

جمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي 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 : JAMAI YOUSOUF

BENARRADJ NORA

Sujet

Simulation numérique 3D pour différent modèles géométriques de chauffage par mur trombe

Soutenu publiquement, le 27/06/2022 , devant le jury composé de :

Pr TALEB OMAR
Pr ALIANE KHALED
Dr HENAOUI MUSTAPHA

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examinateur
Encadrant

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout
puissant et

Miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience et le
courage d'accomplir ce modeste travail.

et c'est avec une immense reconnaissance que nous tenons à
remercier

Notre encadrant Mr « HENNAOUI MUSTAPHA » pour ses
précieux conseils et

sa disponibilité tout au long de la réalisation de

Ce travail, ainsi pour

l'orientation, la confiance, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous
consacrer.

On lui présente donc nos sentiments de gratitude.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour
l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner

notre

travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos sincères remerciements à tous nos professeurs du
département

de génie civil de la faculté des sciences et technologie à Tlemcen

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les

personnes qui ont

participé de près ou de loin à la réalisation de ce

travail

Dédicaces

C'est avec mon énorme plaisir, un cœur ouvert et une joie immense, que je dédie ce modeste travail tout d'abord à mes parents pour leurs amours, leurs sacrifices et leurs encouragements qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Vous présentez pour moi le symbole de la bonté, la source de tendresse et l'exemple du dévouement.

Vos prières et vos bénédictions m'ont été d'un grand secours pour bien mener mes études.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous vos sacrifices.

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

A mes SŒURS DJAHIDA ET AMARIA, merci pour tout ce que vous avez fait pour moi, Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de Réussite.

A mon binôme NORA avec qui j'ai partagé les joies et les difficultés durant ce projet merci pour tous

Merci

Aux personnes qui m'ont encouragé et motivé, qui n'ont cessé d'œuvrer pour ma réussite et pour mon bonheur.

JAMAI YOUSOUF

Dédicaces

Ce que personne ne peut compenser les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation et pour mon bien être, qui n'ont jamais cessé de me soutenir moralement :

C'est à vous mes chers parents, la source de mes efforts, que je dédie ce modeste travail.

A ma belle-famille : Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur et de santé.

A mes amis proches, qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés avec leurs précieux conseils.

C'était avec toi mon binôme « YOUSOUF » que j'ai partagé les bons moments pour que nous puissions achever notre mémoire dans les meilleures conditions.

A mes professeurs et enseignants.

A tous mes collègues sans exception, et à tous qui me connaissent, et m'aime.

Je vous dis merci.

A toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

BENARRADJ NORA

RESUME

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (ENR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire.

Dans ce contexte, l'énergie solaire est produite grâce à la technologie :

- de cellules solaires Photovoltaïques qui transforme directement le rayonnement solaire en électricité.
- Le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur solaire.

Le mur trombe permettant de chauffer le logement grâce au Rayonnement solaire.

Le but de ce travail est de :

- 1- L'optimisation des performances des systèmes solaires passifs par simulation numérique.
- 2- Une théorie sur la notion thermique.
- 3- La construction de maisons bioclimatique par l'utilisation d'énergie solaire.
- 4- Essayé d'améliorer la température de l'air fournie par un mur trombe pour le confort thermique.

Une simulation numérique tridimensionnelle avec le logiciel Fluent de l'écoulement turbulent incompressible de l'air dans un mur trombe.

Les résultats de la C.F.D (Computational Fluid Dynamics) nous on permit de visualiser le comportement hydrodynamique et thermique de l'écoulement d'air pour trois des configurations différentes.

Les résultats présentés dans ce mémoire sont : la distribution de la vitesse, la distribution de l'énergie cinétique turbulente et de la température.

Mots-clés : Mur trombe, Energie solaire, système solaire passif, confort thermique, simulation numérique.

ABSTRACT

Algeria is initiating a green energy dynamic by launching an ambitious program for the development of renewable energy (ENR) and energy efficiency. This vision of the Algerian government is based on a strategy focused on the development of inexhaustible resources such as solar energy.

In this context, solar energy is produced using technology:

- Photovoltaic which directly transforms solar radiation into electricity
- Solar thermal which directly transforms radiation into heat the Trombe wall, allowing the housing to be heated using solar radiation.

The aim of this work is:

1. Performance optimization of passive solar systems by digital simulation.
2. A theory on the thermal concept.
3. The construction of bioclimatic houses using solar energy.
4. Tried to improve the air temperature provided by a Trombe wall for thermal comfort a three-dimensional numerical simulation with Fluent 6.3 software of the incompressible turbulent flow of air in to a Trombe wall.

The results of the C.F.D (Computational Fluid Dynamic) allowed us to visualize the hydrodynamic and thermal behavior of the air flow for three different configurations.

The results presented in this thesis are: the velocity distribution, the turbulent kinetic energy distribution and the temperature distribution.

Keywords: Trombe wall, solar energy, passive solar system, thermal comfort, digital simulation.

ملخص

الجزائر تبدأ ديناميكية الطاقة الخضراء من خلال إطلاق برنامج طموح لتطوير الطاقة المتجددة تستند هذه الرؤية للحكومة الجزائرية إلى استراتيجية تركز على تنمية الموارد التي لا تنضب مثل وكفاءة الطاقة.(ENR) الطاقة الشمسية

في هذا السياق، يتم إنتاج الطاقة الشمسية باستخدام التكنولوجي:

- الخلايا الكهروضوئية التي تحول الإشعاع الشمسي مباشرة إلى كهرباء.

-الطاقة الشمسية الحرارية التي تحول الإشعاع مباشرة إلى حرارة.

يسمح جدار الترومب بتدفئة المنزل باستخدام الإشعاع الشمسي.

الهدف من هذا العمل هو:

1. تحسين أداء الأنظمة الشمسية السلبية عن طريق المحاكاة الرقمية.

2. نظرية في المفهوم الحراري.

3. بناء منازل بيولوجية مناخية باستخدام الطاقة الشمسية.

4. حاول تحسين درجة حرارة الهواء التي يوفرها جدار الترومب لتوفير الراحة الحرارية.

محاكاة عددية ثلاثية الأبعاد مع برنامج (فلويانت 6.3) للتدفق المضطرب غير القابل للضغط للهواء في جدار الترومب.

CFD (Computational Fluid Dynamics) سمحت لنا نتائج

بتصور السلوك الهيدروديناميكي والحراري لتدفق الهواء لثلاثة تكوينات مختلفة.

النتائج المعروضة في هذه الرسالة هي: توزيع السرعة وتوزيع الطاقة الحركية المضطربة وتوزيع درجات الحرارة.

كلمات مفتاحية : جدار الترومب، الطاقة الشمسية، النظام الشمسي السلبي، الراحة الحرارية، المحاكاة الرقمية.

