climat local, les températures estivales demeurent en dessous d'un niveau prédéterminé.

Lorsque l'ouverture des fenêtres n'est pas possible dans les zones bruyantes pour permettre une ventilation adéquate et un rafraîchissement nocturne, l'installation d'un système de climatisation est souvent considérée comme une solution pour améliorer le confort en été. [1]

## 3. L'énergie solaire

Ces dernières années, des progrès significatifs ont été réalisés grâce à la technologie qui nous permet de générer de l'énergie solaire.

L'énergie solaire est une source d'énergie solaire. Cela signifie que la première substance est le soleil. Elle peut être considérée comme inapplicable et est classée comme énergie renouvelable. D'autres ne sont pas d'accord pour dire que la production d'énergie est 100 % verte avec un pourcentage très élevé de CO<sub>2</sub> [9].

## 4. L'énergie solaire active

L'énergie solaire active est créée à partir d'installations spécifiques qui récupèrent les rayons du soleil et les transforment en électricité et en chaleur [10].

### 4.1.L'énergie solaire thermique

Les dispositifs de captation d'énergie solaire thermique contiennent des liquides caloporteurs qui, une fois chauffés par le rayonnement solaire, transmettent cette chaleur à un réservoir d'eau chaude. L'énergie solaire thermique est utilisée dans une gamme d'applications, notamment le chauffage des habitations, la production d'eau chaude sanitaire et même pour alimenter des cuisinières. Contrairement à l'énergie solaire photovoltaïque qui convertit la lumière en électricité, l'énergie solaire thermique produit de la chaleur. Bien qu'elle ne génère pas d'électricité, elle offre une alternative écologique pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles, notamment dans certaines applications industrielles (figure 1.2) [9].



**Figure 1. 2** L'énergie solaire thermique [11]

### 5. L'énergie solaire passive

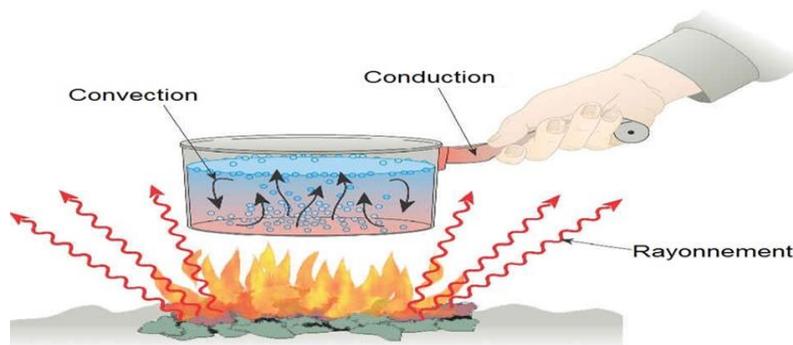
L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue grâce à l'énergie des rayons solaires, qui est convertie en électricité par le biais de panneaux photovoltaïques. Ces panneaux, généralement installés sur les toits pour une meilleure exposition au soleil, sont dotés de cellules photovoltaïques en silicium. Lorsque ces cellules sont exposées à la lumière du soleil, elles absorbent l'énergie des photons lumineux, générant ainsi un courant électrique continu. Cet électricité est ensuite convertie en courant alternatif à l'aide d'un onduleur, et peut être directement utilisée pour alimenter des appareils électriques ou éclairer un espace. Une installation solaire photovoltaïque requiert donc trois éléments essentiels : des panneaux photovoltaïques, un onduleur pour la conversion du courant, et un compteur pour mesurer la quantité d'électricité produite et distribuée [10]



**Figure 1. 3** L'énergie solaire photovoltaïque [12]

## 6. Mode de transfert de chaleur

L'énergie thermique représente l'énergie associée au mouvement aléatoire des particules constituant un objet, résultant de l'agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. Les échanges d'énergie thermique entre différents corps sont appelés transferts thermiques, qui revêtent une importance cruciale en thermodynamique. Lorsque deux corps ont la même température, on dit qu'ils sont en équilibre thermique. En revanche, si les températures sont différentes, le corps le plus chaud transmet de l'énergie au corps le plus froid, entraînant ainsi un transfert de chaleur entre les deux (figure 1.4) [2].



**Figure 1. 4** Définition mode de transfert de chaleur [13]

## 6.1.La conduction

Ce processus de transfert de chaleur est présent dans tous les éléments solides d'une transmission et constitue le mécanisme le plus basique. Il implique le déplacement de chaleur à travers un solide, de la région chaude vers la région froide.

## 6.2.La convection

L'échange thermique par convection se produit lorsque la chaleur est transférée via le mouvement d'un fluide. Contrairement à la conduction, qui est le principal mode de transfert de chaleur à travers les solides, les fluides présentent un comportement différent :

- La conduction thermique se produit en l'absence de mouvement de matière ou dans des écoulements laminaires.
- Dans les écoulements turbulents en contact avec une paroi solide, une mince couche de fluide en écoulement visqueux, considérée comme laminaire, se forme le long de la paroi. L'épaisseur de cette couche dépend des propriétés physiques du fluide et de la nature de l'écoulement.
- Dans une direction perpendiculaire à la paroi, où les lignes de courant sont traversées, aucun mélange de matière n'est observé et la chaleur se propage uniquement par conduction.
- En dehors de la couche laminaire, la chaleur est transférée par le mélange des particules de fluide, favorisant une égalisation rapide de la température.

### **6.3.Le rayonnement**

Le rayonnement thermique est une émission de rayonnement électromagnétique par un corps chaud, le rayonnement a la particularité de se déplacer dans le vide (rayonnement solaire). L'énergie électromagnétique reçue par le système est absorbée et convertie en énergie thermique (chaleur). [2]

## **7. L'échange thermique entre l'individu et l'espace**

Plusieurs facteurs influencent l'échange thermique entre l'individu et l'espace dans les bâtiments :

### **7.1.La température ambiante**

Une température ambiante trop élevée ou trop basse peut perturber l'équilibre thermique du corps.

### **7.2.L'humidité**

Une humidité élevée peut réduire l'efficacité de l'évaporation et donc la capacité du corps à se refroidir.

### **7.3.La vitesse de l'air**

Une vitesse d'air élevée peut augmenter la convection et la dissipation de la chaleur corporelle.

### **7.4.L'activité physique**

Une activité physique intense augmente la production de chaleur du corps.

### **7.5.Les vêtements**

Les vêtements peuvent influencer l'isolation du corps et la capacité à dissiper la chaleur.

Pour garantir un confort thermique optimal dans les bâtiments, il est important de prendre en compte l'ensemble de ces facteurs.

Voici quelques exemples de mesures qui peuvent être prises pour améliorer l'échange thermique entre l'individu et l'espace dans les bâtiments :

- **Isolation des murs et des toits:** Cela permet de réduire les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été.
- **Ventilation adéquate:** Cela permet d'assurer un renouvellement d'air sain et de dissiper la chaleur corporelle.
- **Systèmes de chauffage et de climatisation:** Ils permettent de réguler la température ambiante en fonction des besoins.

## 8. Paramètres affectant les conditions thermiques des bâtiments

### 8.1. Les facteurs liés aux conditions climatiques

#### 8.1.1. Facteurs naturels

- **Latitude :** La latitude joue un rôle crucial dans la quantité de rayonnement solaire qu'une région reçoit. Les zones proches de l'équateur bénéficient généralement d'un ensoleillement plus intense que celles près des pôles.
- **Altitude :** L'altitude influence la température et la pression atmosphérique. En général, les températures baissent avec l'augmentation de l'altitude, tandis que la pression atmosphérique diminue également.
- **Circulation atmosphérique :** La circulation des masses d'air dans l'atmosphère affecte la répartition des températures et des précipitations. Les courants océaniques peuvent également jouer un rôle significatif dans le climat d'une région.
- **Topographie :** La configuration géographique, notamment la présence de montagnes et de vallées, peut influencer le climat local en modifiant les trajectoires des masses d'air et en créant des microclimats.
- **Événements climatiques extrêmes :** Les phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les ouragans, les tempêtes et les sécheresses, peuvent perturber les conditions climatiques normales et avoir des conséquences importantes sur l'environnement et les populations locales.

### 8.1.2. Facteurs anthropiques

- Émissions de gaz à effet de serre : Les gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote, contribuent au réchauffement climatique en piégeant la chaleur dans l'atmosphère.
- Déforestation : La déforestation entraîne une diminution de la capacité des forêts à absorber le dioxyde de carbone de l'atmosphère, ce qui contribue à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre et au changement climatique.
- Urbanisation : L'urbanisation peut créer des îlots de chaleur urbains, où les températures sont plus élevées qu'à la campagne environnante, en raison de l'absorption et de la libération de chaleur par les bâtiments et les surfaces pavées.

### 8.1.3. Conséquences du changement climatique

- Augmentation de la température moyenne : Le réchauffement climatique se traduit par une hausse de la température moyenne mondiale, ce qui entraîne la fonte des glaciers, l'élévation du niveau de la mer et une augmentation des événements météorologiques extrêmes.
- Modifications des précipitations : Les changements climatiques affectent la répartition et l'intensité des précipitations, provoquant des sécheresses dans certaines régions et des inondations dans d'autres.
- Acidification des océans : L'absorption accrue de dioxyde de carbone par les océans entraîne une acidification de l'eau, ce qui a des conséquences néfastes sur les écosystèmes marins et la biodiversité.

Il est important de comprendre les facteurs liés aux conditions climatiques pour pouvoir s'adapter aux changements climatiques et atténuer leurs effets.

## 8.2. Les facteurs du confort thermique lié aux occupants

### 8.2.1. Facteurs physiologiques

- Âge : Les personnes âgées et les jeunes enfants sont plus sensibles aux variations de température en raison de leur capacité réduite à réguler leur température corporelle.
- Sexe : Les femmes ont tendance à ressentir plus le froid que les hommes en raison de différences physiologiques.

- État de santé : Certaines conditions médicales peuvent influencer la sensation de confort thermique, notamment les troubles circulatoires ou hormonaux.
- Métabolisme : Le métabolisme individuel joue un rôle dans la production de chaleur corporelle, qui varie selon l'activité physique et le poids corporel.
- Habillement : Les vêtements portés peuvent modifier la perception du confort thermique en affectant la capacité du corps à réguler sa température.

### **8.2.2. Facteurs psychologiques**

- Acclimatation : Les individus peuvent s'habituer à des conditions thermiques spécifiques au fil du temps, ce qui influence leur perception du confort.
- Attentes : Les attentes individuelles concernant le confort thermique peuvent être influencées par des facteurs culturels ou environnementaux.
- État psychologique : Le bien-être émotionnel et le niveau de stress peuvent influencer la perception du confort thermique.

### **8.2.3. Facteurs individuels**

- Activités : Le niveau d'activité physique influence la production de chaleur corporelle et donc la sensation de confort thermique.
- Préférences : Les préférences personnelles en matière de température et d'humidité varient d'une personne à l'autre et peuvent affecter leur perception du confort.

Le confort thermique des occupants est le résultat d'une combinaison complexe de facteurs individuels, environnementaux et psychologiques. Pour assurer un confort thermique optimal, il est essentiel de tenir compte de ces divers éléments et de concevoir les espaces en conséquence. Une approche holistique qui prend en considération les besoins spécifiques des occupants, les caractéristiques du bâtiment, les conditions climatiques locales et les facteurs psychologiques peut contribuer à créer des environnements intérieurs agréables et confortables pour tous.

### 8.3. Les facteurs liés au cadre bâtiment

#### 8.3.1. La forme architecturale

En ce qui concerne l'orientation, la compacité, la forme du toit, la présence de fenêtres et les matériaux de construction, ces éléments jouent tous un rôle crucial dans le confort thermique d'un bâtiment.

- **L'orientation** : du bâtiment par rapport au soleil est essentielle car elle détermine la quantité de rayonnement solaire qu'il reçoit. Une orientation adéquate peut permettre au bâtiment de bénéficier du soleil en hiver pour un chauffage naturel, tout en évitant une surchauffe en été.
- **La compacité du bâtiment** : c'est-à-dire sa surface extérieure par rapport à son volume, influence également le confort thermique. Un bâtiment compact réduit les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été.
- **La forme du toit** : peut affecter la circulation de l'air et l'accumulation de chaleur. Un toit en pente favorise une meilleure évacuation de l'air chaud, tandis qu'un toit plat peut retenir la chaleur en été.

La taille, la position et le type de fenêtres sont également importants. Des fenêtres bien placées et dimensionnées peuvent optimiser l'apport de lumière naturelle et de chaleur solaire en hiver, tout en minimisant les gains de chaleur excessifs en été.

Enfin, les matériaux de construction jouent un rôle crucial. Certains matériaux, comme le bois, offrent une meilleure isolation thermique que d'autres, comme le béton.

Pour favoriser le confort thermique, des formes architecturales spécifiques peuvent être adoptées. Les bâtiments bioclimatiques exploitent le climat local pour le chauffage et le refroidissement naturels, tandis que les maisons solaires passives captent et stockent le rayonnement solaire. Les bâtiments à énergie positive produisent même plus d'énergie qu'ils n'en consomment, grâce à des technologies durables telles que les panneaux solaires et les éoliennes.

### 8.3.2. L'orientation

L'orientation d'un bâtiment est un aspect fondamental pour garantir un confort thermique optimal, étant donné son impact direct sur la réception du rayonnement solaire. Il influence significativement la température intérieure, ainsi que les besoins en chauffage et en climatisation. Voici quelques considérations importantes concernant l'orientation d'un bâtiment :

- **Dans l'hémisphère nord :**

Les façades sud reçoivent davantage de soleil en hiver et moins en été, en faisant ainsi l'orientation idéale pour les espaces de vie comme le salon et la salle à manger.

Les façades nord, quant à elles, bénéficient du moins de soleil tout au long de l'année, les rendant idéales pour les pièces nécessitant moins de lumière naturelle, telles que les chambres à coucher et les garages.

Les façades est et ouest reçoivent respectivement le soleil le matin et le soir, ce qui en fait une bonne orientation pour les pièces nécessitant de la lumière naturelle à des moments spécifiques de la journée, comme la cuisine et la salle de bain.

- **Dans l'hémisphère sud :**

L'orientation est inverse à celle de l'hémisphère nord. Les façades nord reçoivent le plus de soleil en hiver et le moins en été, tandis que les façades sud reçoivent le moins de soleil toute l'année.

Il est essentiel de tenir compte du climat local lors de l'orientation d'un bâtiment :

- Dans les régions froides, maximiser l'apport solaire en hiver en orientant les façades principales vers le sud et en installant de grandes fenêtres est crucial.
- Dans les régions chaudes, minimiser l'apport solaire en été en orientant les façades principales vers le nord et en installant des protections solaires telles que des auvents ou des volets est recommandé.
- L'orientation d'un bâtiment peut également impacter la vue et l'intimité, ce qui doit être pris en compte lors de sa conception.

## 9. Schéma de principe du mur trombe

### 9.1. Qu'est-ce que c'est le mur trombe

Dans les années 1950 à 1970, le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel ont expérimenté et perfectionné le concept du mur Trombe, également connu sous le nom de mur Trombe-Michel, qui tire son nom de leurs travaux. Ce système a été développé dans le cadre des constructions bioclimatiques, visant à minimiser les besoins en chauffage et à exploiter de manière optimale l'énergie solaire. Leur approche repose sur l'utilisation du phénomène de tirage thermique pour capter l'énergie solaire et la redistribuer dans les espaces intérieurs des bâtiments associés, offrant ainsi une méthode efficace pour chauffer les pièces de manière écologique et économique. [3]

### 9.2. Définition du mur trombe

Le mur Trombe représente une solution de chauffage solaire ingénieuse et simple, utilisant l'énergie solaire. Ce système implique un mur massif, généralement en béton, idéalement orienté au sud pour capturer pleinement les rayons du soleil tout au long de la journée. Une vitre est installée sur la face extérieure de ce mur, souvent de teinte sombre. Entre le mur et la vitre se trouve une couche d'air. Pendant la journée, la lumière solaire pénètre aisément à travers la vitre pour être absorbée par le mur. Les infrarouges émis par le mur ne peuvent pas traverser à nouveau la vitre, restant ainsi piégés dans la couche d'air intermédiaire. Cela permet à l'air chaud de s'accumuler, prêt à être diffusé dans la maison pour fournir de la chaleur. [8]

### 9.3. Composantes du mur trombe

#### ➤ Comment est conçu un mur trombe ?

La conception efficace d'un mur Trombe repose sur le respect de certaines normes de conception, qui comprennent les éléments suivants, de l'extérieur vers l'intérieur :

- **Le vitrage** : Comme élément initial du mur Trombe, le vitrage doit permettre le passage efficace de la chaleur solaire tout en favorisant sa circulation. L'utilisation de doubles vitrages à faible émissivité peut considérablement améliorer l'efficacité du mur. Pour retenir l'énergie thermique à l'intérieur du bâtiment pendant la nuit, l'installation de volets roulants est fortement recommandée.

- **L'espace entre le mur et le vitrage :** L'espace entre le mur et le vitrage est également crucial. C'est dans cet espace que l'air se réchauffe et que le phénomène d'effet de serre se produit. Une distance minimale de 10 cm est nécessaire pour un système efficace, avec une moyenne d'environ quinze centimètres.
- **Le mur :** Le mur constitue l'autre élément crucial du mur Trombe. Sa fonction est d'absorber autant de chaleur que possible pour la restituer par la suite. Idéalement, le mur doit être massif et de couleur sombre pour une meilleure absorption de la chaleur. Les matériaux comme la pierre et le béton sont privilégiés, tandis que l'utilisation de parpaings creux est évitée. L'épaisseur du mur doit être adaptée en fonction du matériau utilisé et de la durée d'ensoleillement disponible en hiver. Par exemple, dans les régions où l'ensoleillement efficace ne dépasse pas cinq heures en moyenne, un mur trop épais risquerait de ne pas se réchauffer suffisamment en profondeur, entraînant des pertes de chaleur. En revanche, un mur trop mince causerait des déperditions thermiques excessives qui ne seraient pas compensées par l'apport solaire. Pour un matériau comme le béton, une épaisseur optimale se situe entre 20 et 30 cm. La hauteur du mur est généralement inférieure à celle de la surface vitrée pour permettre l'installation de prises d'air en haut et en bas du mur. Il est également essentiel de noter que le mur Trombe ne doit pas être isolé, ni à l'extérieur ni à l'intérieur.
- **Le rôle de la couleur :** Il est bien connu qu'un mur Trombe doit avoir une couleur foncée, cependant, toutes les teintes foncées ne se valent pas. Par exemple, un mur peint en noir bénéficie d'un coefficient d'absorption solaire de 0,95, tandis qu'une teinte bleu foncé peut avoir un coefficient d'absorption légèrement moins élevé, d'environ 0,85.
- **Les clapets :** jouent un rôle crucial dans le fonctionnement d'un mur Trombe. Placés en haut et en bas du mur, ces clapets permettent à l'air de circuler et de passer de froid à chaud. En cas de faible ensoleillement, leur fermeture empêche la chaleur de s'échapper de la maison en hiver, tandis qu'en été, elle limite le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur. Pendant les périodes les plus chaudes de l'été, l'ouverture du clapet supérieur permet à l'air chaud de l'intérieur de s'échapper. Pour une efficacité optimale, il est possible d'automatiser le système d'ouverture et de fermeture des clapets en fonction des indications fournies par des sondes de température. De plus, pour assurer une circulation d'air équilibrée, la surface des clapets doit être presque identique en haut et en bas. [14]

## 9.4. Les techniques des murs trombes

Le mur Trombe, un dispositif de chauffage solaire passif, exploite un mur dense et sombre pour capturer la chaleur du soleil et la transférer à l'intérieur d'un espace. Cette approche, à la fois simple, performante et rentable, trouve son application dans des climats à la fois froids et modérés.