TABLE DE MATIERE

Remerciements	II
Dédicaces.....	III
Dédicaces.....	IV
RESUME	V
ABSTRACT	VII
ماخذ	VIII
TABLE DE MATIERE	IX
LISTES DES ACRONYMES ET NOMENCLATURE.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES TABLEAU	XIV
INTRODUCTION GENERALE :	1
CHAPITRE 1 : Notion sur le confort dans un habitat et l'efficacité énergétique	3
1.1 Introduction.....	3
1.2. L'efficacité énergétique dans le bâtiment.....	3
1.3 Les clés de l'efficacité énergétique	4
1.3.1 La conception architecturale des bâtiments.....	4
1.3.2 L'isolation thermique des parois (murs et toiture)	4
1.3.3 Le choix des matériaux.....	4
1.3.4 L'utilisation de vitrage de bonne performance optique et thermique.....	5
1.3.5 Énergies renouvelables	5
1.3.6 L'utilisation de systèmes d'éclairage performants dans les bâtiments.....	5
1.4 Les bâtiments à efficacité énergétique	5
1.5 Les contraintes à l'intégration de l'EE dans le bâtiment	5
1.6 La maîtrise de la consommation	6
1.7 Les réglementations thermiques.....	6
1.8Le confort thermique dans une habitat	6
1.8.1 Définition.....	6
1.8.2 Température légal dans un habitat.....	6
1.8.3 Mode de transfert de chaleur	7
1.8.3 .1 Conduction	7
1.8.3.2 Rayonnement.....	7
1.8.3.3 Convection.....	7
1.9 Bilan thermique et confort.....	8
1.9.1 Echange thermique avec l'ambiante.....	8
1.9.2Différents facteurs agissant sur le confort thermique.....	9
1.9.2.1 L'orientation.....	9
1.9.2.2 La ventilation naturelle.....	10

1.9.2.3 Dimension et ouvertures.....	10
1.9.2.4 La forme et compacité.....	11
1.9.2.5 La couleur.....	11
1.9.2.6 Protection solaire et vent dominant.....	11
1.9.2.7 Facteurs ayant une incidence sur le confort thermique.....	12
1.9.2.7.1 Température de l'air.....	12
1.9.2.7.2 Humidité de l'air.....	12
L'humidité relative de l'air affecte également le confort. Idéalement, l'humidité relative en hiver devrait être comprise entre 30% et 70%. En été, il est préférable d'avoir de l'air sec pour favoriser la transpiration.....	12
1.9.2.7.3 Courants d'air.....	12
1.10 Le rapport entre l'enveloppe et le confort thermique.....	12
1.11 Actions de l'inertie thermique.....	15
1.12 Conclusion.....	16
Mur trombe et chauffage dans un habitas.....	3
2.1 Introduction :.....	14
2.2 Schémas de principe du mur trombe.....	15
2.2.1 Définition de mur trombe :.....	15
2.2.2 Principe de fonctionnement du mur trombe :.....	15
2.2.3 Comment fonctionne un mur trombe.....	16
2.2.4 Comment conçu un mur trombe.....	16
2.2.5 La bonne épaisseur d'un mur trombe.....	17
2.3 Mur trombe : tirer parti des saisons.....	17
2.3.1 En hiver pour chauffer l'intérieur.....	17
2.3.2 En été pour rafraichir la maison.....	17
Systèmes de stockage passif.....	18
2.4 Maison Bioclimatique :.....	23
2.4.1 Les techniques passives :.....	25
2.4.2 Les techniques dynamiques :.....	28
2.5 Description du système de chauffage par mur TROMBE:.....	30
2.5.1 Fonctionnement de mur Trombe pendant le jour (période de chauffe) :.....	30
2.5.2 Fonctionnement de mur Trombe pendant la nuit :.....	31
2.5.3 Caractéristiques du vitrage et de la lame d'air.....	33
2.6 Avantages et inconvénients.....	35
2.7 Le cout d'un mur trombe.....	36
2.8 Conclusion :.....	36
CHAPITRE 3 : Simulation Numérique 3D De La Circulation D'Air Dans Un Mur Trombe.....	37
3.1 Introduction.....	38
3.1.1 Ecoulement laminaire.....	38

3.1.2	Ecoulement turbulent	39
3.2	Définition du problème	40
3.3	Equations gouvernantes de l'écoulement	40
3.4	Modélisation de la turbulence	41
3.5	Conditions aux limites	42
	Au niveau des murs, condition $u=v=0$	42
3.6	Simulation numérique	43
3.6.1	La méthode des volumes finis (MVF)	43
3.7	Présentation de Gambit et Fluent	44
3.7.1	Initiation au logiciel GAMBIT	44
3.7.1.1	Démarrage de Gambit	44
3.7.1.2	Construction de la géométrie	45
3.7.1.3	Réalisation du maillage	46
3.7.1.4	Exportation du maillage	48
3.7.2	Initiation au logiciel FLUENT	49
3.7.2.1	Importation de la géométrie	49
3.7.2.2	Vérification du maillage importé	49
3.7.2.3	Vérification de l'échelle	50
	Grid→Scale	50
3.7.2.4	Affichage de la grille	51
3.7.2.5	Choix du solver	51
3.7.2.6	L'équation de l'énergie	52
3.7.2.7	Choix du modèle de l'écoulement	53
3.7.2.8	Définition des caractéristiques du fluide	53
3.7.2.9	operating conditions	54
3.6.2.10	Conditions aux limites	55
3.7.2.11	Choix d'ordre des équations et l'algorithme	58
3.7.2.12	Lancement de calcul	58
3.8	Conclusion	60
CHAPITRE 4	: résultats et interprétations	61
4.1	Résultats et interprétations	62
4.2	Maillage	62
4.3	Distribution de la vitesse suivant les 3 directions (x ; y ; z)	63
4.4	Distribution de l'énergie cinétique	65
4.5	Distribution de la Température	67
Conclusion	 :	71
BIBLIOGRAPHIES	72

LISTES DES ACRONYMES ET NOMENCLATURE

ACRONYMES :

CFD: Dynamique des fluides computationnels.

PREBAT : Programme de Recherche et D'expérimentation Sur L'énergie Dans Le Bâtiment.

CIBSE: Certified Institute of Building Services Engineers.

VMC : Ventilation mécanique contrôlée.

MVF: Méthode des volumes finis.

NOMENCLATURE :

Φ : Flux thermique	<i>[W/m²]</i>
T : Température	<i>[K]</i>
T₀ : Température de référence.	<i>[K]</i>
ρ_0 : Masse volumique à T ₀	<i>[Kg/m³]</i>
V : Vitesse	<i>[m/s]</i>
β : coefficient de dilatation thermique.	
P_{atm} : Pression atmosphérique.	<i>[Pa]</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Différents modes de transfert de chaleur _____	8
Figure 1-2: Modèle de transmission entre le corps humain [19] _____	9
Figure 1-3: La relation entre l'enveloppe et les paramètres du confort (l'agence international du l'énergie) _____	13
Figure 1-4: Approche systémique du comportement thermique d'un bâtiment de logement _____	14
Figure 1-5: Variation de la température extérieure et intérieure _____	15
Figure 1-6: L'inertie dans une maison passive [29] _____	16
Figure 2-1: Installation du mur trombe avec brique et architecture écologique [33] _____	18
Figure 2-2 : Image2 d'un mur du l'extraordinaire de l'eau : le mur capteur et le clos des hautes _____	20
Figure 2-3: Installation par ballon d'eau _____	20
Figure 2-4: Mur en galet hourdé [35] _____	21
Figure 2-5: Schéma d'un lit de galets avec le sens d'écoulement de l'air en stockage et en déstockage _____	22
Figure 2-6: De la maison bioclimatique [36] _____	24
Figure 2-7: Compacité d'une maison en fonction de sa forme, pour une même surface de Plancher (120m2) [34]. _____	26
Figure 2-8: Schéma d'une habitation bioclimatique. _____	28
Figure 2-9: Fonctionnement de jour en période de chauffe.[38] _____	31
Figure 2-10 : Fonctionnement de nuit en période de chauffe _____	32
Figure 2-11 : Fonctionnement Hiver _____	32
Figure 2-12 : Fonctionnement d'été _____	33
Figure 2-13 : Fonctionnement du double vitrage peu émissif [38] _____	34
Figure 2-14 : Transmission du rayonnement solaire dans vitrages [38] _____	34
Figure 3-2: Profil de vitesse dans les écoulements turbulent et laminaire _____	39
Figure 3-3: Les trois configurations de mur trombe _____	40
Figure 3-4: Conditions aux limites _____	42
Figure 3-6: Choix du modèle d'écoulement _____	53
Figure 3-8: Choix de la pression de référence _____	54
Figure 3-7: Définition des caractéristiques du fluide _____	54
Figure 3-10: Vitesse d'entrée _____	56
Figure 3-9: Valeurs des conditions aux limites _____	56
Figure 3-11: Pression de sortie _____	57
Figure 3-13: Choix d'ordre des équations et l'algorithme _____	58
Figure 3-12: Parois du mur trombe _____	57
Figure 3-14: Choix du nombre des itérations _____	59
Figure 4-1: Maillage des différentes géométries _____	62
Figure 4-2: contour de vitesse pour les trois configurations _____	64
Figure 4-3: Profils de vitesse à la sortie pour les 3 configurations _____	65
Figure 4-4:Contour de la turbulence pour les 3 géométries _____	66
Figure 4-5: Contours de la température (K) pour les différentes configurations _____	68
Figure 4-6: profils de température de l'air à la sortie pour les 3 configurations _____	69

LISTE DES TABLEAU

Tableau 4-1 Tableau qui montre la valeur moyenne de (vitesse, turbulence et température) pour les différents flux des 3 configurations étudiée _____ 70

INTRODUCTION GENERALE :

La convection thermique au sein des espaces confinés est devenue, ces dernières années, un sujet d'investigation d'une grande importance, vu sa présence dans différentes applications industrielles telles que le refroidissement des composantes électroniques, les réacteurs nucléaires ainsi que les pertes thermiques dans les collecteurs solaires. Plusieurs travaux ont été réalisés pour mieux cerner ce phénomène et ce, en considérant différentes configurations géométriques, différents fluides (newtoniens, non newtoniens et nano fluides), etc.

L'Algérie possède un énorme potentiel d'énergies renouvelables telles que l'énergie éolien, géothermie, biomasse, et l'énergie photovoltaïque vu l'importance du gisement solaire du pays [1][2][3][4].

Parmi les énergies renouvelables, nous citons l'énergie solaire, une énergie exploitée depuis des milliers d'années. En effet l'énergie thermique produite par voie solaire est une forme d'énergie très écologique sans émission de CO₂. De ce fait la substitution des charbons, gaz naturels et autres réduisent sans aucun doute les effets désastreux des systèmes énergétiques classiques.

La solution proposée tourne autour de l'ajout d'un système de chauffage solaire passif à un logement qui se base sur la limitation des pertes énergétiques avant toute chose. Cette dernière est une solution séduisante et très intéressante pour l'économie et l'utilisation rationnelle de l'énergie ainsi réduisant sans aucun doute les effets désastreux des systèmes énergétiques classiques.

Parmi ces nouveaux systèmes, celui développé par le professeur Trombe qui comprend à disposer un mur en maçonnerie lourde orienté sud derrière un vitrage et le munir de deux orifices et qui consiste à chauffer l'air avec le soleil puis le diffuser dans un local. Un procédé technique en phase avec l'architecture bioclimatique, revisité aujourd'hui pour optimiser son efficacité. Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude du comportement d'un système de mur Trombe et son effet sur la distribution de l'air et le confort dans un local. 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 laminaire, transitoire et que la convection est naturelle vu qu'il n'existe aucun travail extérieur pour extraire cet air en tenant compte de la théorie de Boussinesq. La technique **CFD** est utilisée pour résoudre les équations gouvernantes. Le manuscrit est

composé de quatre chapitres dont le premier est consacré à une généralité sur les notions du confort dans un habitat et l'efficacité énergétique. Le deuxième chapitre présente une étude détaillée sur le mur Trombe et le chauffage des habitats.

Le troisième chapitre abordera la simulation numérique de deux modèles de mur Trombe : le premier est un mur simple dit mur Trombe. Le deuxième est dit mur Trombe cannelé. L'utilisation du logiciel Gambit 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 et la distribution de la température sont donnés dans le quatrième chapitre. Les dépouillements des résultats pour chacun des deux modèles de mur trombe sont discutés pour différents temps de fonctionnement des deux modèles du mur Trombe. Nous achevons ce travail par une conclusion générale.

CHAPITRE 1 : Notion sur le confort dans un habitat et l'efficacité énergétique

1.1 Introduction

La réussite en matière d'efficacité énergétique des bâtiments à basses consommations, énergie zéro et énergie positive ; est essentiellement liée à la politique. Seule une mise en œuvre d'une politique volontariste et agressive peut aspirer à satisfaire les besoins futurs tout en préservant les ressources énergétiques. [5] L'énergie constitue un produit vital pour toutes les activités humaines, en étant depuis toujours un paramètre indispensable pour l'homme afin d'améliorer son confort, l'amélioration de son bien-être s'est développée parallèlement avec la découverte de nouvelles formes d'énergies, depuis la découverte du feu passant par les énergies fossiles et enfin les énergies renouvelables. Le bâtiment en tous ses types, primaire, secondaire et tertiaire consomme cette énergie pour répondre à leurs multiples besoins et confort (éclairage, cuisson, chauffage, climatisation, etc.). Actuellement, le pétrole, le charbon et le gaz naturel, trois énergies polluantes et non renouvelables, fournissent la plupart de la consommation quotidienne mondiale d'énergie. On reconnaît aujourd'hui la responsabilité de cette consommation sur le réchauffement climatique. Une utilisation plus rationnelle de ces énergies s'impose et doit se concrétiser par l'efficacité énergétique des bâtiments, des équipements électroménagers plus performants, des techniques industrielles économes, des transports économes etc.... combinée avec un recours plus intensif aux énergies renouvelables de chaque pays.[6]

1.2. L'efficacité énergétique dans le bâtiment

L'efficacité énergétique veut dire réduire à la source la consommation d'énergie nécessaire pour un même service sans provoquer une diminution du niveau du bien-être ou de qualité de ce service dans les bâtiments, autrement dit la meilleure utilisation de l'énergie pour une qualité de vie constante[7]

Le rapport final de la « comparaison internationale bâtiment et énergie » initié par le programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment (**PREBAT**), note qu'en construction neuve ou en réhabilitation, un bâtiment efficace énergétiquement est avant tout un concept d'ensemble saisissant dans un même processus l'architecture, le climat, l'enveloppe et les équipements.[8]

L'objectif est donc d'intégrer des solutions permettant l'optimisation des consommations sans diminuer le confort des occupants,[9] ni compromis sur les capacités techniques des outils propres à l'activité du bâtiment.