Voici les principales techniques des murs Trombe :

- **Le mur capteur :**

- Le mur capteur est le composant principal d'un mur Trombe. Il est généralement constitué d'un matériau dense et foncé, tel que le béton, la pierre ou la brique.
- La couleur foncée du mur permet d'absorber plus efficacement la chaleur du soleil.
- L'épaisseur du mur permet de stocker la chaleur et de la diffuser ensuite dans l'espace intérieur.

- **La lame d'air :**

- Une lame d'air est située entre le mur capteur et la vitre extérieure.
- Cette lame d'air permet de chauffer l'air par convection naturelle.
- L'air chaud monte et est ensuite diffusé dans l'espace intérieur par des ouvertures situées en haut du mur.

- **La vitre extérieure :**

- La vitre extérieure du mur trombe sert à deux fonctions essentielles : elle protège le mur capteur des conditions météorologiques extérieures, tout en favorisant un effet de serre qui accroît l'efficacité globale du système.

- **Les ouvertures :**

- Des ouvertures sont situées en bas et en haut du mur Trombe.
- Les ouvertures en bas permettent à l'air frais d'entrer dans la lame d'air.
- Les ouvertures en haut permettent à l'air chaud de sortir de la lame d'air et de se diffuser dans l'espace intérieur.

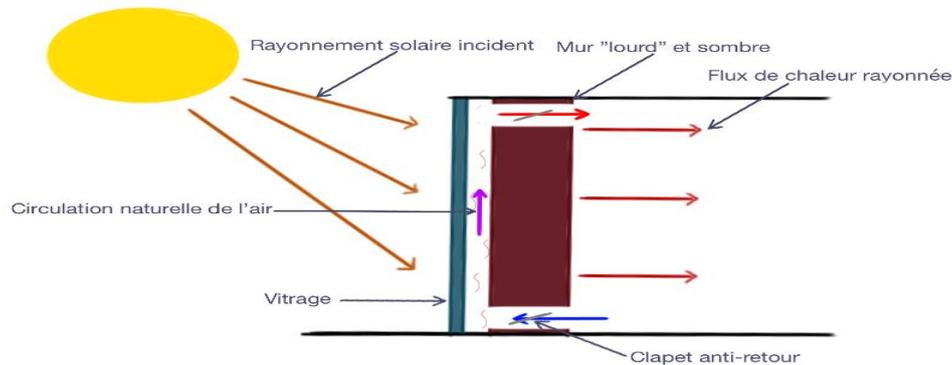
- **Les variations :**

- Il existe différentes variations du mur Trombe, telles que le mur Trombe ventilé et le mur Trombe à double vitrage.

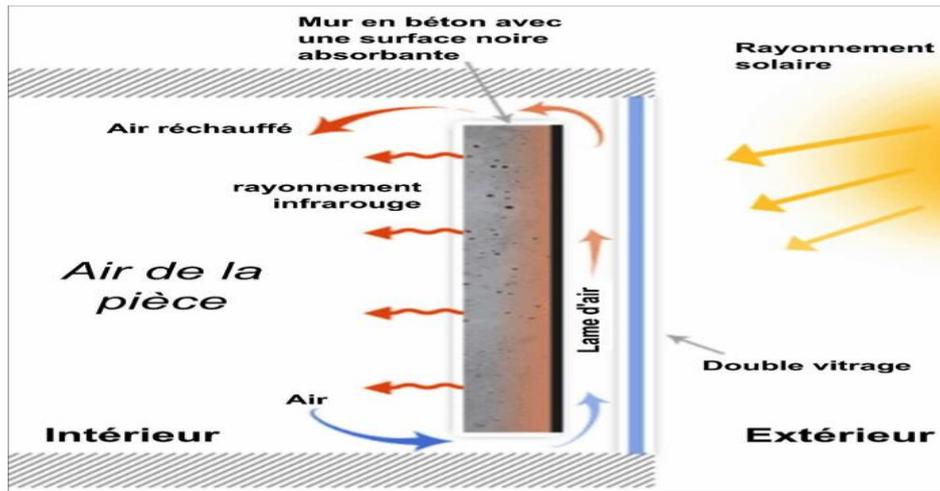
- Le mur Trombe ventilé utilise un ventilateur pour forcer la circulation de l'air dans la lame d'air.
- Le mur Trombe à double vitrage utilise deux vitres extérieures, ce qui permet d'améliorer l'efficacité du système.

### 9.5.Principe de fonctionnement de mur trombe

Le mur Trombe est constitué d'une structure en béton avec une façade vitrée, laissant un espace d'air entre les deux. Il est doté d'ouvertures en haut et en bas pour favoriser la circulation de l'air. Son fonctionnement varie selon les saisons, avec une capacité à capter les rayons solaires par trois modes de transfert de chaleur : premièrement, une partie est absorbée par le mur, souvent peint dans une teinte sombre pour une meilleure absorption, puis restituée à l'intérieur par convection. Deuxièmement, une portion de chaleur est transférée par la circulation de l'air chaud emprisonné entre le mur et la vitre, agissant comme une sorte de cheminée solaire. Enfin, une troisième partie de la chaleur est transmise par rayonnement. Ce système offre ainsi une méthode efficace pour chauffer un espace de manière écologique et économe en énergie. [3]



**Figure 1. 5** La spécificité du mur Trombe [14]



**Figure 1.6** Principe du fonctionnement du mur trombe [15]

Toute variation de température dans un fluide, qu'il s'agisse d'un liquide ou d'un gaz, entraîne un changement de densité et induit un mouvement de convection. Ce phénomène se caractérise par le déplacement des parties chaudes du fluide vers le haut, tandis que les parties froides et plus denses descendent, créant ainsi un mouvement d'agitation. La convection joue un rôle essentiel dans de nombreux échangeurs de chaleur, car elle facilite le transfert de chaleur entre le fluide en mouvement et la paroi. Bien que les trois processus de transfert de chaleur puissent se produire simultanément, la convection est généralement prédominante en raison de sa prévalence dans de nombreuses situations de la vie quotidienne.

En ce qui concerne le mur Trombe, son utilisation varie selon les saisons et les moments de la journée. [3]

## 9.6. Le fonctionnement d'un mur Trombe

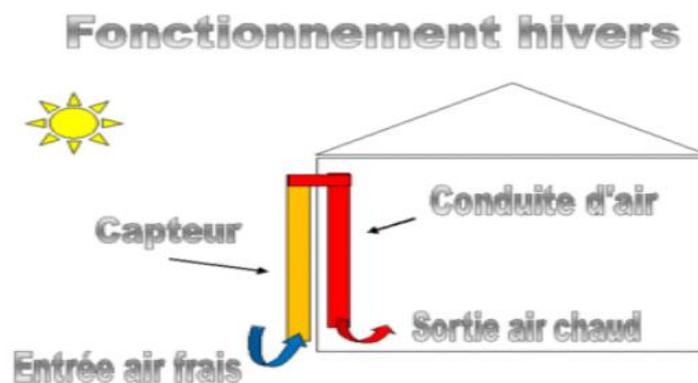
### 9.6.1. Fonctionnement de la paroi thermique en hiver

La paroi thermique est étroitement liée au principe du thermosiphon, où l'air chaud entre le verre et le mur interagit avec l'air plus frais à l'arrière du mur.

Pendant la journée, lorsque la lumière du soleil traverse la surface transparente, une partie de la chaleur est absorbée par le mur sombre, puis distribuée à l'intérieur, tandis que le reste est emprisonné dans l'espace entre le verre et le mur. Selon les principes de la thermodynamique, une partie de cette chaleur est utilisée pour chauffer l'air froid entre le verre et le mur, ce qui entraîne une circulation naturelle de l'air chaud vers le haut. Ce processus est commun à tous les types de murs solaires, y compris les murs Trombe.

Une caractéristique innovante du mur Trombe est l'ajout d'évents dans sa partie supérieure, favorisant ainsi la circulation de l'air. Cette circulation repose sur le déplacement de l'air chaud vers le haut, tandis que l'air plus frais provenant des évents inférieurs vient combler le vide d'air créé.

Pendant la nuit, le mur Trombe subit une circulation d'air inversée, nécessitant la fermeture des évents pour éviter les pertes de chaleur. En désactivant le système et en fermant les évents, le mur agit alors comme une paroi thermique, ce qui, combiné à une isolation nocturne, permet de contrôler et de réduire les pertes de chaleur, surtout en l'absence de radiation solaire. (Figure 1.7) [4]



**Figure 1.7** Fonctionnement hiver : l'air extérieur est réchauffé par le mur Trombe [4]

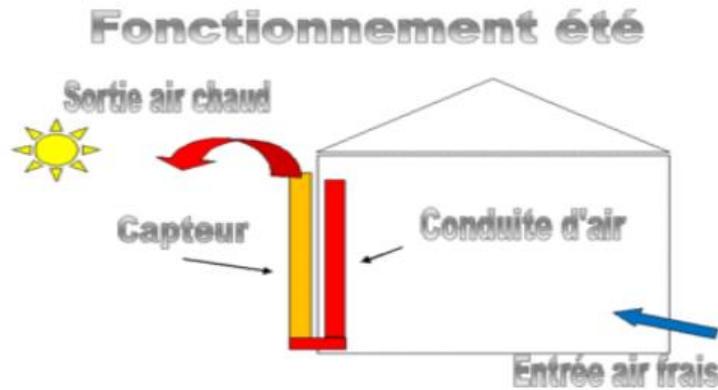
### 9.6.2. Fonctionnement de la paroi thermique en été

Pendant l'été, la plupart des systèmes solaires passifs peuvent être inactivés ou utilisés pour le refroidissement. Le mur thermique, qu'il soit avec ou sans évents (mur de masse), offre différentes méthodes de refroidissement :

En fournissant de l'ombre, on réduit la possibilité de stockage thermique, ce qui peut être réalisé avec un mur de masse ou un mur Trombe.

En retirant l'air chaud par l'ouverture des grilles supérieure et inférieure du vitrage du mur isolant.

En générant un flux d'air avec une ouverture dans le vitrage supérieur et une autre dans la paroi inférieure, créant ainsi un effet de "cheminée solaire" qui aspire l'air intérieur vers l'extérieur grâce à une basse pression d'air entre le vitrage et le mur. [4]



**Figure 1. 8** Fonctionnement été : l'air intérieur est aspiré par le capteur [4]

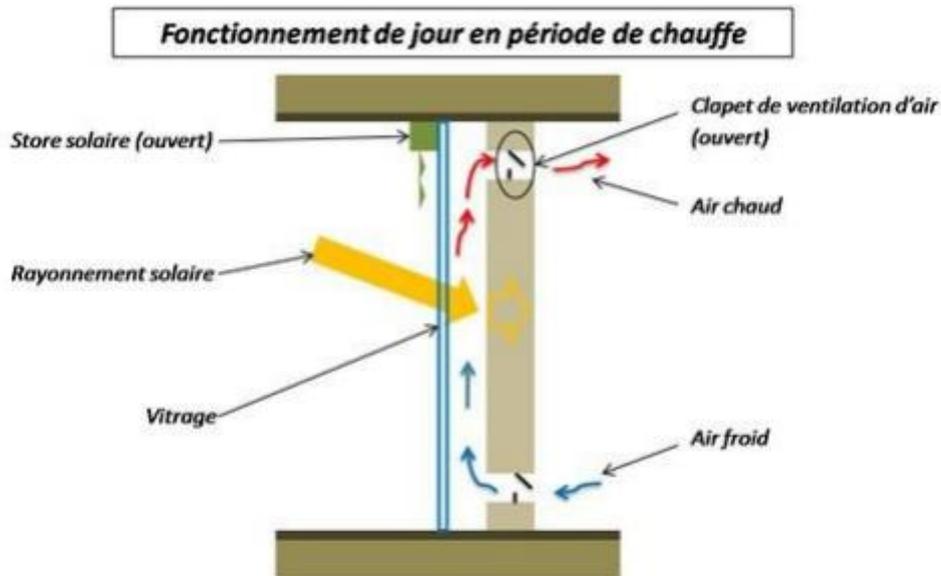
## 10. Description de système de chauffage par mur trombe

Le Professeur Trombe du C.N.R.S (France) a développé une méthode de chauffage solaire connue sous le nom de mur Trombe. Ce système utilise l'énergie solaire en captant la chaleur à travers un mur sombre orienté plein sud, auquel est ajouté un vitrage pour créer un effet de serre. Le mur, souvent fait de pierre ou de béton lourd pour profiter de leur inertie thermique, agit comme un capteur de chaleur. Il est conçu avec des orifices dans sa partie basse et sa partie haute pour permettre la circulation de l'air entre l'espace intérieur et la lame d'air entre le vitrage et la surface du mur. [5]

Contrairement aux murs capteurs accumulateurs de base, le transfert thermique vers l'intérieur peut s'effectuer de deux façons :

### 10.1. Fonctionnement de mur Trombe pendant le jour (période de chauffe)

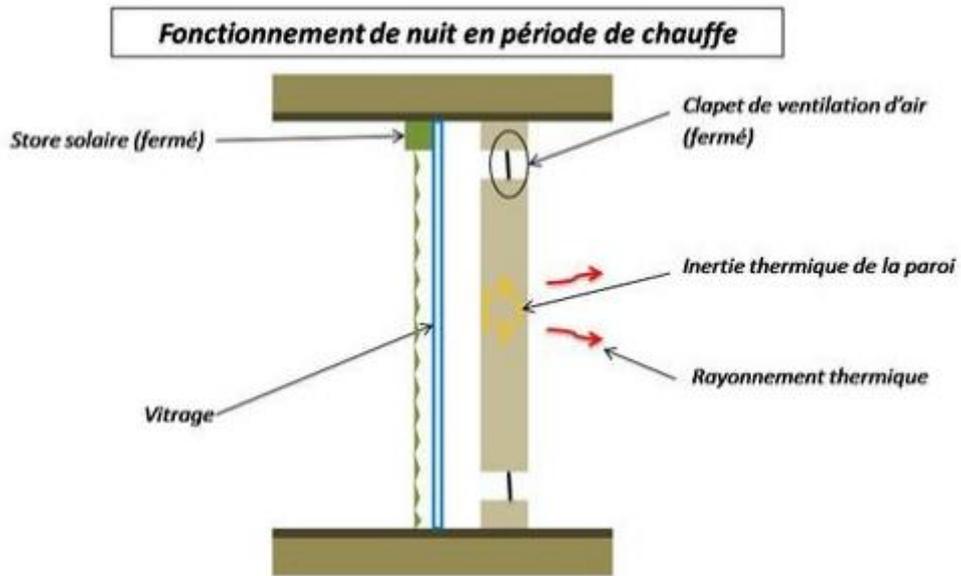
Lorsque la façade est exposée au soleil, les orifices placés dans le mur permettent à la chaleur de se diffuser par thermo circulation : l'air entre par les ouvertures inférieures du mur, se réchauffe au contact de la paroi (pouvant atteindre jusqu'à 65°C), puis remonte vers l'intérieur par les ouvertures supérieures. [5]



**Figure 1. 9** Fonctionnement de jour en période de chauffe [5]

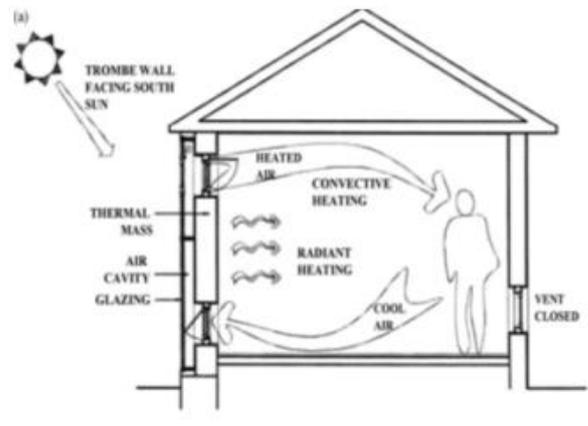
## 10.2. Fonctionnement de mur Trombe pendant la nuit

Une fois que le besoin de chauffage immédiat diminue ou lorsque l'exposition au soleil cesse, les ouvertures du bas et du haut du mur sont closes. La chaleur emmagasinée par le mur est ensuite progressivement libérée dans l'espace habitable par rayonnement, agissant ainsi comme un simple mur capteur. Les études sur les premières maisons expérimentales dotées de murs Trombe ont démontré que l'énergie solaire utilisée pouvait couvrir de 70% à 85% des besoins en chauffage sans recours à une assistance mécanique. Grâce à des avancées technologiques telles que des vitrages plus performants, ces résultats sont désormais atteignables sur des projets plus diversifiés et avec des surfaces moins importantes. Par exemple, pour une maison de 100m<sup>2</sup> à Paris, on peut espérer récupérer jusqu'à 175 kWh/(m<sup>2</sup>.an) grâce à cette technique. [5]

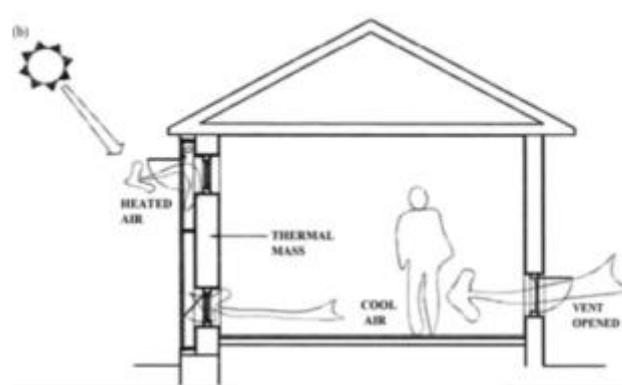


**Figure 1. 10** Fonctionnement de nuit en période de chauffe [5]

En ce qui concerne le fonctionnement durant l’hiver et l’été, la différence est que durant l’hiver le système est fermé et durant l’été est ouvert suivant la figure 1.11 et la figure 1.12



**Figure 1. 11** Fonctionnement Hiver [5]



**Figure 1. 12** Fonctionnement d'été [5]

### 10.3. Caractéristiques du vitrage et de la lame d'air

Le choix du vitrage pour un mur Trombe nécessite de trouver un équilibre entre la résistance thermique et la transmission du rayonnement solaire. Les vitrages simples offrent une meilleure transmission du rayonnement, mais ils sont moins efficaces lors des périodes sans ensoleillement. En revanche, les vitrages peu émissifs, grâce à un revêtement réfléchissant mince, réduisent les pertes de chaleur par rayonnement infrarouge depuis l'intérieur, ce qui en fait une option intéressante pour améliorer l'efficacité énergétique de la paroi. [5]

## 11. Avantages et inconvénients

Comme tout système de chauffage, le mur Trombe présente à la fois des avantages et des inconvénients.