1.3 Les clés de l'efficacité énergétique

Dans le bâtiment La conception des bâtiments à efficacité énergétique est un processus complexe, sa complexité est due aux informations volumineuses qui nécessitent une approche particulière pour le choix techniques et architecturaux retenus pour ce genre de conception. Ainsi, la forme, la compacité et l'orientation du bâtiment ont des conséquences significatives sur sa performance énergétique, de mauvais choix peuvent entraîner des défaillances imprévisibles dont l'impact sur la consommation énergétique du bâtiment sur le long terme sera effrayant. Selon l'article du FFEM33 ces paramètres clés peuvent être résumés comme suit.

1.3.1 La conception architecturale des bâtiments

La prise en compte, dès la conception, des paramètres de construction du bâtiment tel que l'orientation des façades et des ouvertures, le taux de vitrage et les protections solaires ; éviter les grandes ouvertures sur les façades exposées au Nord qui favorisent les entrées d'air froid en hiver et laissent peu pénétrer le rayonnement solaire. De même, un facteur essentiel de confort en été est la protection solaire des fenêtres notamment celles orientées au sud. Par exemple, les brise-soleils qui assurent un ombrage efficace.

1.3.2 L'isolation thermique des parois (murs et toiture)

L'isolation thermique des bâtiments permet la diminution des échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur, elle réduit également les besoins de chauffage et de climatisation en minimisant les déperditions thermiques. Cette isolation doit être étudiée en fonction des conditions climatiques du lieu de la construction.

1.3.3 Le choix des matériaux

Il faut choisir de meilleurs isolants thermiques et des matériaux énergétiquement performants. Ainsi, les matériaux locaux qui permettent de réduire les déperditions thermiques.

1.3.4 L'utilisation de vitrage de bonne performance optique et thermique

Le type de vitrage utilisé joue un rôle très important dans la maîtrise de l'ambiance interne de l'espace construit. Les ouvertures dans les murs ou les murs-rideaux sont des points faibles de l'isolation des constructions, il est donc nécessaire d'utiliser des vitrages à haute performance énergétique.

1.3.5 Énergies renouvelables

L'utilisation des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide, considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Par exemple, la production d'eau chaude sanitaire (ECS) par énergie solaire est une technique répandue, les besoins en E.C.S sont constants tout au long de l'année, ce qui permet d'être complètement autonome pendant la période estivale, permettant de fournir 60% des besoins en E.C.S.

1.3.6 L'utilisation de systèmes d'éclairage performants dans les bâtiments

Les lampes à incandescence ou halogènes standards sont à éviter et à remplacées par des lampes économiques dont le rendement lumineux est 5 à 6 fois supérieur et la durée de vie est 8 fois plus longue ; elles sont rentabilisées en moins d'un an.

1.4 Les bâtiments à efficacité énergétique

Suivant leurs niveaux de performances énergétiques, les bâtiments sont classés en trois familles : Bâtiments performants, bâtiments très performants et bâtiments zéro énergie ou à énergie positive ; chaque famille à ses labels, ses paramètres de recherche et de réalisation.

[10]

1.5 Les contraintes à l'intégration de l'EE dans le bâtiment

Selon le spécialiste anglais Bill BORDAS, les contraintes à l'intégration de l'EE dans le tertiaire peuvent être résumées en :

- L'incompréhension du marché du bâtiment sur ce qu'il faut améliorer et comment atteindre la PE.
- Les acteurs et utilisateurs croient que la PE est coûteuse.
- Les estimations de la PE en phase de conception ne sont pas fiables et souvent après sa réalisation, le bâtiment consomme le double de l'énergie prévue initialement.

- Le feed-back de l'expérience des bâtiments utilisant la régulation n'est pas assez rapide et direct.[11]

1.6 La maîtrise de la consommation

Énergétique La maîtrise de l'énergie couvre l'ensemble des mesures et des actions mises en œuvre en vue de l'utilisation rationnelle de l'énergie, du développement des énergies renouvelables et de la réduction de l'impact du système énergétique sur l'environnement. [12]

1.7 Les réglementations thermiques

La réglementation thermique est un ensemble de règles à appliquer dans le domaine de la construction afin d'augmenter le confort des occupants tout en réduisant la consommation énergétique des bâtiments, elle définit et fixe le minimum de performances énergétiques à respecter pour les constructions neuves ou existantes en matière de chauffage, climatisation, ventilation, eau chaude sanitaire, d'éclairage et de toute sortes de d'énergies ainsi qu'aux exigences d'orientation et d'isolation.[13]

1.8Le confort thermique dans une habitat

1.8.1 Définition

Au fil des temps , le concept de confort a évolué. Il est de plus en plus souvent rattaché aux conditions de vie à l'intérieur de l'habitat, à l'issue normale et gain ultime suite à l'évolution de ce que fut et ce qu'est devenue une habitation. Il est bon aussi de savoir que nous ne sommes pas "égaux" en matière de confort. Des notions culturelles influent. Par exemple une personne qui aura toujours baigné dans une ambiance légèrement chauffée supportera plus facilement le froid qu'une autre qui aura toujours vécu a + 20 ou 22°. La température maximale idéale est de 28°, c'est-à-dire proche de celle de la température de surface du corps humain (selon les sources, entre 28 à 33°), au-delà commence la zone d'inconfort. Le confort thermique est défini comme « un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique » [14]. La norme ASHRAE 55 définit le confort thermique comme « la condition d'esprit qui exprime la satisfaction en présence d'un environnement thermique donné » [15]. Le confort thermique concerne principalement la température intérieure des pièces, sa répartition harmonieuse dans l'espace et la qualité de l'air ambiant.[15]

1.8.2 Température légal dans un habitat

Le ministère du Logement, de l'Urbanisme et de la Ville a publié la réglementation thermique algérienne des bâtiments. L'application de cette régulation thermique doit conduire à une

isolation thermique des nouveaux bâtiments, dans le but de réduire la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation. Cette politique peut passer la loi n° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la gestion de l'énergie et son règlement d'application, notamment l'arrêté n° 2000-90 du 24 avril 2000 relatif à la réglementation thermique des bâtiments neufs [16]. L'isolation permet de limiter les fuites de calories. Afin de maintenir l'habitat dans la plage légale de 18° C à 19° C, si les murs sont isolés, la chaleur doit être réduite. C'est un fait absolu et incontestable. Ces températures ont été utilisées pour assurer un équilibre entre santé et consommation d'énergie.

1.8.3 Mode de transfert de chaleur

Il est fréquent, dans l'étude des transferts thermiques, de distinguer trois grandes parties chacune dépend à un mode de transfert particulier de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement (Figure 1.1). Chacun de ces modes est lié à un processus physique bien déterminé. En effet, puisque l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses composants ayant une certaine liberté de mouvement (molécules, atomes, électrons libres,...), ceux-ci peuvent échanger tout ou une partie de leur énergie thermique, c'est-à-dire gain ou perte d'énergie cinétique: soit par interaction directe avec les particules voisines (par exemple choc de molécules), ce qui correspond à la conduction, soit par absorption ou émission de radiations électromagnétiques, ce qui correspond au rayonnement, enfin dans le cas d'un gaz ou d'un liquide ce qui correspond à la convection.

1.8.3.1 Conduction

Les échanges de chaleur entre des corps et des objets distincts, comme lorsqu'une main entre en contact avec une paroi, ce mode de transmission est spécifique aux solides, et la transmission s'effectue du chaud vers le froid. Un matériau isolant est, par définition, un mauvais conducteur.

1.8.3.2 Rayonnement

Un échange de chaleur sans contact, qui s'effectue comme son nom l'indique par, intermédiaire de rayons électromagnétiques tels que ceux du soleil et les infrarouges émis par la majeure partie des êtres vivants.

1.8.3.3 Convection

Ce mode de transfert concerne exclusivement les fluides et non les solides (tels que l'air, les liquides et le gaz), qui se déplacent. Ce transport de matières est à la source du transfert de chaleur. [17]

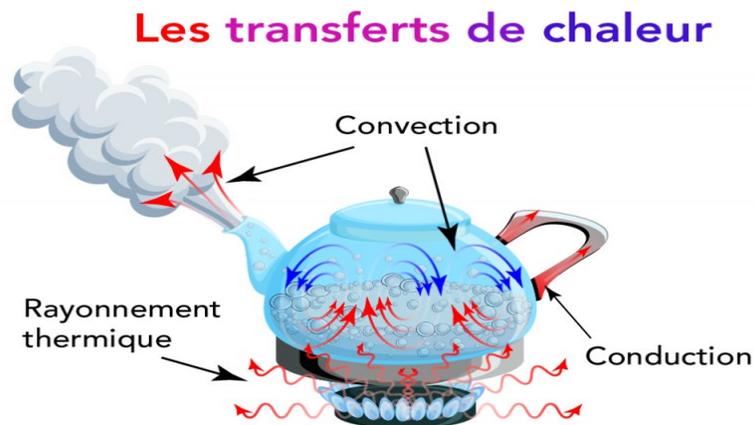


Figure 1-1 : Différents modes de transfert de chaleur

1.9 Bilan thermique et confort

1.9.1 Echange thermique avec l'ambiant

Grace à l'équilibre qui oppose la production de chaleur endogène appelée **thermogenèse** (métabolisme de base et activités physiques) .aux pertes de chaleur vers l'environnement extérieur dites thermolyses, l'homme assure sa stabilité thermique corporelle, de laquelle découle une ambiance confortable .figure (2.2)

- Cependant ;, s'il y a un déséquilibre au profit de la thermolyse c'est une ambiance froide qu'on va ressentir.
- Dans le cas inverse c'est une ambiance chaude qui s'installe, exhortée par une thermogenèse grandissante.

Deux voies sont disponibles à l'organisme pour les échanges avec le milieu extérieur a savoir la peau et les voies respiratoires. Le bilan thermique a l'équilibre s'écrit comme suit :

$$C_{res} + E_{res} + K + C + R + E + H = 0$$

K : Echanges de chaleur au niveau de la peau par conduction

H : étant la production de chaleur interne corps

au repos $H=M$ (métabolisme) mais en exécutant un travail :

$H=M-W$ (W est le travail mécanique)

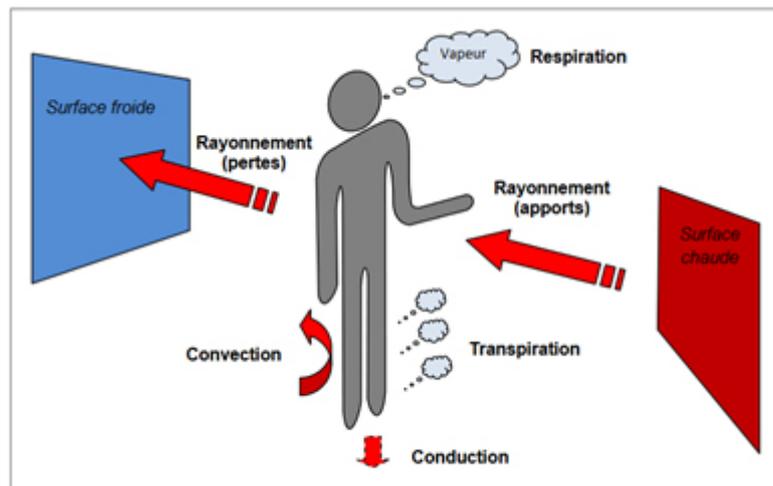


Figure 2 : Modes de transmission de chaleur entre le corps humains et son environnement

Figure 1-2: Modèle de transmission entre le corps humain [19]

L'échange thermique du corps humains est fonction de plusieurs paramètres :

- de la température moyenne de la peau,
- de l'humidité
- de la vitesse de l'air
- de la surface mouillée du corps
- de la perméabilité du vêtement
- ainsi que l'eau corporelle disponible.[18]

1.9.2 Différents facteurs agissant sur le confort thermique

1.9.2.1 L'orientation

B. Givoni[20] place le concept d'orientation au centre des éléments qui affectent l'atmosphère du bâtiment. Il définit la direction du bâtiment par le sens de rotation de ces façades. Ce facteur dépend dans une large mesure de la ventilation, de la nature du climat, du champ de vision et des pertes éventuelles. En effet, l'orientation du bâtiment affecte son atmosphère interne de deux manières, ce qui conditionne la qualité de l'habitat, en y ajustant des facteurs climatiques différents :

-Le rayonnement solaire et son effet chauffant sur les murs et les pièces faisant face à différentes directions.

- L'orientation sud génère généralement de la chaleur et de la lumière, les espaces orientés vers cette direction seront les pièces de vie dédiées aux activités de jour, telles que le salon, la salle à manger, la cuisine et le bureau. Ceux-ci doivent avoir de grandes ouvertures en verre pour mieux capter le rayonnement solaire.

Les pièces peu utilisées et à basse température doivent de préférence être situées du côté nord de l'habitat sont des zones tampons. Ils sont moins utilisés, mais jouent un rôle protecteur contre le froid.

-À l'est et au sud-est, la pièce utilise la lumière du soleil, qui est une source de lumière éblouissante.

-À l'ouest et au sud-ouest, ces pièces bénéficieront du coucher du soleil, mais elles surchaufferont et seront difficiles à contrôler au final.

1.9.2.2 La ventilation naturelle

La gestion du confort d'été passe par la possibilité de ventiler avec de l'air frais une habitation. La capacité de rafraîchissement est disponible comme de jour ou de nuit. En hiver, cette option n'est valable que si un jour fait bon pour aérer la maison. L'air mobile est très favorable à des déperditions de chaleur. Par conséquent, l'impact de la ventilation sur un bâtiment n'est pas négligé, car elle augmente les pertes par convection.[21]

1.9.2.3 Dimension et ouvertures

Les parois transparentes (vitrages) de l'enveloppe d'une habitation participent activement dans les échanges thermiques entre les environnements intérieurs et extérieurs des bâtiments (apports et déperditions thermiques).