### Les avantages du mur Trombe sont multiples :

- Il permet de réaliser des économies sur les factures énergétiques.
- Écologique, il utilise le soleil comme source d'énergie renouvelable et propre, ne produisant aucun gaz toxique ou à effet de serre.
- Non soumis à une réglementation stricte, il est simple à utiliser et ne nécessite pas l'installation de capteurs thermiques, sauf si l'automatisation est choisie.
- Les risques de panne sont minimes. [16]

**Cependant, le mur Trombe présente également des inconvénients :**

- Esthétiquement, il n'est pas très attrayant en raison de sa couleur sombre, ce qui peut rendre son intégration dans une construction globale difficile.
- Ses contraintes d'exposition au sud et d'ensoleillement régulier rendent son intégration dans un projet de construction complexe.
- En l'absence d'ouverture, il peut priver l'intérieur d'un logement de lumière naturelle.
- Le nettoyage du vitrage est compliqué, notamment la partie intérieure qui nécessite de démonter la vitre.
- Il peut être difficile pour un mur Trombe de répondre à tous les besoins de chauffage d'un logement, nécessitant souvent un complément de chauffage, surtout en hiver.
- Bien qu'écologique et économique à long terme, la construction d'un mur Trombe ne donne pas droit à des aides financières. [16]

**12. Le coût d'un mur trombe**

Étant donné que la technique du mur Trombe est encore peu répandue en France, il est difficile d'estimer précisément le coût de ce type d'ouvrage. Cependant, il est raisonnable de supposer que le coût d'un mur Trombe sera généralement plus élevé que celui d'un mur classique, en raison des facteurs suivants :

- Une étude de faisabilité approfondie est essentielle avant de commencer tout projet, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires.
- Les ouvrages doivent souvent être réalisés sur mesure pour s'adapter aux spécificités de chaque projet, ce qui peut augmenter les coûts de construction.
- En raison de la nécessité de vitrages de grande taille pour les murs Trombe, le coût du vitrage est également supérieur à celui des projets de construction traditionnels.
- Les professionnels qualifiés et expérimentés dans la conception et la construction de murs Trombe étant rares, leurs services peuvent être plus onéreux. [5]

### 13. Conclusion

Le mur Trombe est principalement conçu comme un système de chauffage ou de rafraîchissement solaire. Il est essentiel que le capteur soit isolé de la structure principale de la maison pour éviter la surchauffe en été et les pertes de chaleur la nuit. Son fonctionnement est principalement diurne, ce qui le rend adapté aux établissements qui n'ont pas besoin de chauffage ou de refroidissement pendant la nuit, tels que les écoles et les bureaux. Le terme "mur" fait référence au positionnement vertical des capteurs contre le mur le plus exposé au soleil, comme le côté nord dans l'hémisphère sud.

## **Chapitre 2 : Formulation mathématique**

## 1. Introduction

Ce chapitre met en lumière les principes fondamentaux de la mécanique des fluides, en mettant particulièrement l'accent sur l'aspect énergétique, essentiel pour l'ingénieur qui doit souvent traiter avec des écoulements de fluides non isothermes.

L'objectif est de présenter de manière claire et unifiée les concepts applicables à tous les fluides, se concentrant spécifiquement sur les fluides monophasiques newtoniens.

Il aborde également la dynamique des fluides en décrivant les caractéristiques d'un écoulement turbulent, marqué par un mouvement irrégulier et chaotique des particules du fluide.

Contrairement à l'écoulement laminaire, les couches de fluide ne s'écoulent pas de manière parallèle, entraînant un mélange latéral important et des ruptures entre les couches. La turbulence se manifeste également par des zones de recirculation, des tourbillons et un comportement aléatoire.

Dans ce chapitre, nous examinons une approche pour résoudre ces équations, ainsi que leurs conditions limitent associées, en utilisant un logiciel de simulation numérique composé de deux parties : un outil de prétraitement (GAMBIT) pour la création de maillages et un solveur (FLUENT) pour la résolution des équations de Navier-Stokes qui décrivent le mouvement du fluide, ainsi que la conservation de la masse et de l'énergie.

## 2. Modèle physique

Les cas étudiés sont les suivants :

### 2.1. Premier cas : Mur trombe simple

Les dimensions du mur sont la hauteur  $H$  et la longueur  $L$  ( $H \times L = 3\text{m} \times 0.9\text{m}$ ). La hauteur de l'air entrée et sortie = 0.2m.

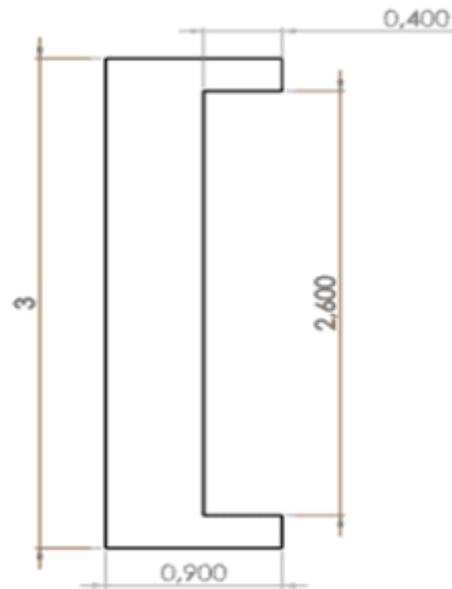


Figure 2. 1 Mur trombe simple

### 2.2. Deuxième cas : Mur trombe (rainure carré)

Les dimensions du mur sont la hauteur  $H$  et la longueur  $L$  ( $H \times L = 3\text{m} \times 0.9\text{m}$ ). La longueur reste constante pour tous les autres  $0.1\text{m}$  (la hauteur de l'air entrée et sortie =  $0.2\text{m}$ ).

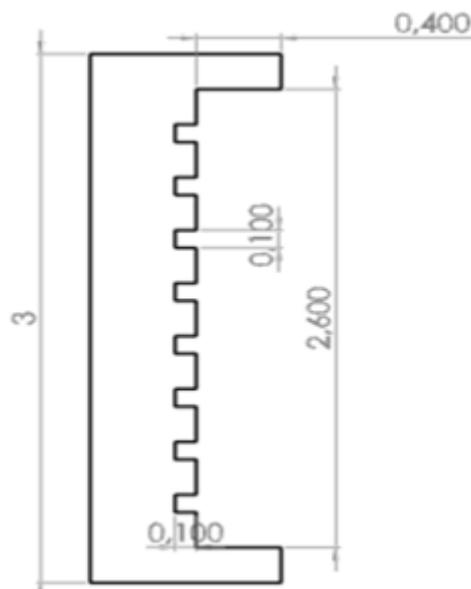


Figure 2. 2 Mur trombe rainure carré

### 2.3. Troisième cas : Mur trombe (rainure circulaire)

Les dimensions du mur sont la hauteur  $H$  et la longueur  $L$  ( $H \times L = 3\text{m} \times 0.9\text{m}$ ). La longueur reste constante pour tous les autres  $0.2\text{m}$  (la hauteur de l'air entrée et sortie =  $0.2\text{m}$ ).

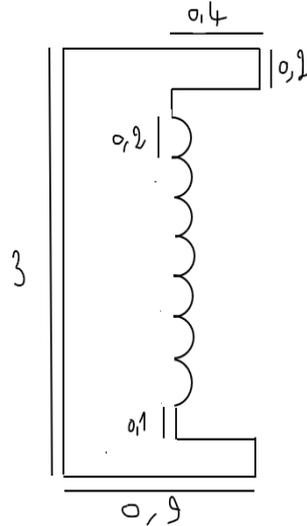


Figure 2. 3 Mur trombe rainure circulaire

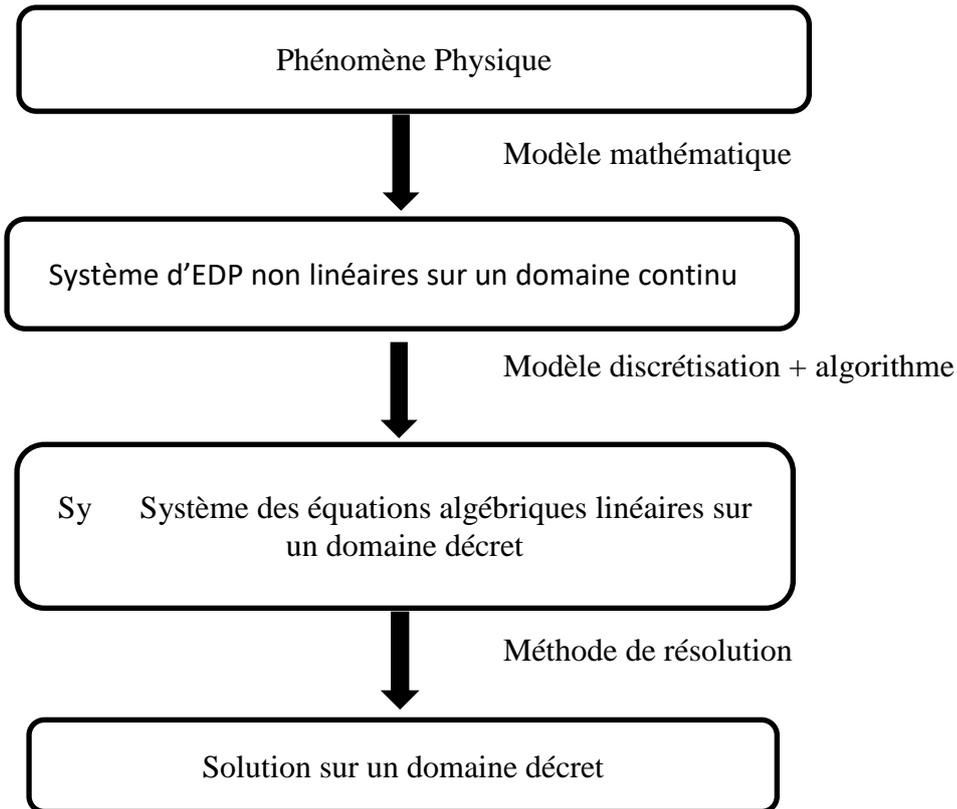
### 3. Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices retenues dans l'étude sont les suivantes :

- Le fluide utilisé est un fluide newtonien.
- L'écoulement est incompressible.
- L'écoulement de l'air est considéré stationnaire.
- Les propriétés de l'air sont considérées constantes.
- L'hypothèse de Boussinesq : propriétés de l'air sont considérées comme constantes, à l'exception des variations de densité du fluide dues à des variations de température.

### 4. Calcul numérique

Le modèle mathématique est formulé sous la forme d'un système d'équations aux dérivées partielles (EDP), qui est ensuite discrétisé en un système d'équations algébriques à l'aide d'une méthode appropriée. Le processus de calcul numérique est illustré dans la Figure (2.4)



**Figure 2. 4** Principe de calcul numérique

## 5. Les différentes méthodes numériques de discrétisation

Pour passer d'un problème exact (continu) à un problème approximatif (discret), il existe différentes techniques concurrentes et complémentaires parmi lesquelles les plus connues sont :

- Méthode des différences finis (MDF).
- Méthode des éléments finis (MEF).
- Méthode de volumes finis (MVF).

### 5.1.Méthode des différences finis

La méthode des différences finies a été pionnière dans les premières simulations en mécanique des fluides et en transfert de chaleur entre 1960 et 1965. Son principe consiste à discrétiser les équations aux nœuds de la grille en calculant chaque dérivée partielle à l'aide du développement de Taylor. Cela permet d'obtenir des équations linéaires qui relient les variables inconnues à un nœud aux valeurs de ces mêmes variables aux nœuds voisins. La précision du schéma dépend du nombre de nœuds de l'ensemble retenu pour approximer une

dérivée donnée et de la qualité du maillage effectué, qui implique généralement l'utilisation d'un maillage régulier et structuré. [6]

### 5.2.Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une approche utilisée pour discrétiser l'espace en utilisant des éléments géométriques simples, tels que des triangles ou des quadrangles. Cette méthode, souvent privilégiée en raison de sa capacité à modéliser des géométries complexes, a été initialement développée dans les années 1970 pour résoudre les équations de Navier-Stokes. Dans cette méthode, les équations sont reformulées sous une forme faible, où les inconnues sont approchées par une combinaison linéaire de fonctions de base ayant un support élémentaire. Les valeurs inconnues sont ensuite calculées en utilisant cette combinaison linéaire de fonctions. L'approche des éléments finis se déroule en deux étapes principales :

Tout d'abord, l'approximation des fonctions inconnues par des fonctions d'interpolation définies sur des sous-domaines, puis l'utilisation de la méthode des résidus pondérés, telle que la méthode de Galerkin.

Cette dernière permet de construire une formulation intégrale des équations aux dérivées partielles, offrant ainsi une approche conservatrice sur un domaine donné. [6]

### 5.3.La méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis repose sur la subdivision du domaine physique de l'écoulement en éléments de volume appelés volumes de contrôle. Ces volumes sont souvent de formes variables et régulières. Les équations qui régissent l'écoulement sont intégrées à l'intérieur de ces volumes de contrôle de manière conservatrice. L'objectif est de transformer les équations différentielles en un système d'équations algébriques, reliant les valeurs des variables telles que la pression, la vitesse ou la température aux points adjacents du volume de contrôle.

Pour mettre en œuvre la méthode des volumes finis, plusieurs étapes sont généralement suivies :

- Le domaine de calcul est divisé en volumes de contrôle discrets à l'aide d'un maillage.

- Les équations régissant l'écoulement sont intégrées sur chaque volume de contrôle individuel, permettant ainsi de construire les équations algébriques pour les variables discrètes (inconnues) telles que la vitesse, la pression, la température, et autres grandeurs scalaires conservées.
- Les équations discrétisées sont linéarisées, et le système d'équations linéaires résultant est résolu pour déterminer les valeurs des variables dépendantes. De nombreux logiciels de simulation numérique en mécanique des fluides se basent sur la méthode des volumes finis, tels que Fluent, Star CD, CFX, Fine turbo. [6]

### 5.3.1. Avantages et inconvénients

- Bien adaptée aux lois de conservation.
- Permet des maillages non-structurés (géométries complexes).
- Difficulté à monter en ordre. [6]

## 6. Principe de la méthode des volumes finis

Les étapes des résolutions de la méthode des méthodes finis sont les suivantes :

### 6.1. Maillage

La méthode implique de subdiviser le domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales, où chaque intersection représente un nœud contenant les composantes  $u$  et  $v$  de la vitesse vectorielle. Ces composantes sont situées au milieu des segments reliant deux nœuds adjacents. Le maillage est constitué d'un réseau de points où les grandeurs scalaires telles que la pression et la température sont stockées au nœud  $P$ , tandis que les grandeurs vectorielles  $u$  et  $v$  sont placées au milieu des segments entre les nœuds.

Les équations de transport sont intégrées sur les volumes de contrôle associés aux variables scalaires, tandis que les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur les volumes de contrôle associés aux composantes de vitesse. Le volume de contrôle pour la composante longitudinale  $u$  est décalé selon la direction  $x$  par rapport au volume de contrôle principal, tandis que celui de la composante transversale  $v$  est décalé selon la direction  $y$ .

Ce type de maillage, appelé maillage décalé, permet une approximation précise des flux convectifs et une meilleure évaluation des gradients de pression, ce qui contribue à stabiliser numériquement la solution. [6]

## 6.2. Discrétisation des équations gouvernantes

L'étape fondamentale de la méthode des volumes finis réside dans l'intégration des équations régissant l'écoulement pour chaque volume de contrôle. Cette intégration produit des équations algébriques qui simplifient la résolution des équations de transport. Chaque nœud du maillage est entouré par un ensemble de surfaces qui définissent un volume de contrôle. Les variables pertinentes du problème ainsi que les caractéristiques du fluide sont enregistrées aux nœuds de ces volumes. Les équations décrivant l'écoulement sont exprimées sous forme moyennée dans un système de coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$ . [6]

## 6.3. Les équations gouvernantes

Le problème considéré est gouverné par les équations couplées de Navier Stokes pour un fluide incompressible, tenant compte de l'hypothèse de Boussinesq, et de l'énergie dans laquelle le terme de la dissipation visqueuse a été négligé. [6]

### 6.3.1. Equation de continuité

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

### 6.3.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement

Suivant l'axe x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.2)$$

Suivant l'axe y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_0) \quad (2.3)$$

### 6.3.3. Equation de la conservation de l'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.4)$$

Où :

- $u$  : est la composante de la vitesse suivant la direction x.
- $v$  : est la composante de la vitesse suivant la direction y.

- $\rho$  : La masse volumique.
- $T$  : Température du local.
- $\alpha$  : Diffusivité thermique.

## 7. Approximation de Boussinesq

L'approximation de Boussinesq est une simplification couramment utilisée en mécanique des fluides pour modéliser les écoulements de fluide incompressible soumis à de faibles variations de densité avec la température. L'approximation de Boussinesq pour l'air considère que la densité de l'air est constante sauf dont le terme de flottabilité qui tient en compte de la variation de la densité due à la variation de la température. En se limitant à un développement du premier ordre [6] :

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta (T - T_0)) \quad (2.5)$$

Le terme  $\beta$  est le coefficient d'expansion thermique.

Pour un gaz parfait :

$$\beta_{\text{gaz parfait}} = \frac{1}{T}$$

Où :

- $T$  est la température absolue (température du film).
- $T_0$  est la température de référence.
- $\rho_0$  est la masse volumique de l'air.

## 8. Le modèle de turbulence

Dans cette étude on a utilisé le modèle k- $\epsilon$  standard. Il est un modèle basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente  $k$  et de sa dissipation  $\epsilon$ . Dans le modèle k- $\epsilon$  la viscosité turbulente est exprimée en fonction de  $k$  et  $\epsilon$  par la formule suivante [6] :

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.6)$$

Où :

- $\epsilon$  : appelé taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.
- $k$  : énergie cinétique turbulente.

- $\rho$  : Masse volumique [kg/m<sup>3</sup>]

$C_\mu$  : est la constante empirique associée à la modélisation de la turbulence.

## 9. Les nombres adimensionnels

### 9.1. Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Il est défini comme suit [6] :

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.7)$$

### 9.2. Le nombre de Prandtl

Le Nombre de Prandtl est le rapport de la viscosité cinématique  $\mu/\rho$  et la diffusivité thermique :  $\alpha = \lambda/\rho C_p$ . [6]

- $\lambda$  : conductivité thermique [W/m.K]
- $C_p$  : Capacité calorifique massique [J/Kg.K]

On le définit par :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (2.8)$$

### 9.3. Le nombre de Nusselt

Le Nombre de Nusselt  $Nu$  est le rapport du flux thermique  $e$ , transmis par convection à un flux. [6]

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (2.9)$$

- $h$  : est le coefficient de transfert de chaleur convective, exprimé en [W/(m<sup>2</sup>·K)].
- $D$  : est une longueur caractéristique, telle que le diamètre hydraulique ou le diamètre du tube, exprimée en mètres [m].

### 9.4. Nombre de Rayleigh

Le nombre de Rayleigh (Ra) est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les écoulements de la convection naturel. [6]

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot Pr}{\nu^2} \quad (2.10)$$

- $g$  : est l'accélération due à la gravité, exprimée en  $[m/s^2]$ .
- $\beta$  : est le coefficient de dilatation thermique, exprimé en  $[1/K]$
- $\Delta T$  : est la différence de température entre la surface solide et le fluide, exprimée en  $[K]$ .
- $Pr$  : est le nombre de Prandtl
- $\nu$  : est la viscosité cinématique du fluide, exprimée en  $[m^2/s]$ .

### 10. Les conditions aux limites

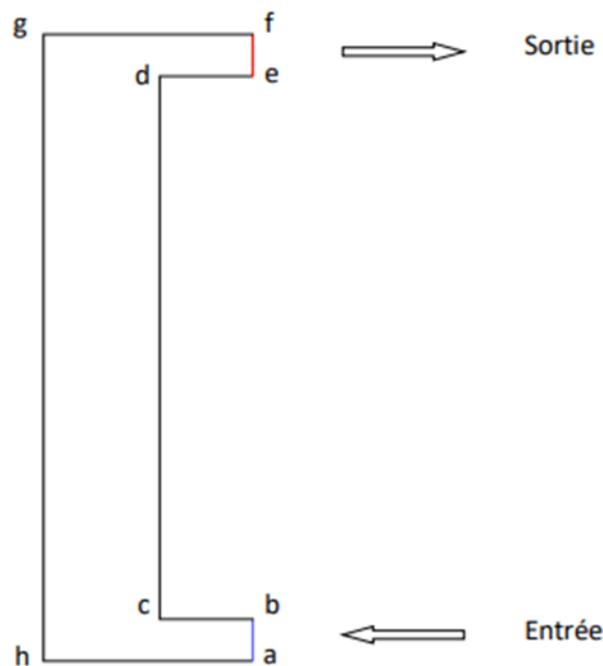


Figure 2. 5 : Conditions aux limites

#### A l'entrée

$v = 1 \text{ m/s}$  (cnst),  $T_e = 298 \text{ K}$

- Paroi [bc] : Condition adiabatique
- Paroi [cd] : mur trombe  $T = 307 \text{ K}$

- Paroi [de] : Condition adiabatique
- Paroi [gh] : Isotherme  $T_i=273$  K
- Paroi [fg] : Condition adiabatique.
- Paroi [ha] : Condition adiabatique.

### A la sortie

Tous les gradients sont nul

➤  $P = P_g + P_{\text{atmosphérique}}$

Avec :

➤  $P_g = 0$  donc  $P = P_{\text{atmosphérique}}$

**Tableau 2. 1** Propriétés thermo-physiques de l'air 298K.

Propriétés	Symbole	Unité	Valeur
Capacité thermique	$C_p$	J/Kg.K	1006.43
Masse volumique	$\rho_0$	Kg/m <sup>3</sup>	1.225
Conductivité thermique du fluide	$\lambda_f$	W/m.K	0.0242
Coefficient de dilatation thermique	$\beta$	1/K	0.0033
Viscosité cinématique	$\nu$	m <sup>2</sup> /s	$1.7894 \times 10^{-5}$
Numéro de Prandtl	$Pr$		0.70

## 11. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la formulation mathématique du modèle physique, par les équations de Navier Stokes et l'équation de l'énergie en tenant compte de l'hypothèse de Boussinesq.

## **Chapitre 3 : Présentation des Logiciels**

### **Gambit et Fluent**

---

## 1. Introduction

La Computational Fluid Dynamics (CFD), ou Mécanique des Fluides Numérique (MFN), est une discipline qui se concentre sur l'étude des mouvements des fluides et de leurs impacts en utilisant des méthodes numériques pour résoudre les équations qui les gouvernent. Ces équations peuvent inclure les équations d'Euler ou de Navier-Stokes, selon les besoins spécifiques de la modélisation. La MFN a évolué d'un intérêt mathématique initial à devenir un outil vital dans divers domaines, de l'aérospatiale à la météorologie en passant par la conception navale. En recherche, elle offre un accès rapide et abordable à des données détaillées telles que la vitesse, la pression et la concentration à chaque point de l'espace étudié, comparé aux coûts plus élevés des expériences physiques équivalentes. [6]

## 2. Définition CFD

La Computational Fluid Dynamics (CFD), ou Dynamique des Fluides Numérique (DFN) en français, constitue une discipline de l'ingénierie qui recourt à des techniques numériques pour résoudre les équations mathématiques décrivant le comportement des fluides. Elle permet la simulation et l'examen des écoulements de liquides et de gaz, comme l'air et l'eau, ainsi que des phénomènes de transfert de chaleur et de masse associés. [6]

### 2.1. Le rôle de CFD

L'objectif primordial des entreprises axées sur les produits est de mettre sur le marché rapidement des produits à forte valeur ajoutée qui répondent aux exigences de leurs clients. Un élément clé de leur réussite réside dans leur capacité à anticiper les scénarios d'application susceptibles de conduire à des performances médiocres, des défauts de produit et une insatisfaction client, et à développer des solutions de conception pour atténuer ces risques potentiels. Pour identifier les concepts les plus prometteurs dès les premières étapes du processus de conception, l'utilisation précoce de logiciels de CFD est essentielle. Cette approche permet d'améliorer la qualité du produit en analysant les phénomènes fluides et thermiques dès le stade initial de la conception. Au fur et à mesure de l'avancement vers la phase de conception détaillée, les simulations sont effectuées dans des conditions similaires à celles auxquelles le produit final sera soumis. En comprenant mieux les sources des problèmes affectant les performances et le bon fonctionnement, les ingénieurs de conception

---

peuvent explorer différentes conceptions alternatives avant d'entrer en phase de production. [6]

### 3. Présentation de gambit et de fluent

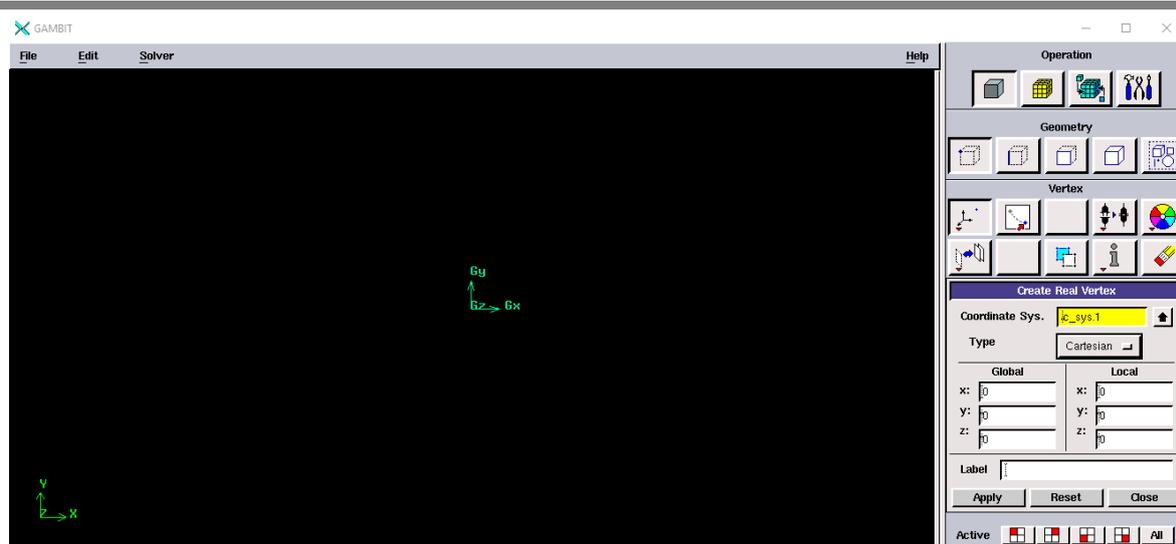
La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

#### 3.1. Initiation au logiciel GAMBIT

GAMBIT est un logiciel de maillage 2D/3D utilisé comme préprocesseur pour la simulation numérique en mécanique des fluides. Il offre à l'utilisateur la possibilité de construire la géométrie du domaine de calcul et de le subdiviser en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul, formant ainsi le maillage nécessaire à l'analyse. Les fichiers de maillage générés par GAMBIT, au format \*.msh, sont compatibles avec le solveur FLUENT. En définissant les conditions aux limites aux interfaces entre les cellules du maillage et les limites du domaine de calcul, il est possible de spécifier les paramètres nécessaires à la simulation. GAMBIT offre également la flexibilité de créer différents types de maillages adaptés à la géométrie de l'objet d'étude, ainsi que de définir les propriétés des matériaux (fluide ou solide) associés aux différentes zones du domaine de calcul.

##### 3.1.1. Démarrage de Gambit

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant: /Hummingbird Connectivity V9.0/Exceed/Exceed/Gambit2.3.16. Vous pouvez créer un raccourci dans la barre des tâches. S'il y a un problème d'exécution, supprimez tous les fichiers, dans le répertoire : /Hummingbird Connectivity V9.0/Exceed/Exceed/ et relancez Gambit.2.3.16.



**Figure 3. 1** Lancement du Gambit

### 3.1.2. Construction de la géométrie

La géométrie comprend les positions physiques des points caractéristiques qui définissent la zone à mailler. Il faut d'être capable de représenter la zone à étudier par un ensemble des figures géométriques simples interconnectées. Pour définir la géométrie sur GAMBIT, il faut suivre la démarche suivante (figure 3.2) :

- a) Création des points : créer les points qui caractérisent la géométrie
- b) Création des lignes : créer les lignes qui relient les points déjà créés
- c) Création des surfaces : créer les surfaces limitées par les lignes déjà créés.



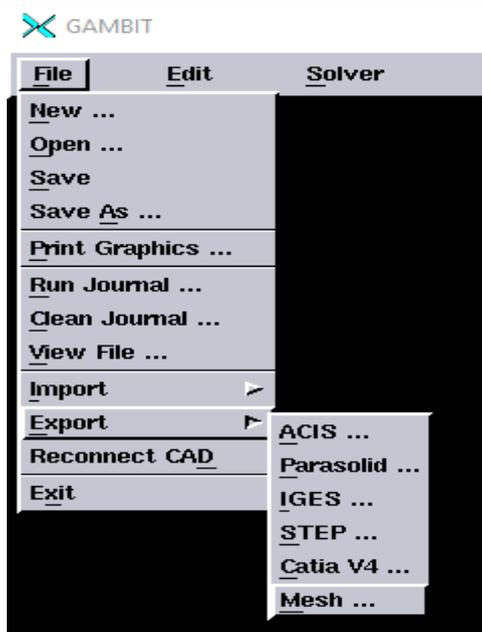


Figure 3.3 Les opérations pour construire une géométrie

### 3.1.3. Réalisation du maillage

La création du maillage, qu'il soit en 2D ou en 3D, revêt une importance capitale dans le processus d'analyse en CFD, tenant compte des paramètres influençant la solution calculée. Cette fonctionnalité permet spécifiquement de générer le maillage le long de la géométrie, en disposant les nœuds selon des conditions spécifiques telles que l'utilisation de ratios pour ajuster la densité du maillage et l'application de différentes formes de maillage.



Figure 3.4 Maillage de la géométrie Définition des frontières du mur trombe simple

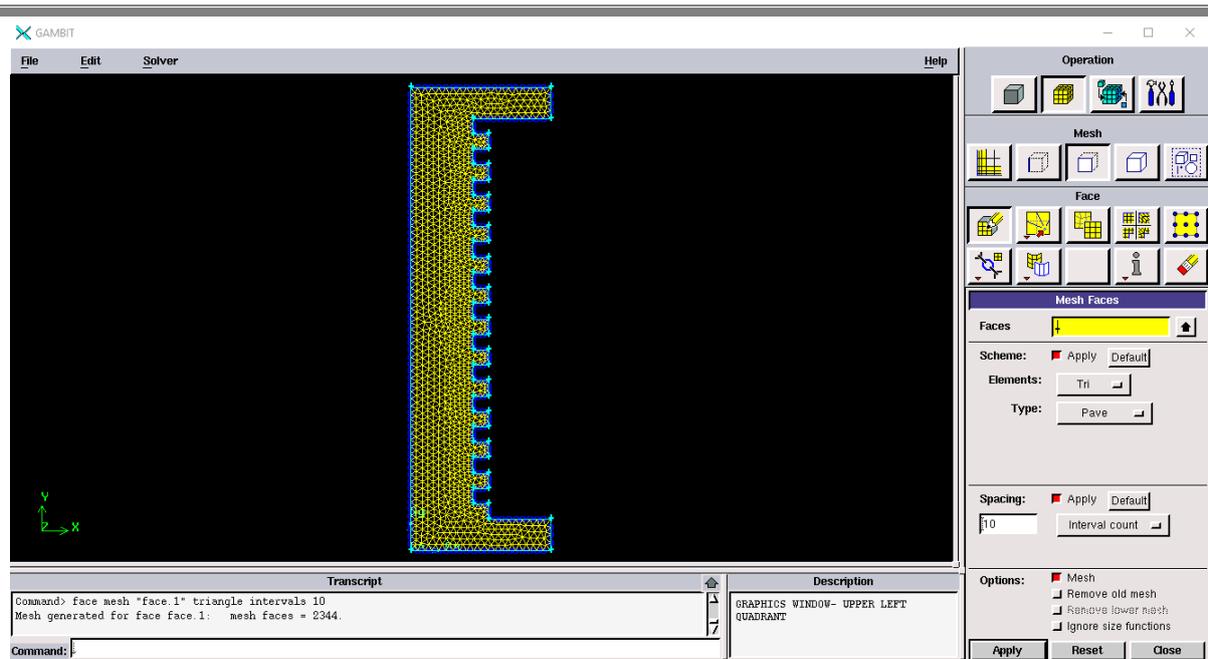


Figure 3.5 Maillage de la géométrie Définition des frontières du mur trombe cannelé (rainure carré)

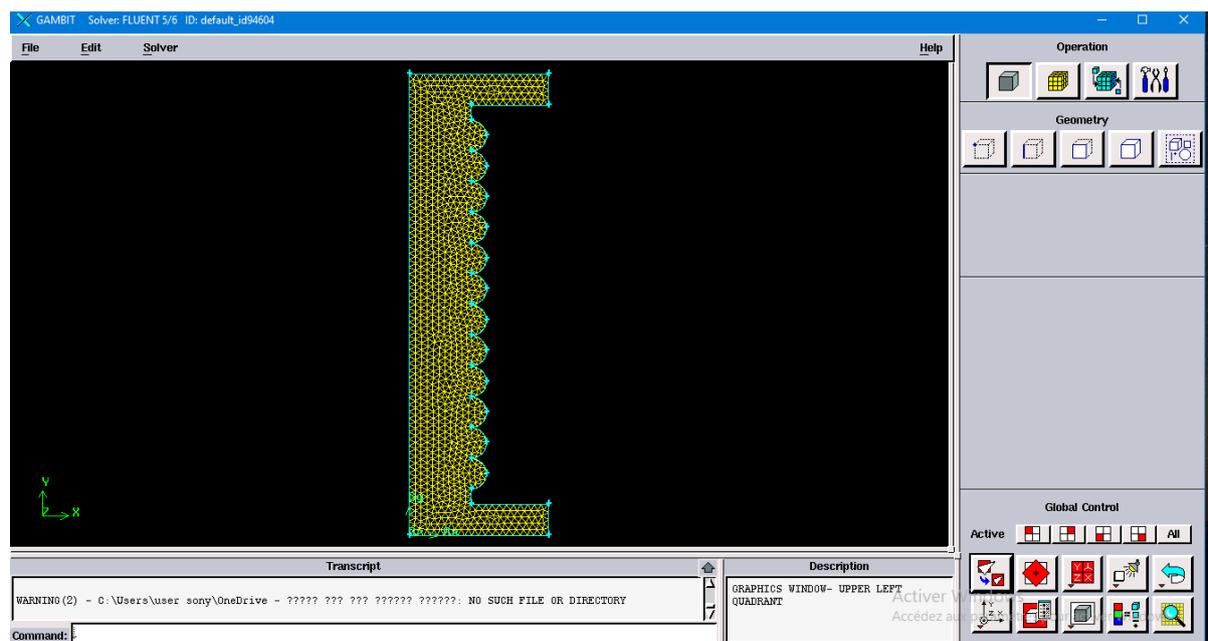


Figure 3.6 Maillage de la géométrie Définition des frontières du mur trombe (rainure circulaire)

### 3.1.4. Exportation du maillage

Le maillage peut être exporté dans un fichier pour lecture avec Fluent

- File → Export → Mesh

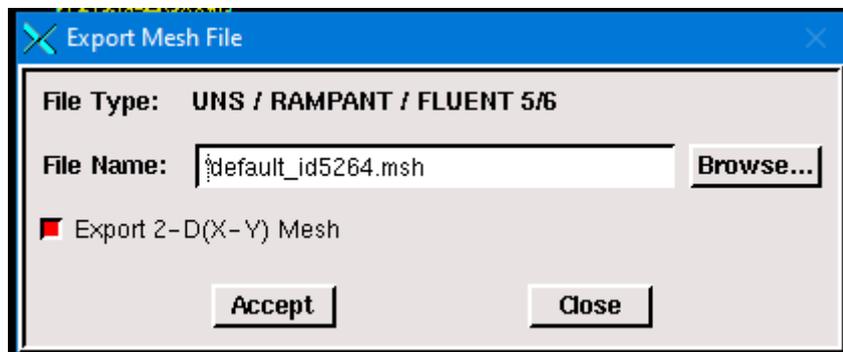


Figure 3. 7 Exportation du maillage

## 3.2. Initiation au logiciel FLUENT

FLUENT est un logiciel largement utilisé pour la simulation numérique, spécifiquement pour résoudre les problèmes de mécanique des fluides et de transfert thermique en utilisant la méthode des volumes finis. Il permet de prédire les mouvements des fluides en résolvant les équations de conservation, toutes basées sur cette méthode. Ce programme offre une capacité étendue de simulation pour une variété d'écoulements fluides, qu'ils soient laminaires ou turbulents, permanents ou variables, incompressibles ou compressibles, ainsi que pour des configurations internes ou externes, avec ou sans transfert de chaleur.

### 3.2.1. Importation de la géométrie

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (\*.msh) généré sous Gambit.

- File → Read → Case...