Toutefois, une attention particulière aux dimensions de ces ouvertures est recommandée selon l'orientation et la conception. En effet :

-Les vitres verticales orientées plein sud ont le double avantage d'être très bien exposées au soleil d'hiver, et facile à protéger du soleil d'été.

- Pour les fenêtres orientées Est ou Ouest, il est souhaitable de leur donner des dimensions moyennes uniquement avec un plan d'énergie solaire, car en hiver elles reçoivent très peu d'énergie solaire. En été, cependant, elles sont largement exposées (le matin pour les fenêtres orientales, l'après-midi pour les fenêtres occidentales). Parce que la température extérieure est plus élevée l'après-midi, les ouvertures à l'ouest provoquent une surchauffe, qui est plus difficile à éliminer.

-L'ouverture en verre orientée au nord est celle qui a le moins d'absorption solaire, car le vent le plus froid vient généralement du nord, vous devez donc réduire l'ouverture. Cependant, en raison de la consommation excessive d'éclairage artificiel, vous devez éviter de trop réduire ces ouvertures.

1.9.2.4 La forme et compacité

Une maison confortable ne peut être que simple et compacte. Cependant, la forme du bâtiment affecte : Taux de perte de chaleur. Le bilan global de l'éclairage à énergie solaire.

-L'écoulement des flux autour du bâtiment. Par conséquent, selon [22], la forme optimale du bâtiment correspond à celle qui permet de perdre un minimum de chaleur en hiver et d'obtenir un minimum en été.

1.9.2.5 La couleur

D'un point de vue thermique la couleur affecte souvent le comportement thermique des murs extérieurs et donc l'efficacité énergétique de l'habitat. Différentes couleurs absorbent différentes quantités de lumière naturelle. Ainsi, le coefficient d'absorption sera donné en fonction de sa catégorie. [23]

1.9.2.6 Protection solaire et vent dominant

Le but des dispositifs de protection solaire est de minimiser la surchauffe et de contrôler l'éblouissement de la lumière. Ils peuvent être structurellement ancrés dans l'architecture par des (vérandas, brise-soleil, débord de toiture) ou s'appliquer à l'enveloppe (stores, peirciennes, volets). Ils peuvent aussi être fixes ou mobiles, intérieures ou extérieures, verticales ou horizontales. Les protections solaires peuvent également être, liées à l'environnement, autant naturel ou construit, comme la végétation, le relief ou même des masques provoqués par des bâtiments voisins. En fonction de l'utilisation souhaitée, ainsi, les parois exposées aux vents porteurs de pluie, de sable ou autre doit être protégés, tandis que ceux exposées aux vents

doux peuvent être modérément ouverts afin d'utiliser l'évaporation comme moyen de rafraîchissement.

Toutefois, les façades Est et Ouest sont celles qui doivent être plus protégées, car selon (P. Fernandez) l'inclinaison des rayons solaires est importante sur ces façades ce qui accroît leur facilité de traverser les ouvertures vitrées et réchauffe ainsi les façades. Notant que ces façades bénéficient du soleil levant et couchant en toutes saisons. [24]

1.9.2.7 Facteurs ayant une incidence sur le confort thermique

Les principaux facteurs qui ont une incidence sur le confort thermique sont les suivants :

1.9.2.7.1 Température de l'air

Une température idéale pour chaque espace dépend de l'activité qui s'y déroule, de l'heure de la journée et des préférences de chacun. L'idéal est d'éviter de grandes différences de température dans le temps entre le jour et la nuit ou entre les saisons.

1.9.2.7.2 Humidité de l'air

L'humidité relative de l'air affecte également le confort. Idéalement, l'humidité relative en hiver devrait être comprise entre 30% et 70%. En été, il est préférable d'avoir de l'air sec pour favoriser la transpiration.

1.9.2.7.3 Courants d'air

Les courants d'air sont très agréables en été, car ils favorisent l'évacuation de la transpiration, et en hiver ils sont très douloureux, car ils favorisent les échanges thermiques entre le corps et l'air. C'est le principe de la convection :

- En été, des ouvertures soigneusement conçues peuvent créer des courants d'air utiles et rafraîchissants.

Au contraire, en hiver, il est préférable de les réduire ou de les guider pour qu'ils ne balayent pas tout l'espace.

1.10 Le rapport entre l'enveloppe et le confort thermique

Le choix de l'enveloppe du bâtiment a un impact significatif sur la consommation d'énergie. Cependant, à long terme, pour assurer le confort thermique à l'intérieur de la maison, les mauvaises options peuvent être très coûteuses (figure 1.3). La mesure d'amélioration la plus économiquement raisonnable est d'intervenir au niveau de l'enveloppe du bâtiment pour atteindre la performance énergétique [25,26].

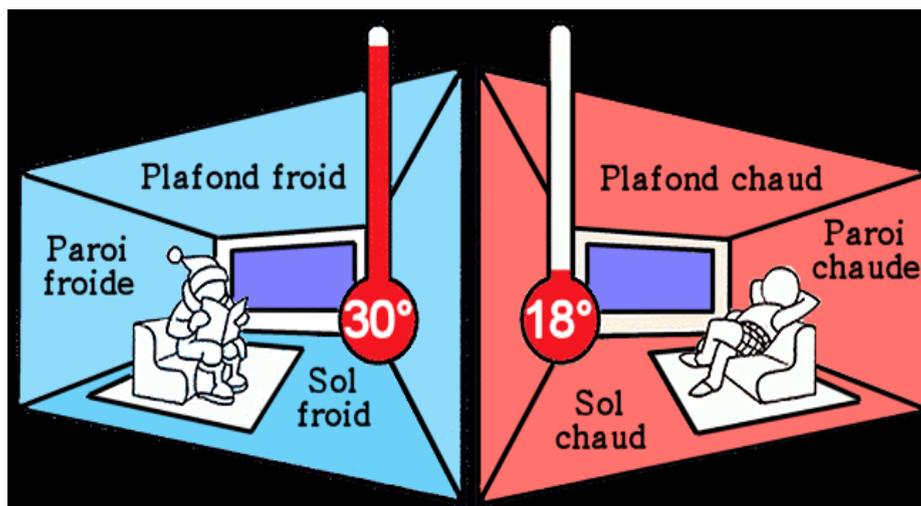


Figure 1-3: La relation entre l'enveloppe et les paramètres du confort (l'agence international du l'énergie)

Autres influences

- Les gains thermiques internes :

Avec le développement de la technologie et des besoins en énergie (éclairage, appareils électroménagers, etc...), le gain de chaleur interne a considérablement augmenté. L'équipement électrique convertit presque toute l'énergie qu'il consomme en chaleur. Par conséquent, l'apport interne comprend toute chaleur générée dans l'espace par des sources internes autres que le système de chauffage.

L'acquisition de ces chaleurs est liée au type de bâtiment, au nombre d'utilisateurs et à leur utilisation.

Selon H. Boivin, le confort de l'espace est directement affecté par ces taux de rentabilité internes (figure 1.4).