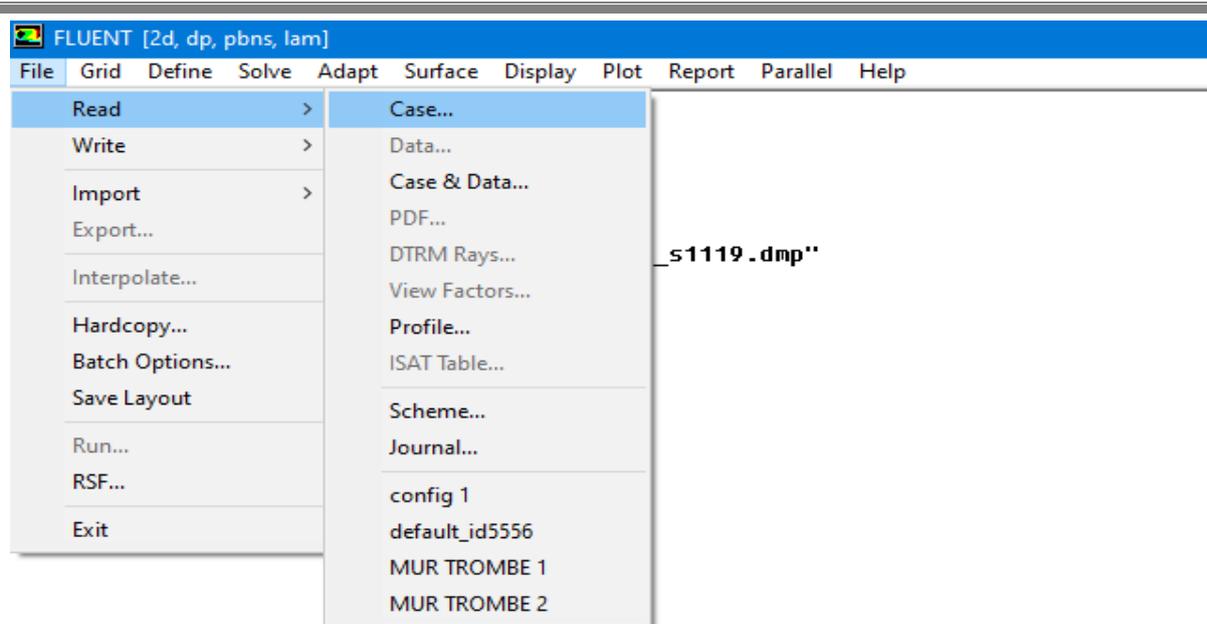


Figure 3. 8 Importation de la géométrie

### 3.2.2. Vérification du maillage importé

➤ Grid → Check

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

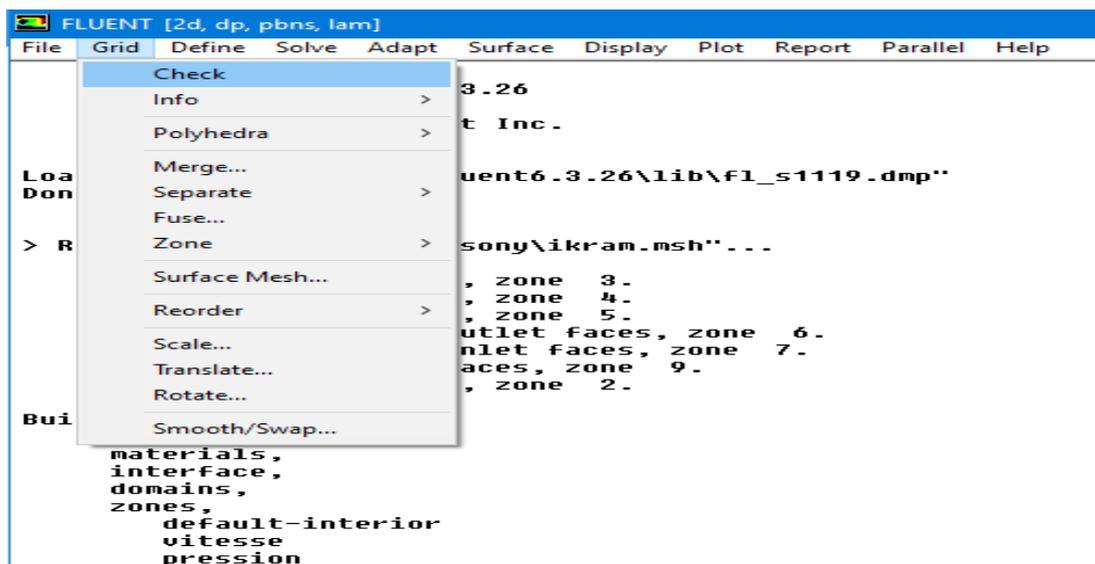


Figure 3. 9 Vérification du maillage sous Fluent

### 3.2.3. Vérification de l'échelle

➤ Grid → Scale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème

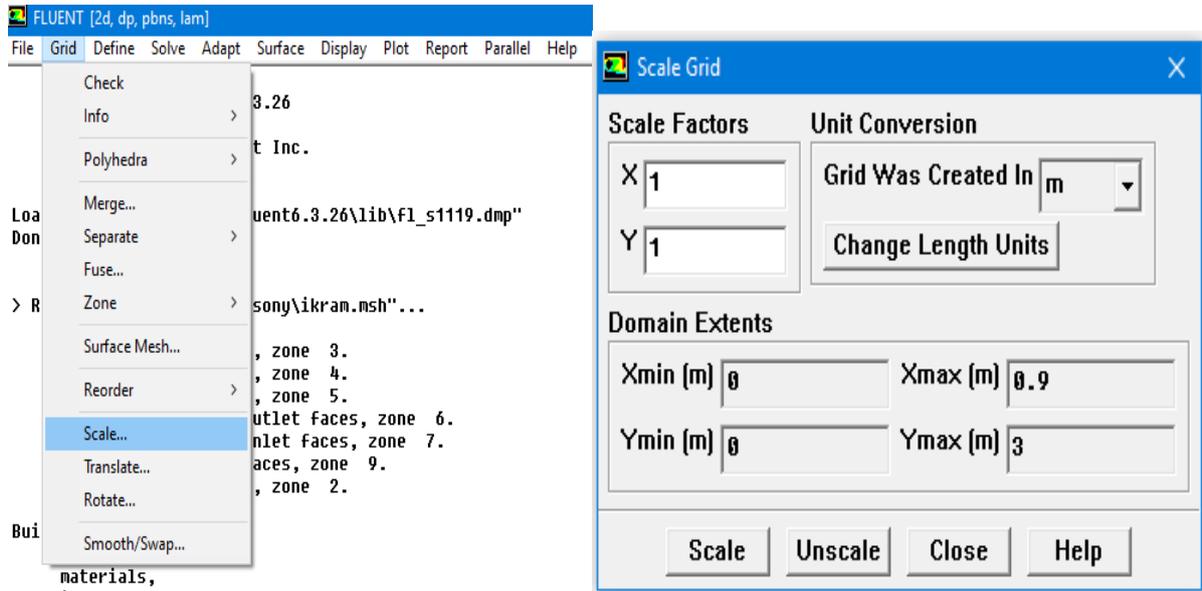


Figure 3.10 Vérification des unités

### 3.2.4. Choix du solveur

➤ Define → Models → Solver

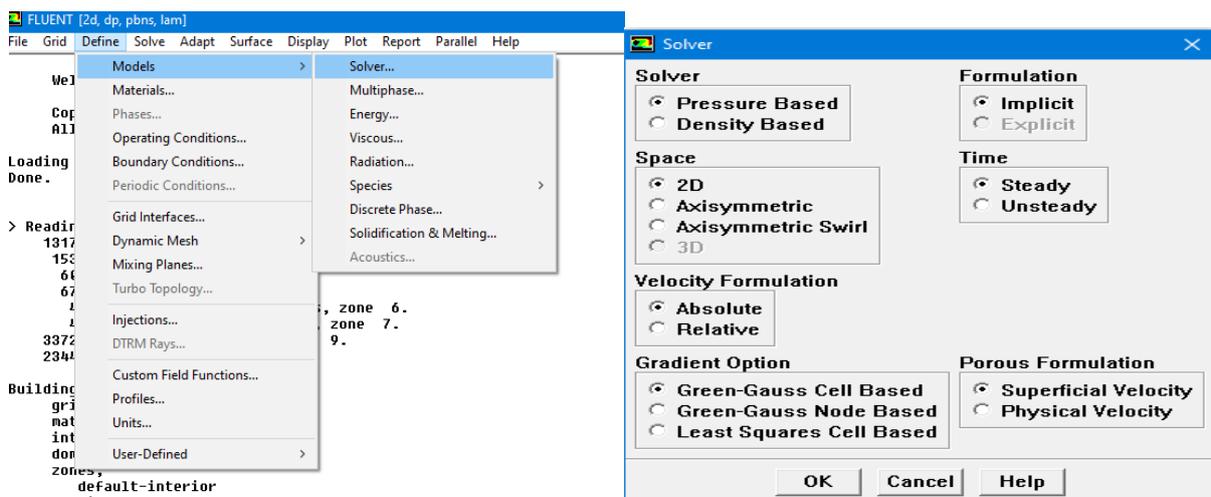


Figure 3.11 Choix du solveur sous fluent

### 3.2.5. L'équation de l'énergie

- Define → Models → Energy

L'instruction énergie doit être activée pour l'étude du champ thermique.

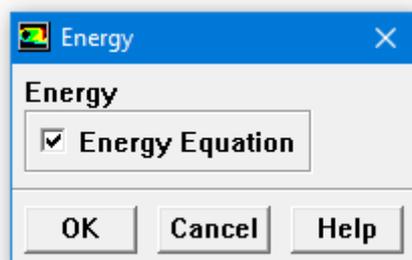


Figure 3. 12 Equation de l'énergie

### 3.2.6. Choix du modèle de l'écoulement

- Define → Models → Viscous

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement turbulent. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents ... etc.

Écoulement laminaire :

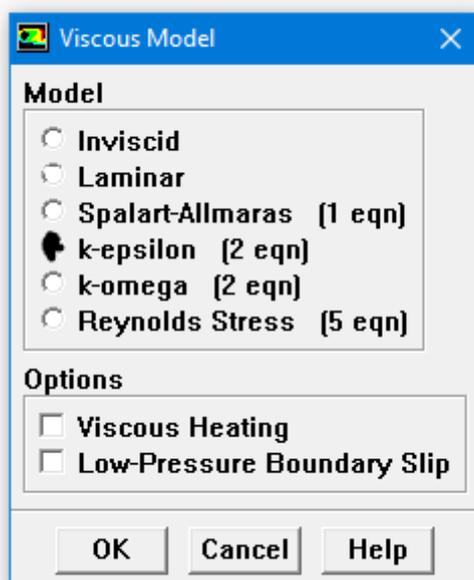


Figure 3. 13 Choix du modèle d'écoulement

3.2.7. Définition des caractéristiques du fluide

➤ Define → Materials

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

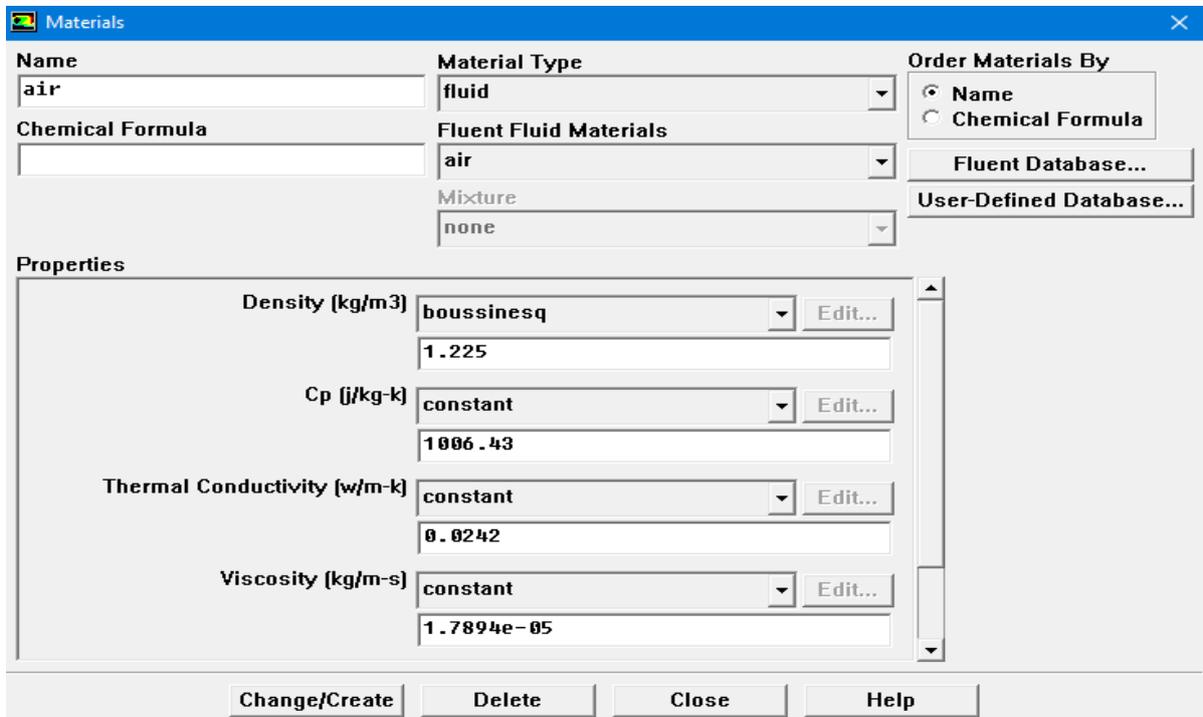
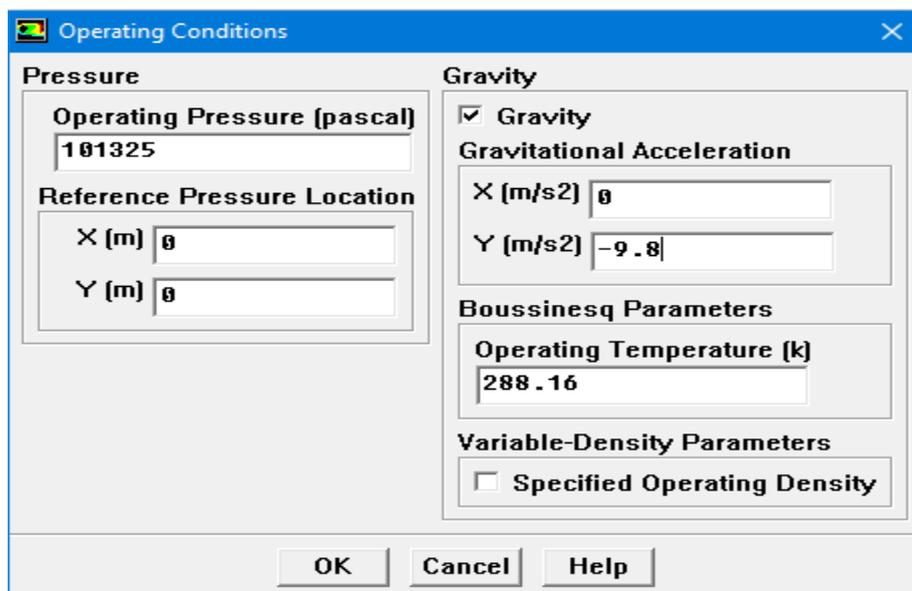


Figure 3. 14 Définition des caractéristiques du fluide

### 3.2.8. Operating conditions

- Define → Operating conditions

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence « operating conditions ».



**Figure 3.15** Choix de la pression de référence

Fluent effectue tous les calculs sous une pression nommée pression relative afin d'éviter les erreurs numériques lors du calcul de faibles débits de mach. La relation liant la pression absolue à la « pression relative » est donnée par :

- $P_{abs} = P_{atmosphérique} + P_{gauge}$

### 3.2.9. Conditions aux limites

- Define → Boundary Conditions

Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites :

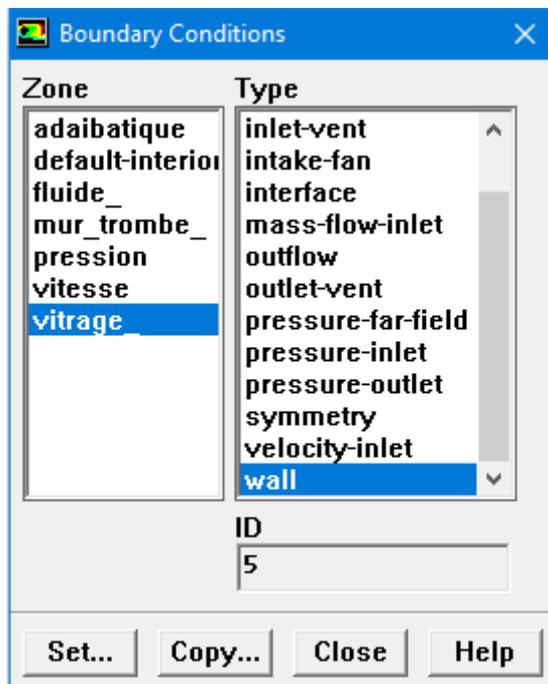


Figure 3. 16 Valeurs des conditions aux limites

- **Velocity Intel** : Utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la vitesse d'entrée est connue.

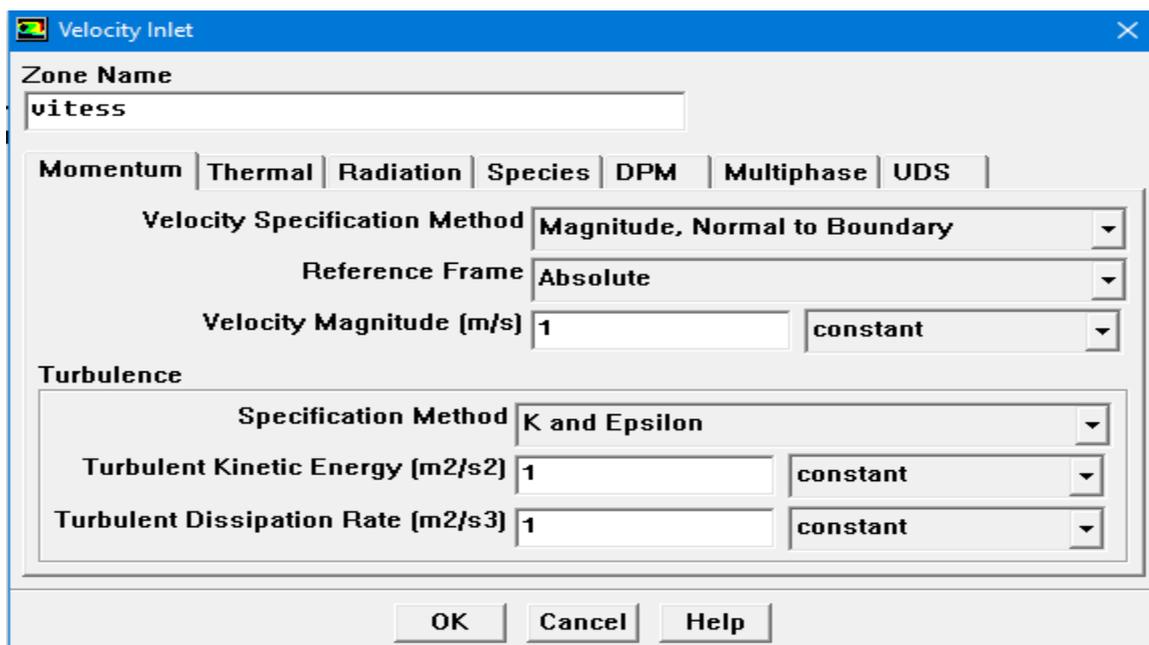


Figure 3. 17 Vitesse d'entrée

- **Pressure Outlet** : Spécifie la pression statique de sortie. L'utilisation de Pressure Outlet sert à définir la pression statique à la sortie.

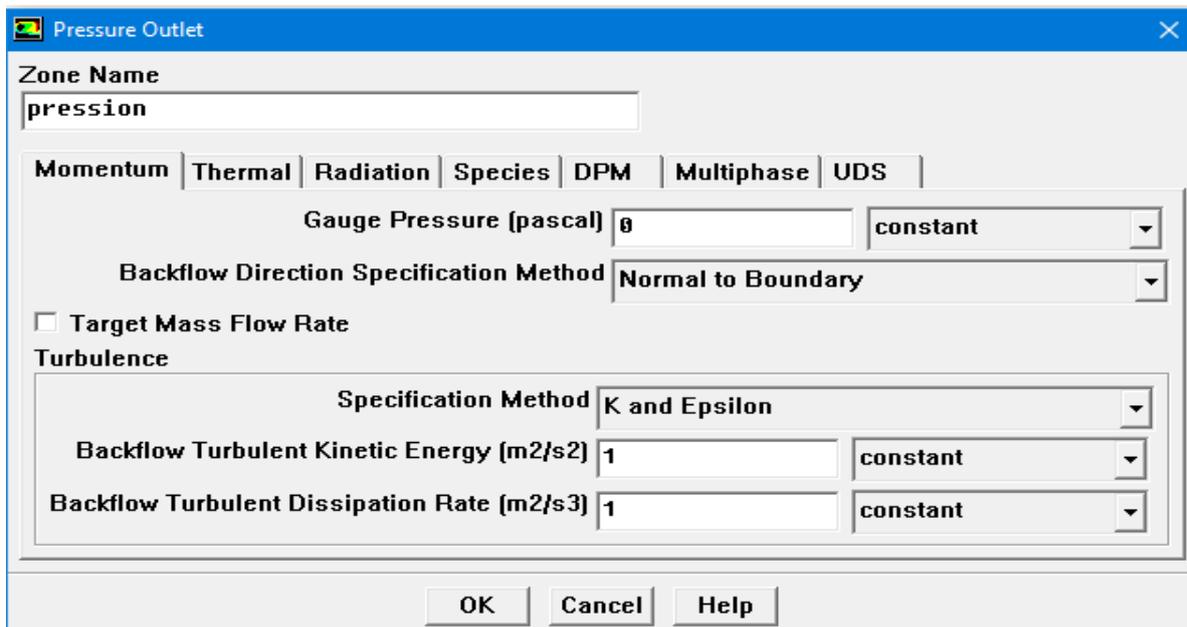


Figure 3. 18 Pression de sortie

- **Wall** : est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides.

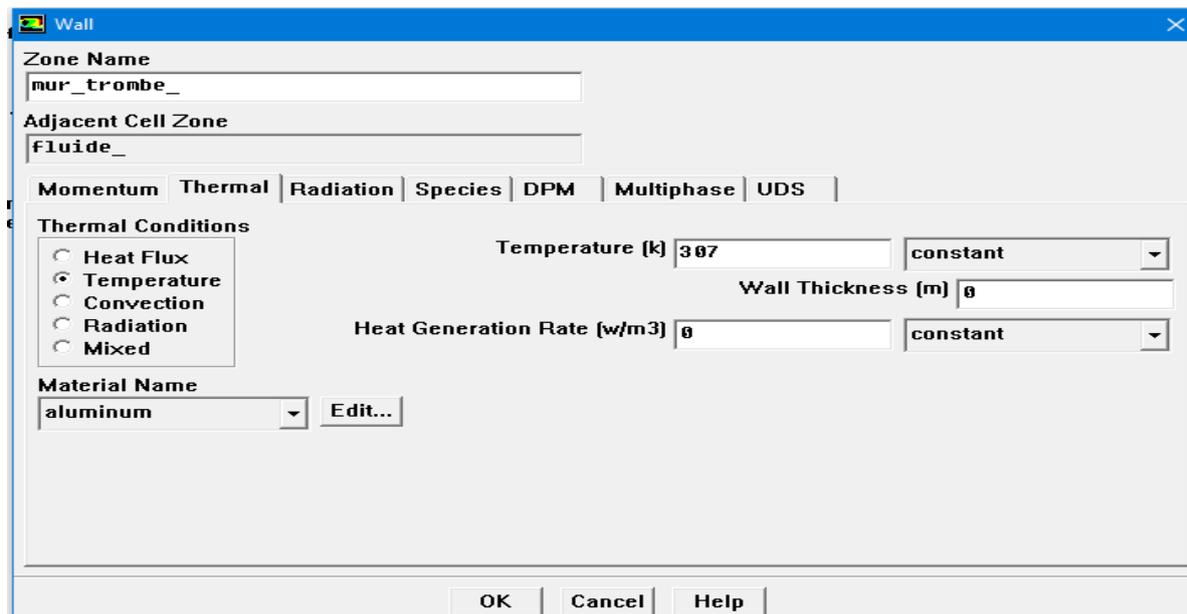


Figure 3. 19 Parois du mur trombe

3.2.10. Choix d'ordre des équations et l'algorithme

- Solve → Controls → Solution

Ceci permet de spécifier le degré d'ordre des équations à résoudre

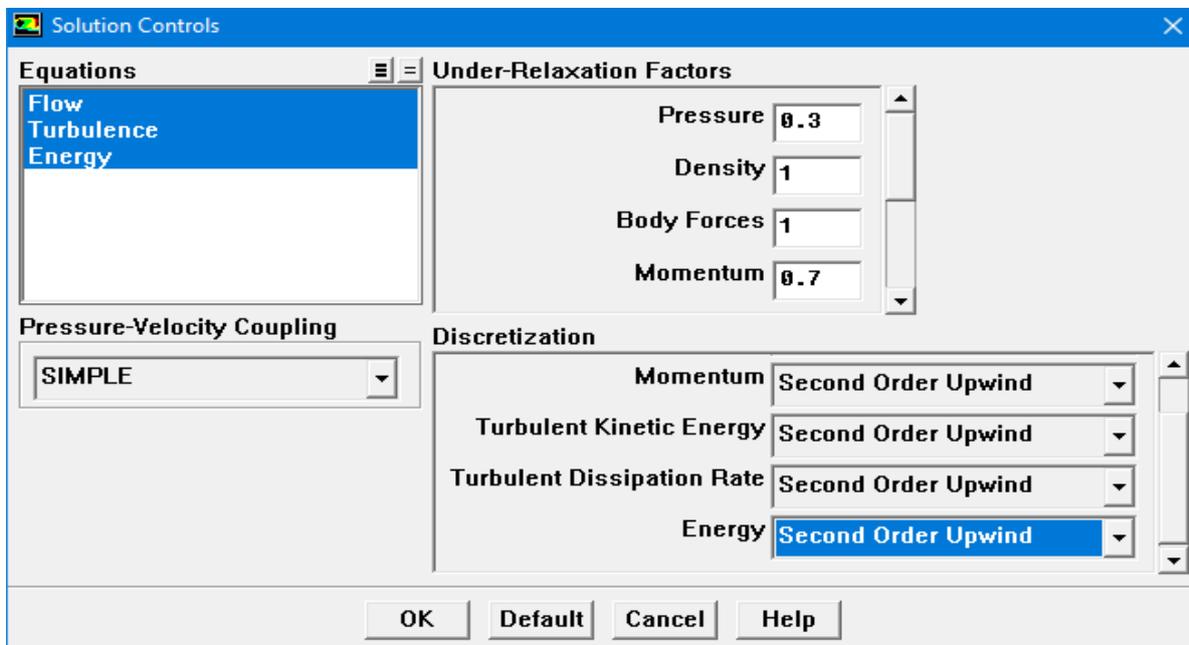
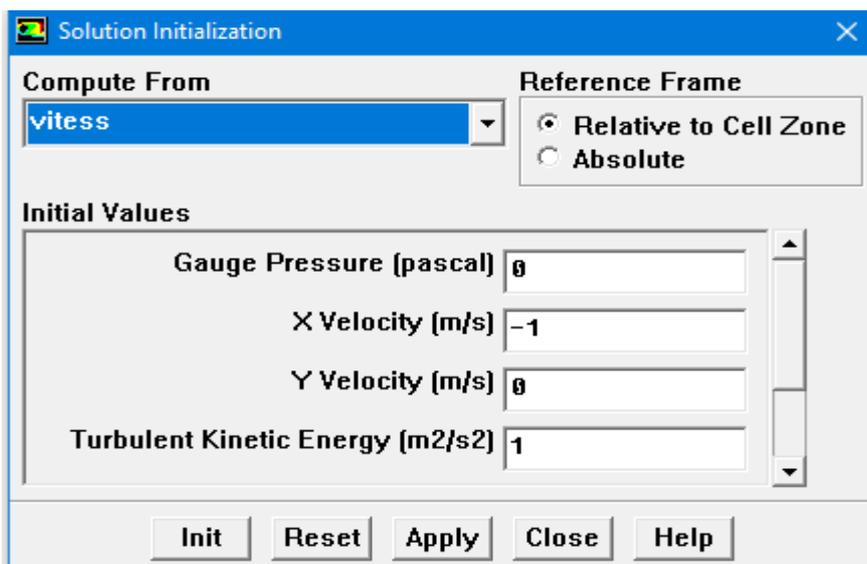


Figure 3. 20 Choix d'ordre des équations

3.2.11. Lancement de calcul

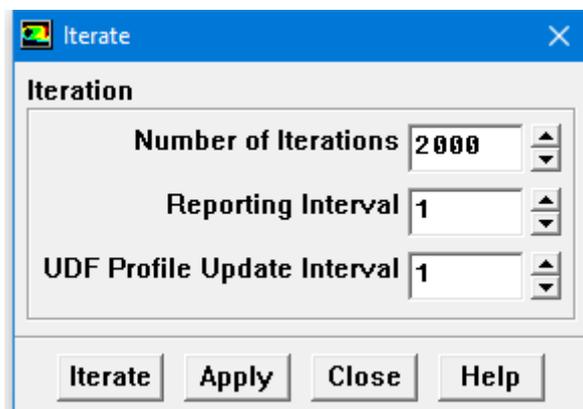
- Solve → initialize → initialize → compute from → vitesse



Puis :

- Solve → Iterate

Pour commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations.



**Figure 3. 21** Choix du nombre des itérations

## 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons approfondi notre compréhension de la simulation numérique à travers les logiciels GAMBIT et FLUENT. Nous avons commencé par décrire en détail les étapes clés du processus de résolution, offrant ainsi une vue d'ensemble de notre approche. Ensuite, nous avons procédé à la définition de la géométrie du problème en élaborant un maillage à l'aide de GAMBIT. Les différentes conditions aux limites applicables à chaque cas étudié ont été examinées en détail. En utilisant le logiciel FLUENT, nous avons mis en œuvre la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations fondamentales telles que les équations de Navier-Stokes, de conservation de la masse et de l'énergie carrés comme dans la première configuration, et des éléments triangulaires comme dans la deuxième et la troisième configuration. Elle conduit à un système d'équations non linéaires couplées résolu de manière itérative.

## **Chapitre 4 : Résultats et interprétations des simulations numériques**

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons fait une simulation numérique de la convection mixte en régime turbulent d'un écoulement d'air chauffé par un mur Trombe en utilisant le code CFD 'Fluent 6.3.

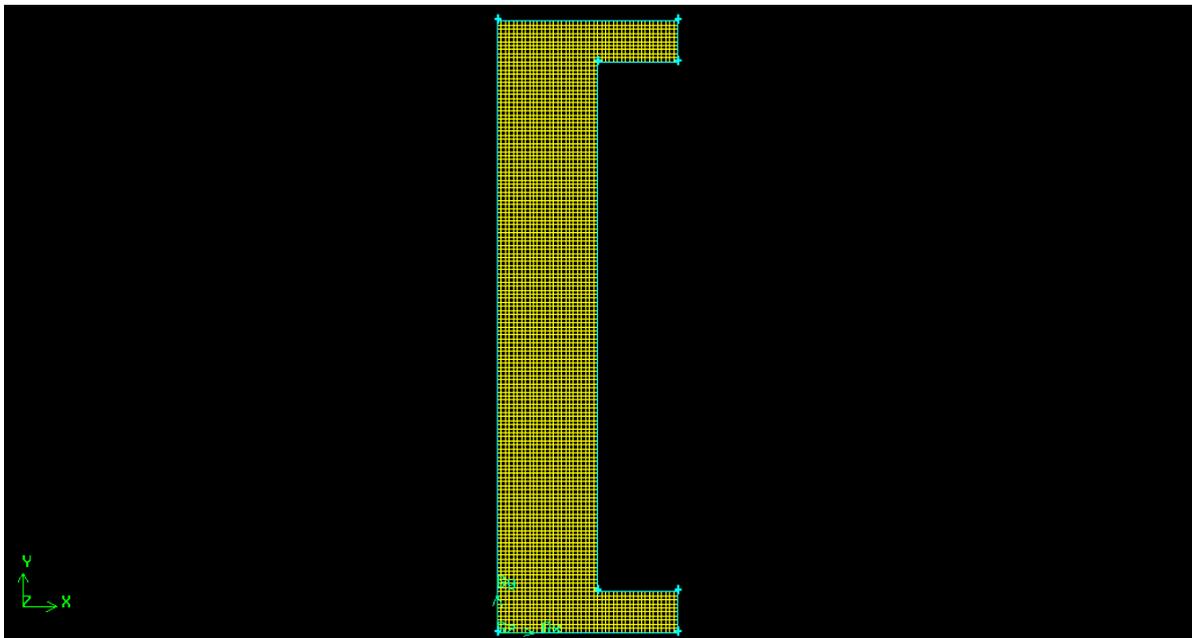
L'étude numérique bidimensionnel de l'écoulement turbulent stationnaire a été mené pour les trois modèles de mur de trombe, le premier modèle est simple alors que le deuxième est cannelé, avec rainures carrées et troisième avec rainures circulaires.

Les résultats numériques de la simulation ont été validés par les travaux antérieurs sur les murs trombe. [3][5][6]

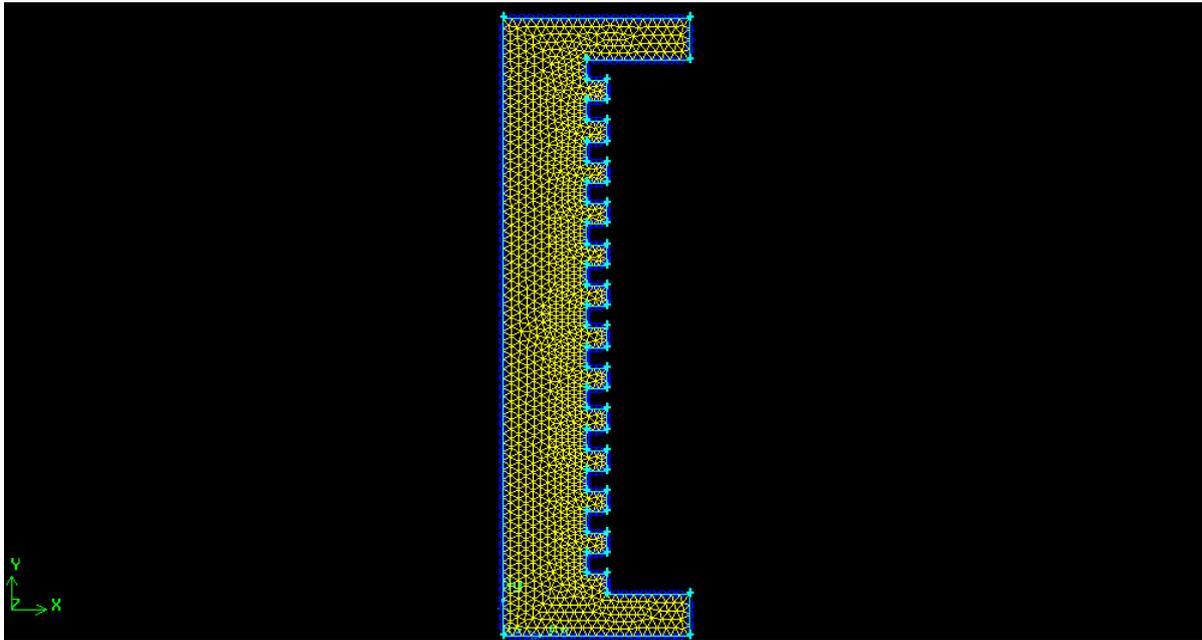
## 2. Maillages

La figure suivante (figure 4.1) présente le maillage utilisé pour les différentes configurations étudiées. Nous avons utilisé un maillage raffiné, carré pour la première géométrie et triangulaire pour la deuxième et la troisième géométrie.

1<sup>ère</sup> cas mur trombe simple



2<sup>ème</sup> cas mur trombe cannelé rainure carrée



3<sup>ème</sup> cas mur trombe rainure circulaire

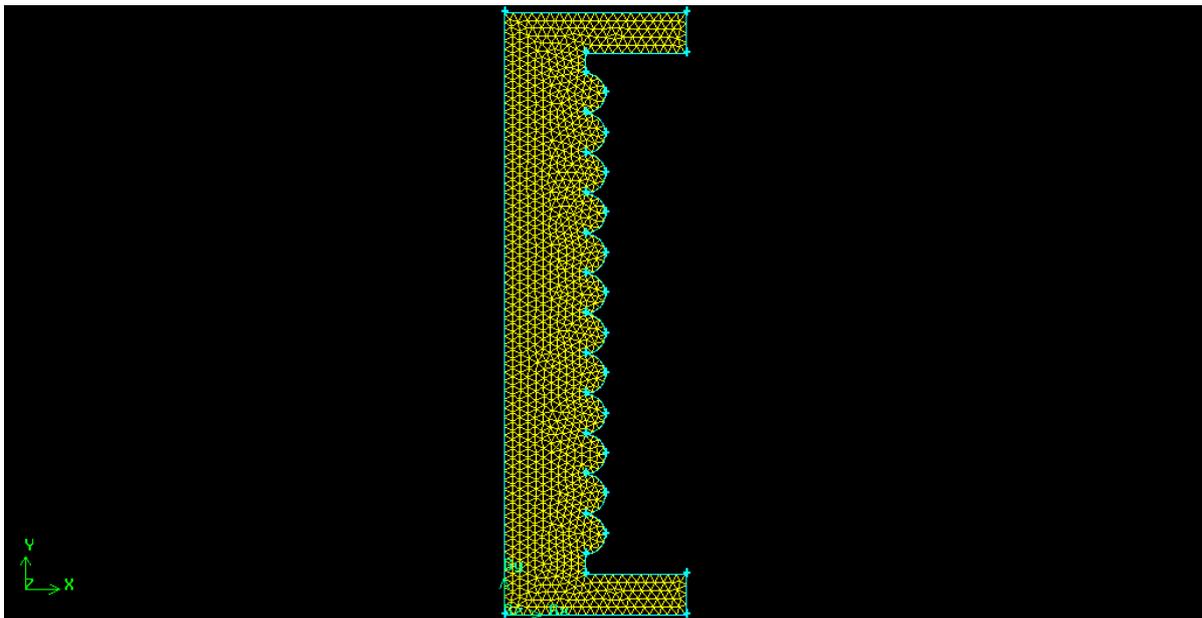
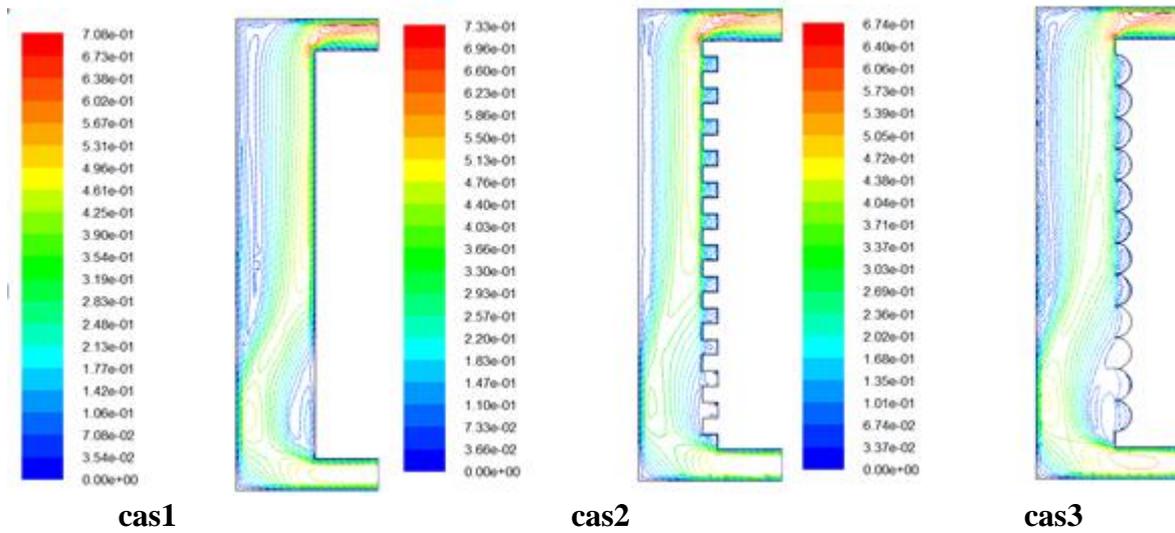


Figure 4. 1 Maillage des géométries étudiées

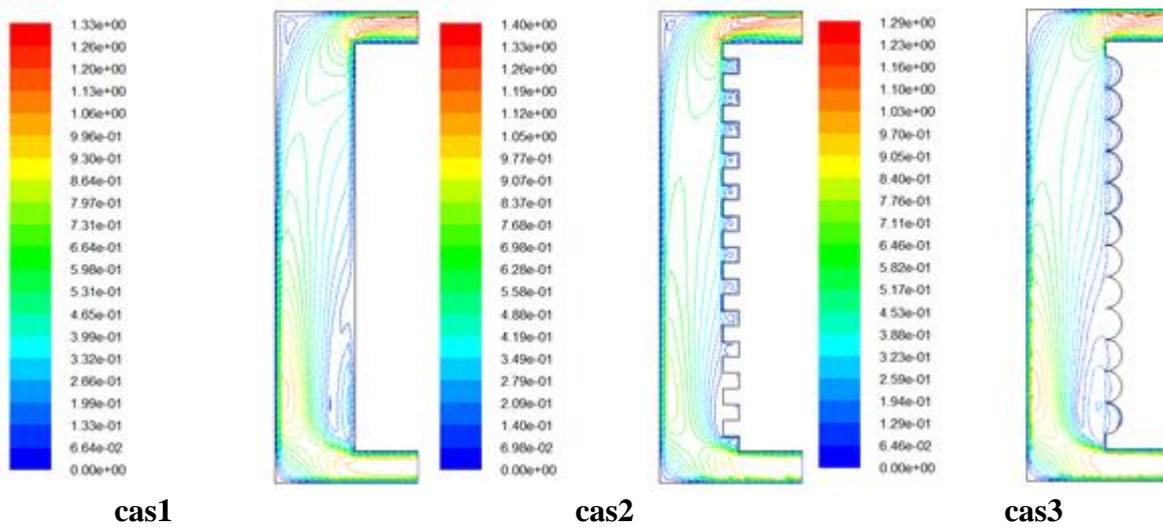
### 3. Les lignes de courant

La figure suivante (figure 4.2) illustre les contours des lignes de courant pour les 3 cas. On observe la présence de zones de recirculation. Lorsque la vitesse est augmentée à 1 m/s, ces zones de recirculation changent de dimensions dans l'espace du mur. Cependant, pour une vitesse de 2 m/s, ces zones sont presque au même niveau que pour la vitesse de 1 m/s.