On peut dire qu'une fois les gens habités, ces apports sont inévitables. Cependant, il convient de noter que ces contributions sont variables selon le comportement des occupants, et constituent ainsi un facteur exacerbant l'inconfort thermique, sur lequel les moyens de déplacements des bâtiments sont restreints. Seule une bonne ventilation et un bon comportement des occupants peuvent réduire ces intrants ou leur impact sur la température intérieure.

En général, nous pouvons définir l'absorption de chaleur interne dans un bâtiment comme la somme de l'absorption de chaleur liée à la présence des occupants, à

l'utilisation de l'équipement et à l'éclairage artificiel. Le guide A du CIBSE [Certified Institute of Building Services Engineers] recommande d'utiliser la formule suivante pour obtenir un gain de chaleur interne :

$$Q_{int} = Q_{occupants} + Q_{éclairage} + Q_{équipements\ électriques} + Q_{cuisson}$$

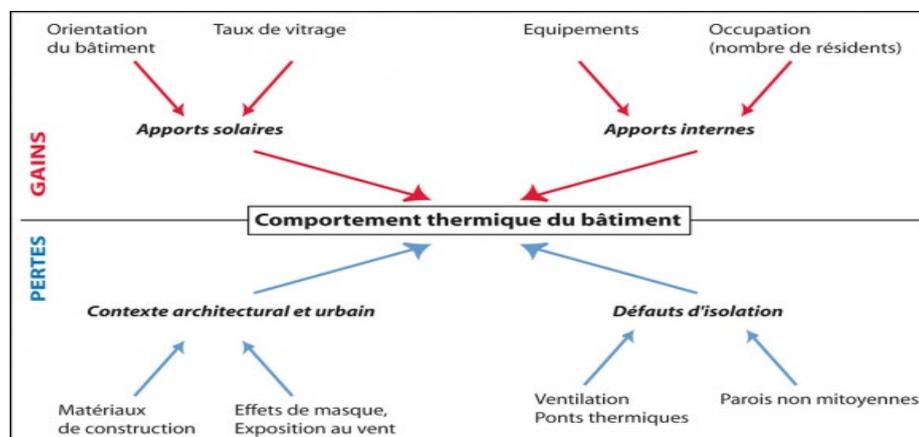


Figure 1-4: Approche systémique du comportement thermique d'un bâtiment de logement

• Le confort d'hiver et d'été :

Le confort thermique est la sensation associée à la chaleur spécifique de chaque personne. En hiver, un bon confort thermique doit assurer une chaleur suffisante. En été, cette chaleur doit être limitée pour éviter une surchauffe. Que ce soit l'hiver ou l'été, chaque période a ses exigences.

- Exigences d'hiver :

En hiver (période de chauffage), deux facteurs importants liés aux exigences sont la température de l'air intérieur et la température radiante de la pièce.

-Température interne :

Fixée à 19°C au centre de la pièce avec une hauteur de 1.25m.

-Température radiante moyenne :

La température ne doit pas dépasser 4°C, et à 1m des mur froids (personnes situées dans des zones stables de ces murs).

-Humidité relative :

Doit être comprise entre 30% et 70%.

-Vitesse de circulation de l'air : ne doit pas dépasser 0.25m/s à 20°C.

- Exigences d'été :

En été (période de refroidissement), la température de l'air extérieur et la température réelle sont deux facteurs importants liés aux exigences : La température ambiante moyenne :

- **Climat tempéré** : 25°C à 27°C.

- **Climat sec et chaud** : 28°C à 30°C.

- **Courant d'air** : La vitesse d'air est limitée de 0.30 à 0.40m/s.

- **Température effective** : environ 26°C.[27]

Source de confort

L'inertie d'un bâtiment, en contribuant à atténuer les variations brusques de température dans les locaux, est source de confort : elle évite les surchauffes et les baisses de températures trop brutales. [28]

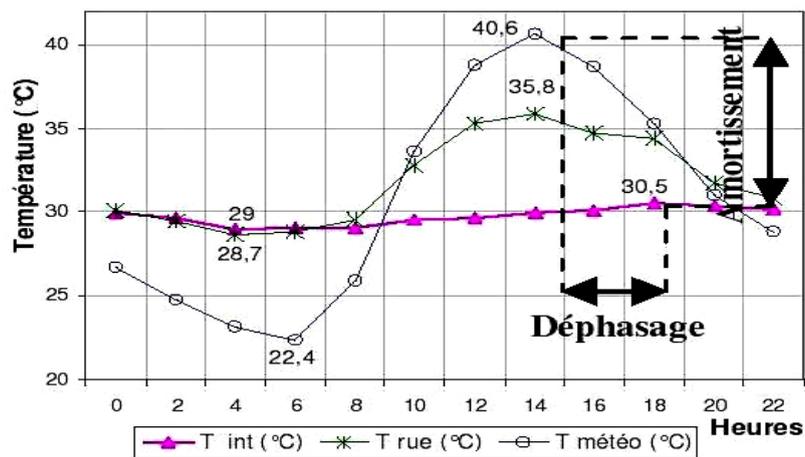


Figure 1-5: Variation de la température extérieure et intérieure

1.11 Actions de l'inertie thermique

EN HIVER :

En raison de l'inertie du bâtiment, le refroidissement des murs ralentira, de sorte que la température extérieure n'affectera pas l'intérieur et la chaleur emmagasinée par les murs pendant la journée sera récupérée la nuit.

EN ETE :

Le chauffage des murs va ralentir, donc la température extérieure n'affectera pas l'atmosphère intérieure, et la fraîcheur stockée par les murs la nuit refroidira la pièce pendant la journée.[29]

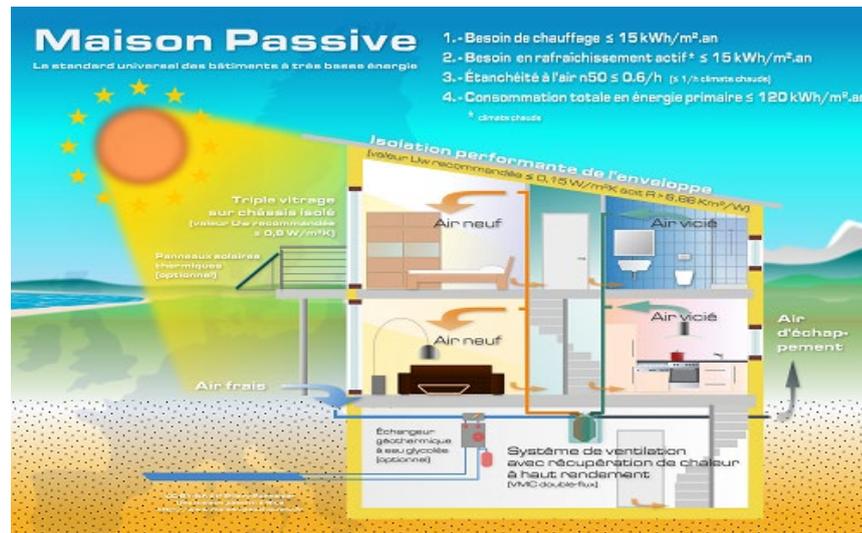


Figure 1-6: L'inertie dans une maison passive [29]

1.12 Conclusion

La problématique énergétique constitue un enjeu majeur dans le monde entier, Le secteur de du bâtiment est considéré comme un secteur fortement consommateur d'énergie et provocateurs de pollution par l'émission des gaz à effet de serre. Plusieurs pays, y compris l'Algérie, ont développé depuis quelques années des politiques de maîtrise et d'efficacité énergétique, ce qui permet l'évolution des enjeux environnementaux et la réduction de la consommation d'énergie dans la construction à travers l'application de ces politiques et les différentes réglementations cadrent mises en place. Nous devons retenir de ce chapitre qu'une meilleure efficacité énergétique des bâtiments vient par la maîtrise de la consommation et la rationalisation de

l'exploitation des sources d'énergie ainsi que leur remplacement progressif par des énergies renouvelables.