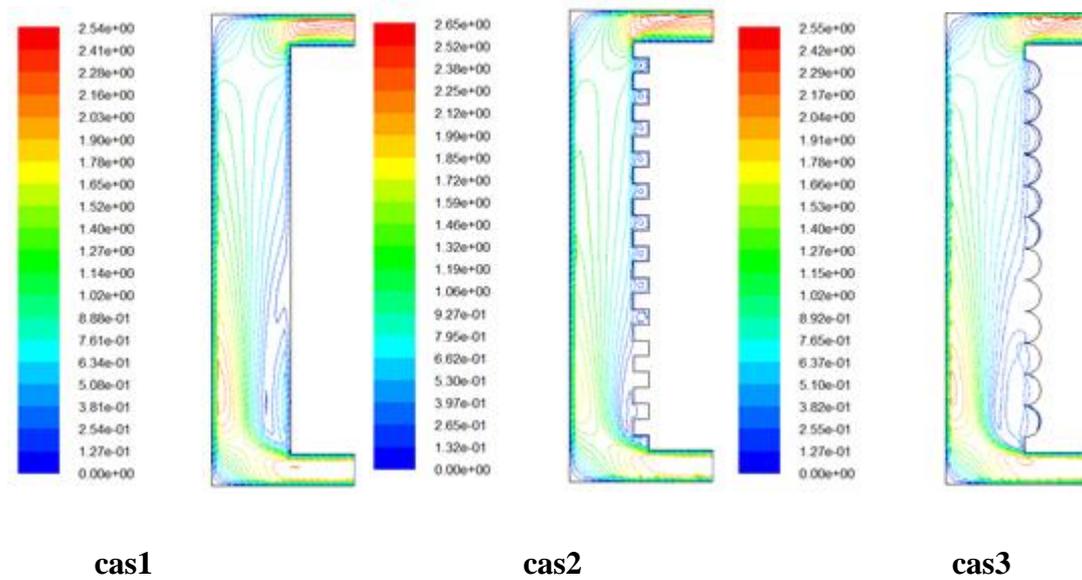
**V=0.5m/s**



**V=1m/s**



$V=2\text{m/s}$



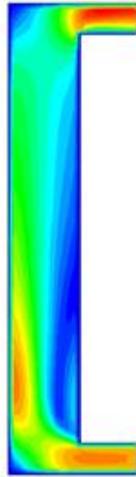
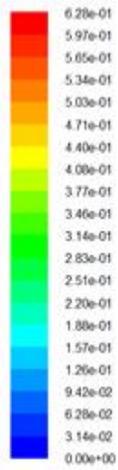
**Figure 4. 2** Contour lignes de courant pour les 3 cas

#### 4. Distribution de la vitesse

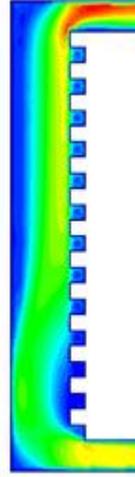
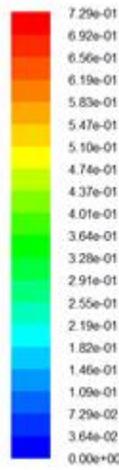
La figure (4.3) présente les contours de la vitesse pour différentes vitesses d'entrée d'air dans le mur Trombe. La répartition du champ de la distribution de la vitesse dépend de la vitesse d'entrée d'air. Les valeurs des vitesses les plus importantes sont visualisées à la sortie des trois cas.

V=0.5m/s

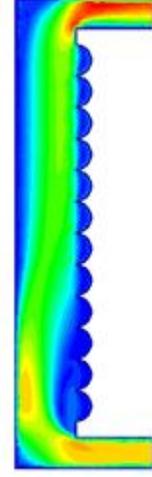
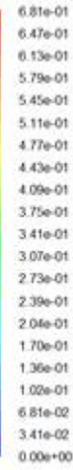
cas1



cas2

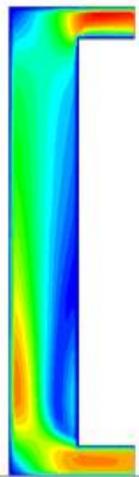
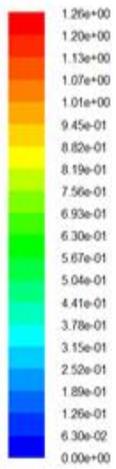


cas3

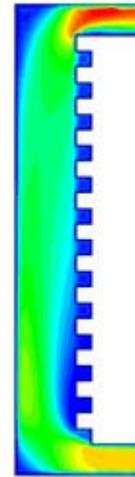
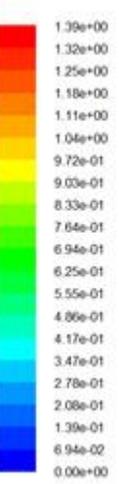


V=1m/s

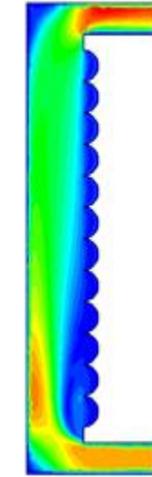
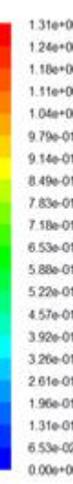
cas1



cas2



cas3



V=2m/s

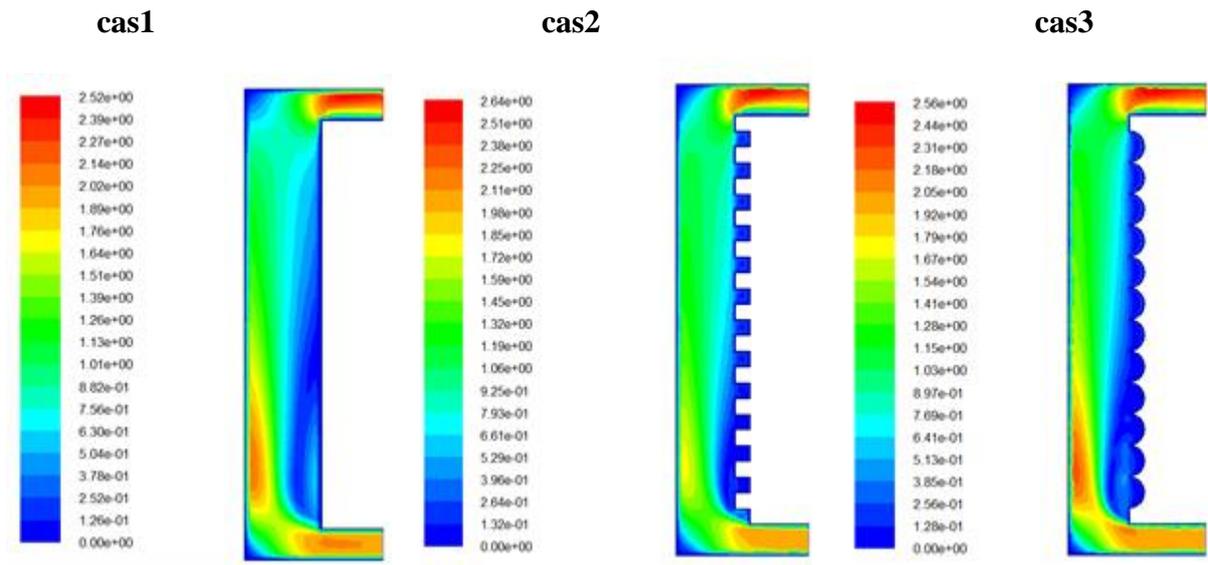
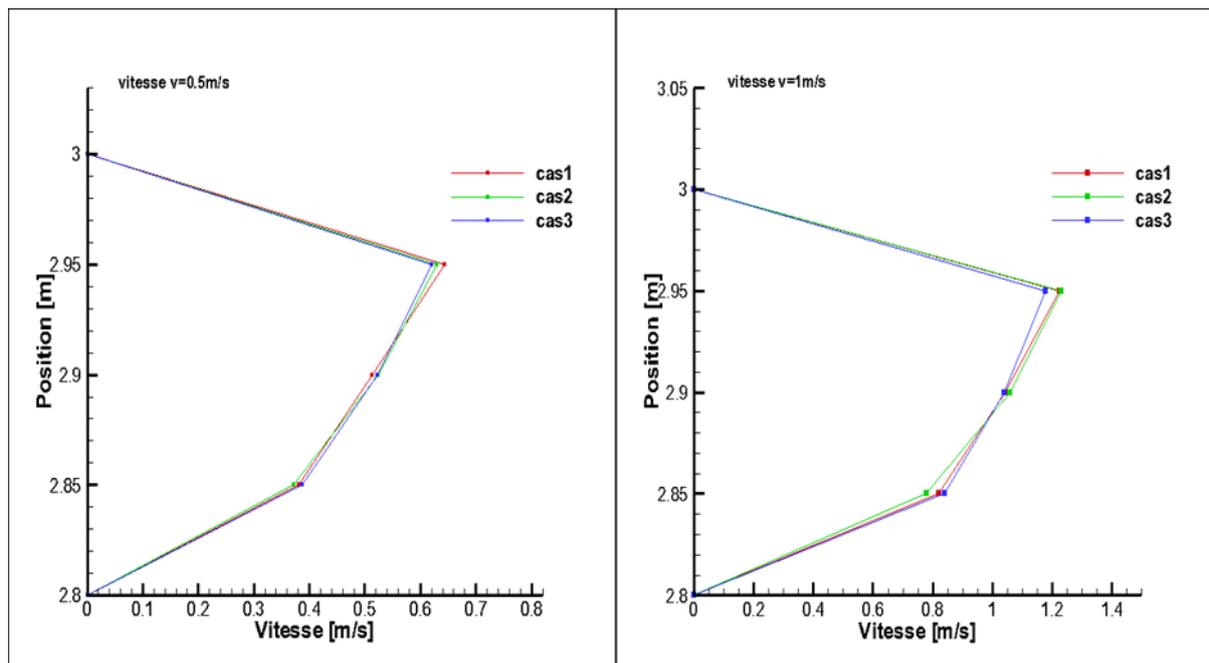


Figure 4.3 Contour de vitesse pour les 3 cas



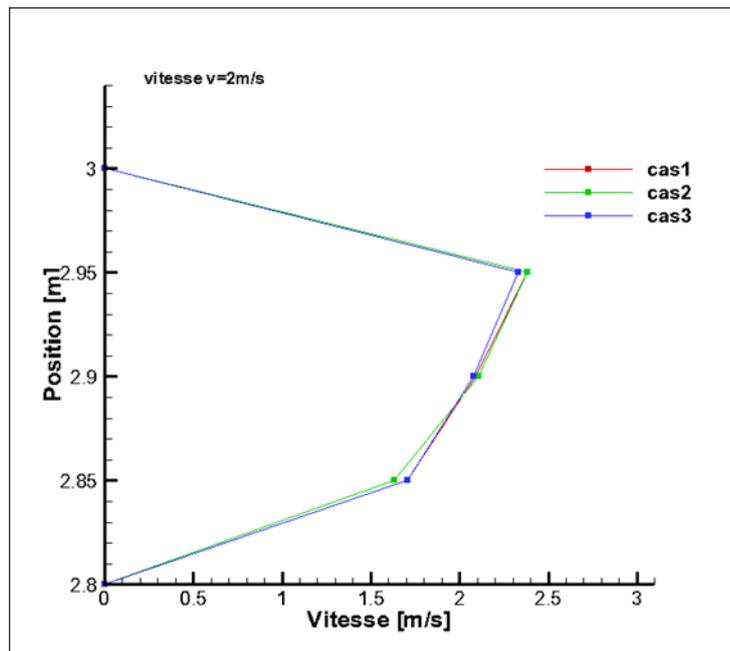
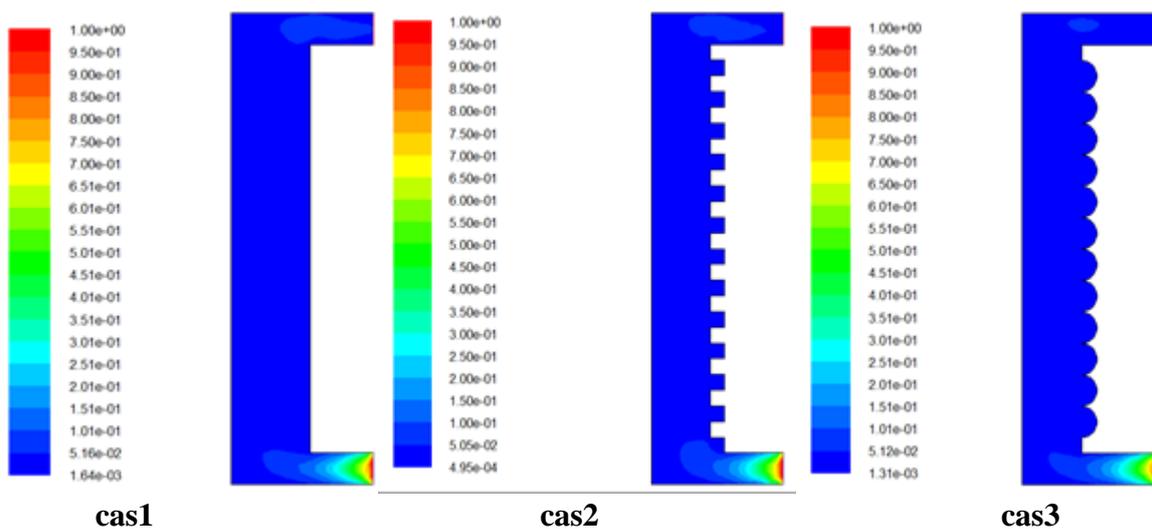


Figure 4.7 Profil de la distribution de la vitesse à la sortie pour les trois cas

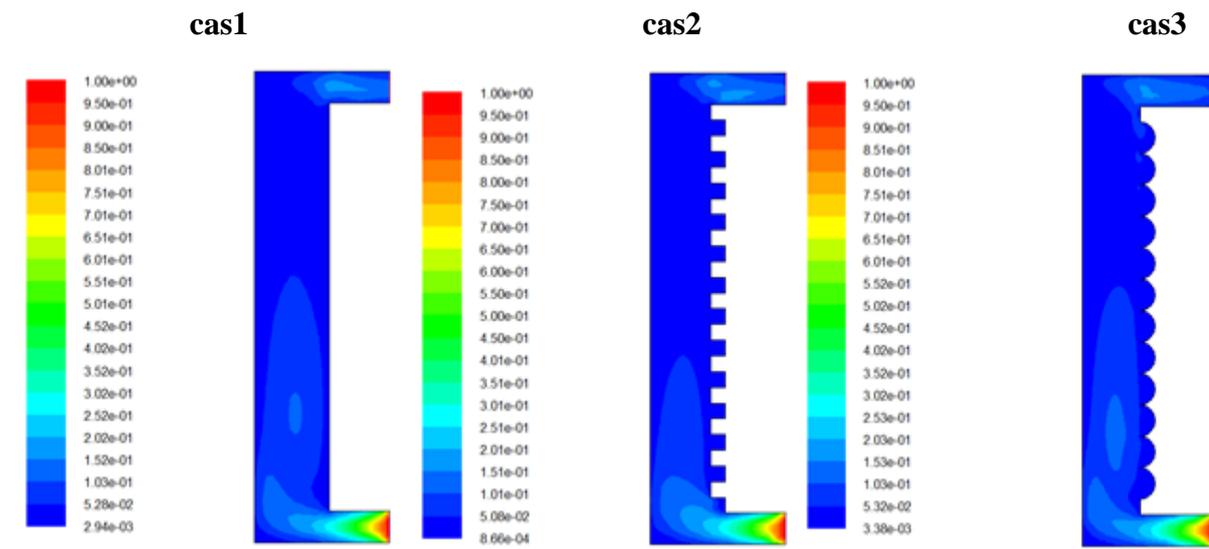
### 5. Distribution de l'énergie cinétique

La figure (4.4) présente la distribution de l'énergie cinétique pour le cas 1, le cas 2 et le cas 3. On peut observer que l'énergie cinétique la plus élevée se développe à l'entrée d'air. Plus la vitesse à l'entrée de l'air augmente, plus la valeur de l'énergie cinétique développée est importante. Pour une vitesse d'entrée d'air de 2 m/s, on peut clairement visualiser le contour de l'énergie cinétique à la fois à l'entrée d'air et à la sortie.

V=0.5m/s



$V=1\text{m/s}$



$V=2\text{m/s}$

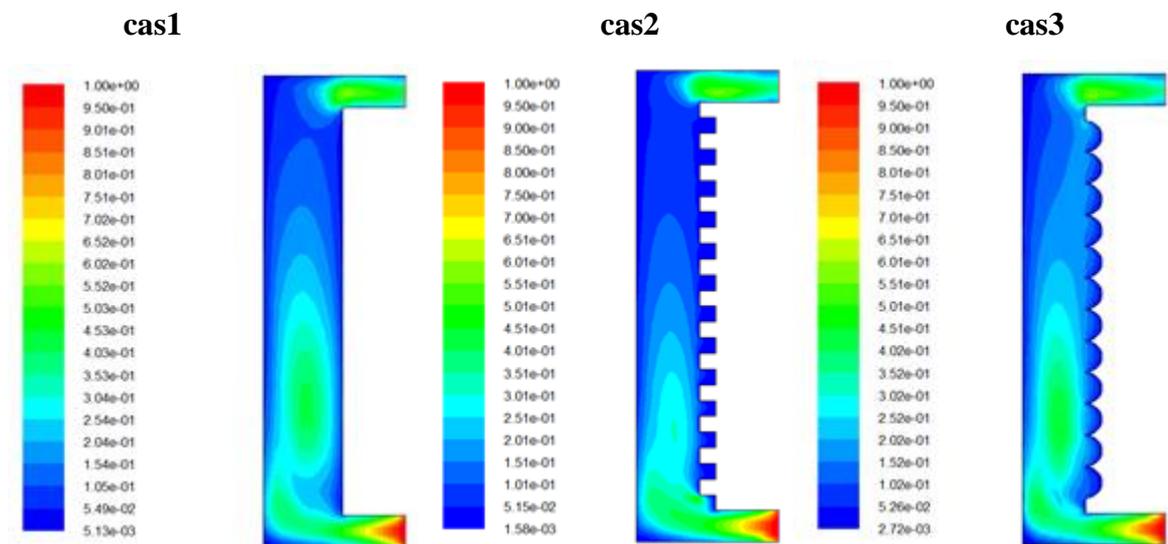
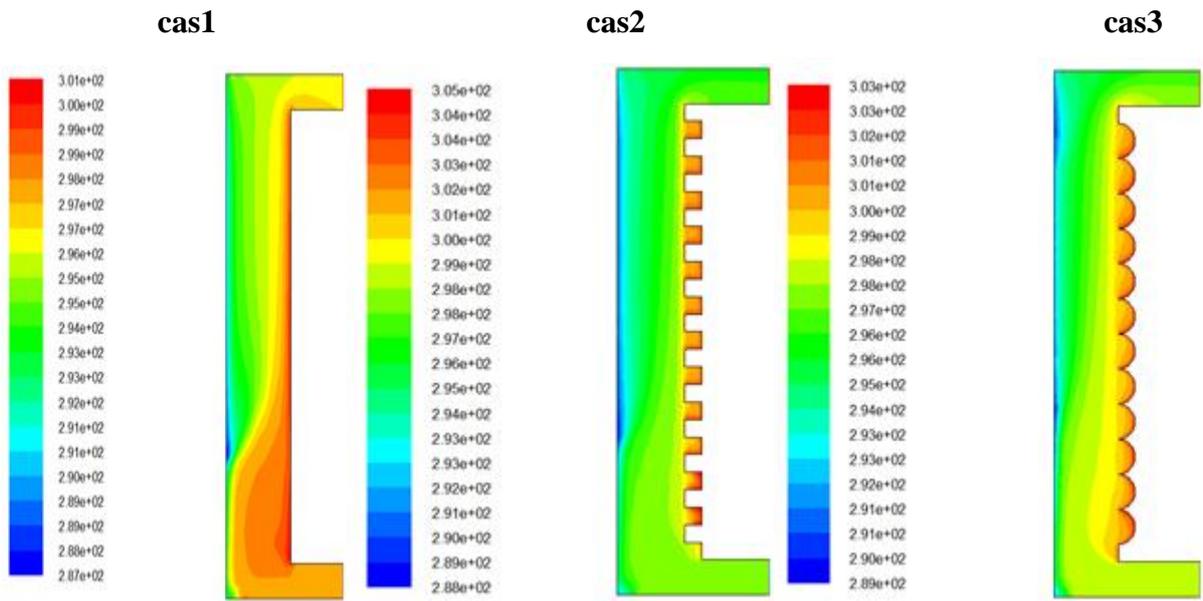


Figure 4.4 Contour de l'énergie cinétique pour les trois cas

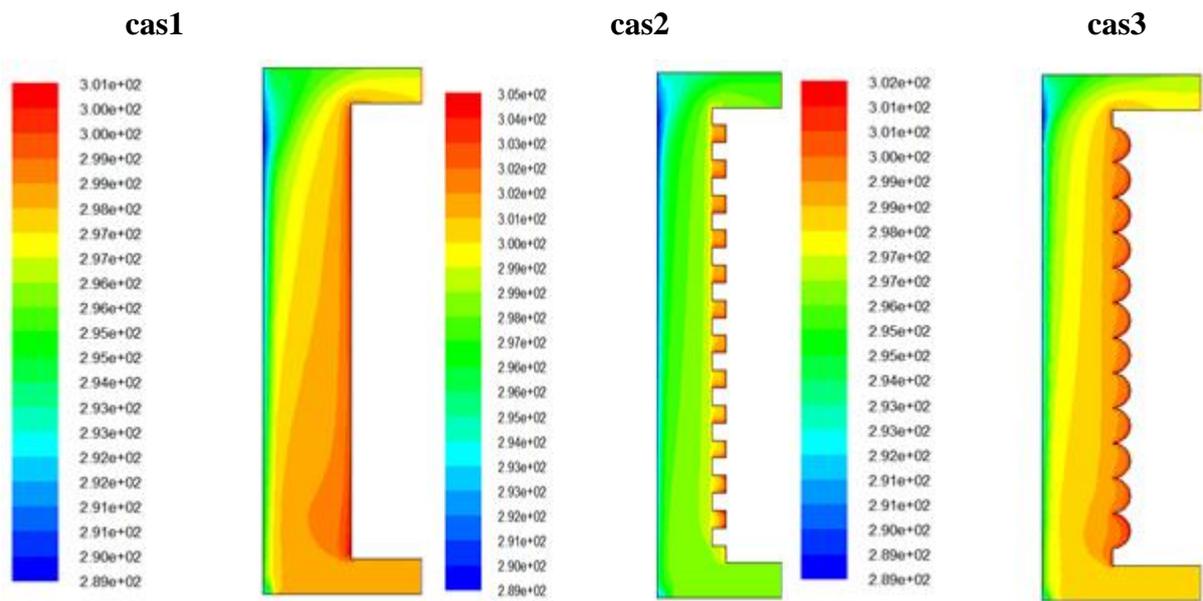
## 6. Distribution de la température totale

Les figures suivantes (figure 4.5) présentent l'évolution de la température pour trois configurations (cas 1, cas 2 et cas 3) avec trois vitesses d'entrée d'air différentes. Les valeurs de température les plus élevées se trouvent près de la paroi chaude. Les profils de la figure (figure 4.6 et figure 4.7) montrent l'évolution de la température à la sortie du cas 1 et du cas 2 et cas 3. La température moyenne la plus élevée a été observée pour une vitesse d'entrée d'air de 2 m/s (tableau 4.1)

V=0.5m/s



V=1m/s



V=2m/s

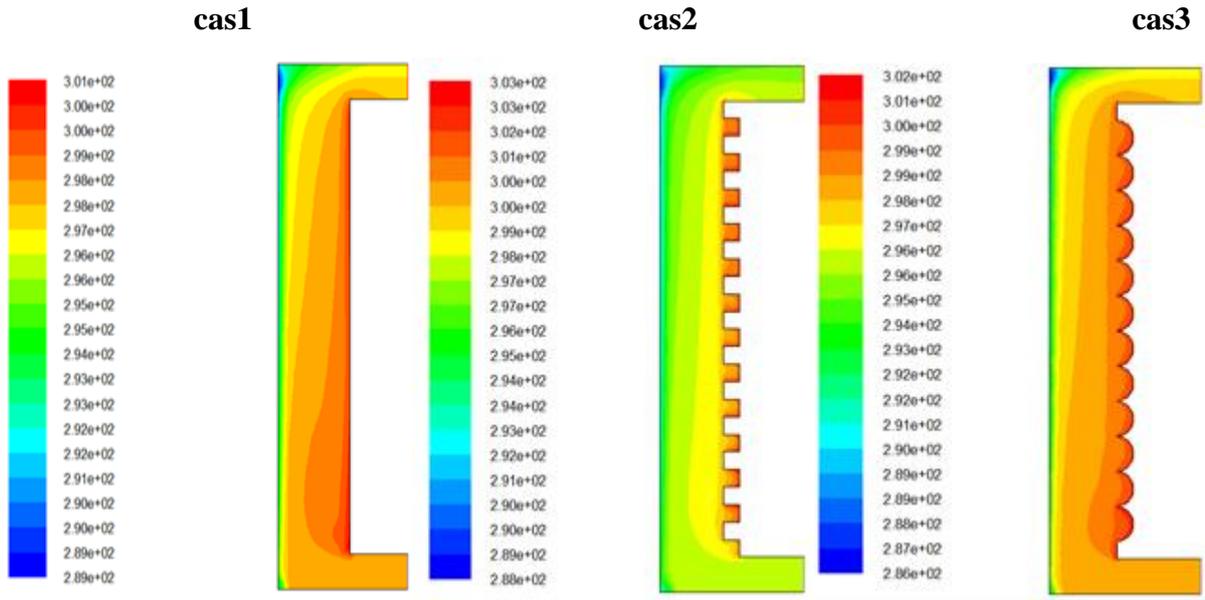
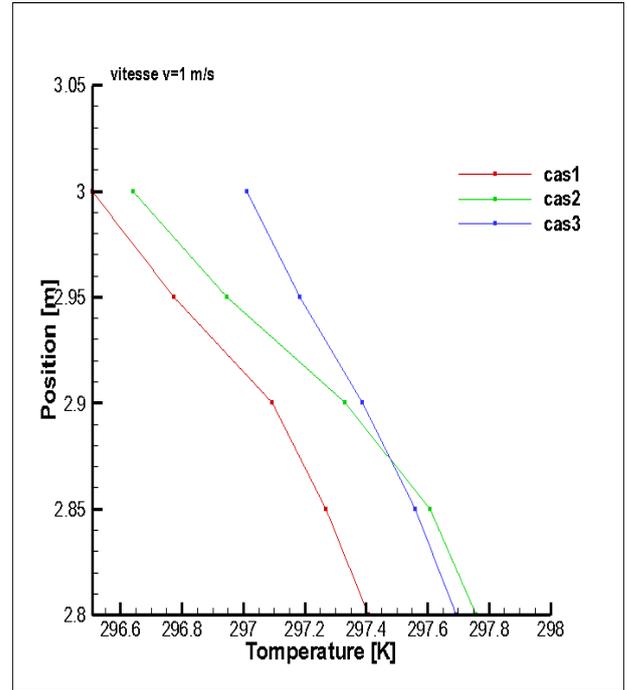
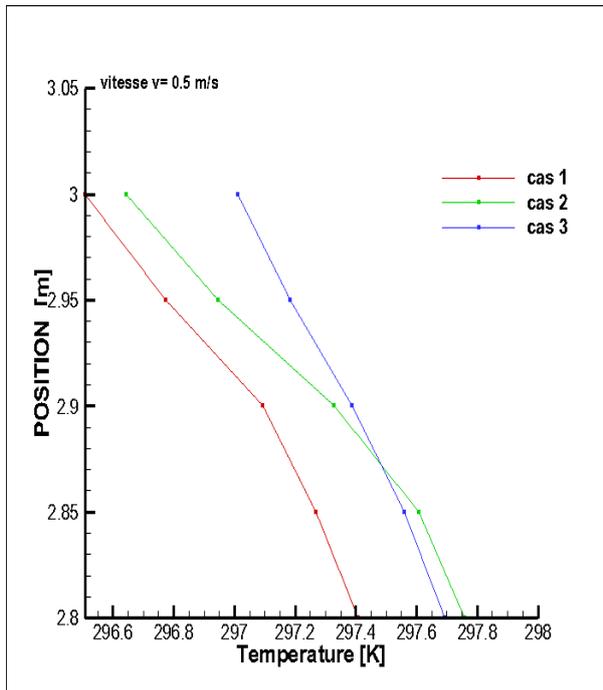


Figure 4. 5 Contour température total pour les trois cas



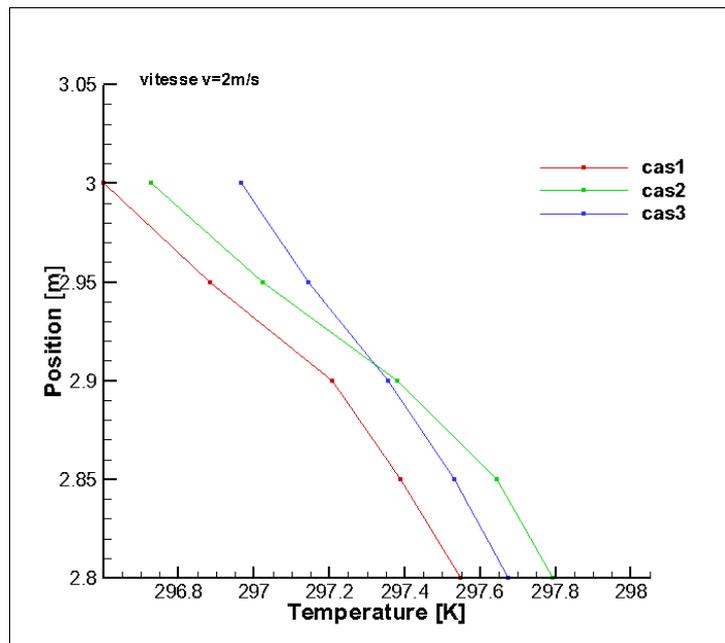


Figure 4.6 Profil de la distribution de la température à la sortie pour les trois cas

Tableau 4.1 Valeur moyenne de la vitesse et de la température et de pour les trois cas

	Température moyenne (K)		
Vitesse d'entrée de l'air (m/s)	0.5	1	2
1 <sup>er</sup> cas	296.218	297.288	297.520
2 <sup>ème</sup> cas	296.939	297.587	297.714
3 <sup>ème</sup> cas	297.088	297.845	297.843
	Vitesse moyenne (m/s)		
Vitesse d'entrée de l'air (m/s)	0.5	1	2
1 <sup>er</sup> cas	0.274	0.504	1.020
2 <sup>ème</sup> cas	0.281	0.535	1.077
3 <sup>ème</sup> cas	0.239	0.450	0.911

## 7. Discussion et interprétations

Au cours de ce chapitre, nous avons examiné les résultats numériques de la simulation, en termes des lignes de courant, la vitesse, l'énergie cinétique turbulente et la distribution de la température pour les trois cas distinctes.

La comparaison entre le premier cas et le deuxième cas en valeur moyenne de la distribution de la température et la vitesse est regroupée sur le tableau (4.2) :

**Tableau 4. 2** Valeur moyenne de la vitesse et de la température « cas1 et cas2 ».

	Température moyenne (K)		
Vitesse d'entrée de l'air (m/s)	0.5	1	2
1 <sup>er</sup> cas	296.21	297.288	297.52
2 <sup>ème</sup> cas	296.93	297.587	297.712
	Vitesse moyenne (m/s)		
Vitesse d'entrée de l'air (m/s)	0.5	1	2
1 <sup>er</sup> cas	0.274	0.504	1.020
2 <sup>ème</sup> cas	0.281	0.535	1.078

D'après les résultats dans le tableau (4.2), on remarque une amélioration du chauffage pour le 2<sup>ème</sup> cas par rapport 1<sup>er</sup> cas.

La comparaison entre le deuxième cas et le troisième cas en valeur moyenne de la distribution de la température et la vitesse est regroupée sur le tableau (4.3) :

**Tableau 4. 3** Valeur moyenne de la vitesse et de la température «cas2 et cas3 ».

	Température moyenne (K)		
Vitesse d'entrée de l'air (m/s)	0.5	1	2
2 <sup>ème</sup> cas	296.93	297.587	297.712
3 <sup>ème</sup> cas	297.322	297.673	297.765
	Vitesse moyenne (m/s)		
Vitesse d'entrée de l'air (m/s)	0.5	1	2
2 <sup>ème</sup> cas	0.281	0.535	1.078
3 <sup>ème</sup> cas	0.266	0.531	1.069

D'après les résultats dans le tableau si dessus, on remarque une augmentation de la température du 3<sup>ème</sup> cas par rapport 2<sup>ème</sup> cas.

De ce fait, nous pouvons dire que le troisième cas du local offre un bon confort thermique, en comparaison avec les deux autres cas.

## **8. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons comparé les résultats numériques de la simulation entre les trois cas en valeur moyenne distribution de la température et la vitesse.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

---

Dans ce mémoire on a étudié le comportement dynamique et thermique de l'air à l'intérieure de différentes géométries de mur trombe. Nous avons utilisé l'outil numérique CFD et le logiciel FLUENT 6.3.

Le transfert de chaleur par convection mixte turbulent à l'intérieur d'un mur Trombe a été étudié, les trois types de configurations différentes sont considérés. L'air entre dans le mur par une entrée basse à ras avec le sol.

Les performances dynamiques et thermiques pour différente géométries de mur Trombe ont été évaluées. Trois cas ont été adoptés : il s'agit d'un mur trombe simple, un mur trombe cannelé carré et mur trombe avec rainure circulaire. Les résultats ont été analysés et comparés.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'importance de cette étude. Le cas 3, à savoir le mur Trombe avec rainures circulaires, a montré la meilleure efficacité en termes de température moyenne et de vitesse moyenne.

Par ailleurs, les résultats ont démontré que les dimensions, la forme de la géométrie, ainsi que l'emplacement des entrées et sorties d'air ont une influence sur les performances dynamiques et thermiques et par conséquent sur le confort thermique.

Comme perspectives à ce travail, nous proposons une continuité et ceci en :

1. Etudes expérimentales sur les modèles géométriques de murs capteurs proposés dans ce mémoire.
2. Etudes sur les murs capteurs et comparaison avec les modèles proposés dans ce mémoire (mur capteur à rainure carrée et à rainure courbée).
3. Inclure l'effet de l'utilisation de différents matériaux tels que la brique, le béton, etc.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

- [1]. MEFTAH, Z. et TOUATI, A. Amélioration du confort thermique par intégration de Matériau à Changement de Phase dans les planchers de bâtiment, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, Mémoire pour l’obtention du diplôme de MASTER en Structure, 2019/2020, p121
- [2]. GACEM Mohamed. Comparaison Entre l’Isolation Thermique Extérieure et Intérieure d’une pièce D’un Habitat Situé Dans Le Site De Ghardaïa, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, Faculté des Sciences, Département de Physique, Magister pour option : Physique Electronique et Modélisation, 2010/2011, p83
- [3]. MANSOURA, F. et MANSOURI, N. Etude de l’effet du mur trombe sur la distribution de l’air et le confort dans un habitat, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, MEMOIRE pour l’obtention du diplôme de MASTER en Efficacité Energétique dans les bâtiments de constructions, 20/09/2020, p116
- [4]. AFGHOUL, R. et TEMAGOULT, S. Intégration d’un mur trombe dans un habitat, Université Saad Dahleb - Blida-1, Faculté de Technologie, Département Des Énergies Renouvelables, Mémoire de fin d’études Pour l’obtention du diplôme de master en énergies renouvelables, 2021/2022, p72
- [5]. JAMAI, Y. et BENARRADJ, N. Simulation numérique 3D pour différent modèles géométriques de chauffage par mur trombe, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, MEMOIRE pour l’obtention du diplôme de MASTER en Structure : Efficacité énergétique dans les bâtiments de constructions, 2021 /2022, p94
- [6]. SEFROU, A. et BETTIOUI, M. SIMULATION NUMERIQUE DE LA VENTILATION D’UN LOCAL, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, MEMOIRE pour l’obtention du diplôme de MASTER en Structures : Efficacité Energétique Dans Les Bâtiments de Construction, 06 / 2023, p74

[7] : [https://www.xpair.com/lexique/definition/confort\\_thermique.htm](https://www.xpair.com/lexique/definition/confort_thermique.htm) (11/02/2024, 11 :34)

[8] : <https://www.batitherm.ch/confort-thermique.html> (28/02/2024, 17 :22)

[9] : <https://opera-energie.com/energie-solaire/> (11/02/2024, 11 :42)

[10] : <https://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-conseils/energie-solaire-active-et-passive-quelles-sont-les-differences-48174> (11/02/2024, 12 :04)

[11] : <https://www.lamaisonsaintgobain.fr/guides-travaux/renovation-energetique-habitat-durable/panneau-solaire-thermique-tout-savoir> (28/02/2024, 17 :42)

[12] : <https://opera-energie.com/energie-solaire/> (28/02/2024, 17 :43)

[13] : <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/> (22/04/2024, 11 :48)

[14] :

[https://www.amazon.fr/gp/product/B08L3L3L3L/ref=as\\_li\\_qf\\_asin\\_il\\_tl?ie=UTF8&tag=deudi63-21&creative=6746&linkCode=as2&creativeASIN=B08L3L3L3L&linkId=1deb1259cc1462ea8157689732eb6416](https://www.amazon.fr/gp/product/B08L3L3L3L/ref=as_li_qf_asin_il_tl?ie=UTF8&tag=deudi63-21&creative=6746&linkCode=as2&creativeASIN=B08L3L3L3L&linkId=1deb1259cc1462ea8157689732eb6416) (19/02/2024, 11 :19)

[15] : <https://physik.fr/wp-content/uploads/2022/11/CAPTEURS-1.png>(19/02/2024, 11 :27)

[16] : <https://www.choisir.com/energie/articles/104525/pour-se-chauffer-le-mur-trombe> (12/02/2024, 11:22)