En conclusion, nous pouvons déduire que le confort thermique est un élément essentiel du bien-être de l'utilisateur dans son environnement bâti. En tenir compte à la maison, il y a plusieurs aspects à considérer. Les paramètres qui affectent le confort thermique peuvent être divisés en deux types : les paramètres physiques (tels que la température de l'air, la vitesse de l'air, etc.) et les paramètres personnels (tels que les vêtements, l'activité). L'homme est un homéotherme, il doit maintenir sa température interne proche de 37C, l'adaptation à chaque environnement nécessite des réponses physiologiques, comportementales et parfois techniques pour assurer un équilibre entre le corps et l'environnement. Aussi, L'augmentation du coût de l'énergie nous a rappelé que son entretien l'était tout autant. Par conséquent, la prise en compte du coefficient thermique lors de la conception des bâtiments est désormais un défi à relever pour trouver le bon compromis entre confort thermique et dépense énergétique.

CHAPITRE 2 :

Mur trombe et chauffage dans un habitas

2.1 Introduction :

En effet, l'Algérie est l'un des pays de la mer Méditerranée qui dispose d'un potentiel énergétique solaire très élevé. Selon les données d'ensoleillement, l'Algérie est comptée parmi les pays les plus ensoleillés dans le monde. Le potentiel des ressources solaires de ce pays est optimal pour l'exécution des projets solaires.

Les lois physiques gouvernant les différentes filières solaires ont été établies il y a plus d'un siècle et demi. Mais l'histoire de l'énergie solaire a connu une accélération importante à la suite de la crise pétrolière de 1973. Les progrès récents de la conversion thermique tiennent plus à la disponibilité de nouveaux matériaux performant (revêtement sélectif, verre flotté...) et des systèmes de pilotage par ordinateur qu'à l'apparition des nouveaux concepts.[30]

Tandis que les pays industrialisés disposent, grâce à leur puissance économique et financière, de sources d'énergie dites conventionnelles, comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel, auxquelles s'ajoute le nucléaire. L'une des principales sources d'énergies des pays en voie de développement est le bois, 75% de la demande en énergie pour le besoin des ménages dans certains pays africains proviennent de cette matière. Or, l'utilisation du feu de bois crée de graves problèmes écologiques régionaux car beaucoup de régions fertiles et verdoyantes jadis, sont devenues au jour d'hui des terres arides. Le déboisement en est la principale cause. Le paysan africain consacre une partie de sa vie à chercher ce combustible, alors qu'il a à sa disposition, une source d'énergie inépuisable : l'énergie solaire. Pour la plupart des pays africains, les hydrocarbures et l'électricité coûtent cher. Souvent, cette énergie est importée en échange de devises fortes ; devises qu'il faut d'abord posséder et qui serviraient plus efficacement à développer d'autres secteurs de l'économie nationale.

L'évolution rapide du coût de l'énergie jointe au fait que les sources d'énergie fossiles traditionnelles non renouvelables sont amenées à s'épuiser, a stimulé l'intérêt d'utiliser des sources d'énergie inépuisables dans la force du vent et le rayonnement solaire.

De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été consacrées depuis un certain temps aux problèmes de l'utilisation de l'énergie solaire. Parmi ces études, celles qui concernent le chauffage des habitations apparaissent comme les plus prometteuses, étant donné que les températures requises sont modérées.

En général, les systèmes de chauffage proposés sont compliqués et coûteux de fait de la préoccupation de leurs réalisateurs de les rendre complètement autonomes, c'est-à-dire de chauffer les maisons sans recours à une source auxiliaire d'énergie d'appoint durant les périodes d'insuffisance solaire.

Ces systèmes se divisent en deux grandes catégories : les systèmes actifs et les systèmes passifs. Parmi ces derniers, celui qui a été développé en France, par le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) apparaît comme un des plus intéressants étant donné la simplicité de la solution proposée. [31]

Dans ce deuxième chapitre 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 (France) par le Professeur Trombe.

2.2 Schémas de principe du mur trombe

2.2.1 Définition de mur trombe :

Le mur trombe est un système de chauffage simple, mais ingénieux qui utilise l'énergie solaire. Il s'agit donc d'un mur plein, la plupart du temps en béton, idéalement exposé au sud pour profiter au maximum des rayons du soleil de la journée. Sur la face extérieure de ce mur, le plus souvent de couleur sombre, on va placer un vitrage. Entre les deux, se loge une couche d'air. Pendant la journée, la lumière du soleil va facilement traverser le verre puis être absorbée par le mur. Les infrarouges réémis par le mur ne pourront pas retraverser le verre et resteront coincés dans la couche d'air présente entre la vitre et le mur. De cette manière, l'air chaud s'accumule avant d'être diffusé dans la maison pour la chauffer.

2.2.2 Principe de fonctionnement du mur trombe :

Répondant à certaines exigences de construction, le mur trombe est capable de restituer la chaleur accumulée durant la journée.

2.2.3 Comment fonctionne un mur trombe

Un mur trombe, c'est un double vitrage extérieur installé sur un mur en béton, en brique ou en pierre à forte inertie. Certaines déclinaisons du mur trombe utilisent quant à elle le bois ou encore le métal. Pendant la journée, les rayons du soleil viennent chauffer une lame d'air située dans l'espace qui réside entre les deux. En haut et en bas de la paroi, des ouvertures rendent possible la circulation de l'air. Durant la nuit, l'air chaud est distribué dans le bâti par les ouvertures placées en haut. Une fois rafraîchi l'air ressort par les orifices inférieurs. Si une période sans soleil est observée, les échanges d'air peuvent s'inverser et ainsi refroidir la pièce. Pour éviter ce problème, des clapets sont installés sur les ouvertures pour interrompre la circulation de l'air en cas de besoin.

2.2.4 Comment conçu un mur trombe

L'efficacité d'un mur trombe tient au respect d'un certain nombre de normes de conception. Il est composé de la manière suivante en partant de l'extérieur vers l'intérieur :

- **Le vitrage** premier élément constitutif du mur trombe, la vitre doit permettre le passage de la chaleur du soleil sans en freiner la circulation. Utiliser des doubles vitrages à faible émissivité permettra d'augmenter significativement l'efficacité du mur. Pour garder l'énergie calorifique à l'intérieur du bâtiment pendant la nuit, l'installation de volets roulants fortement conseillée.

- **L'espace entre le mur et le vitrage :**

L'espace entre le mur et le vitrage est aussi déterminant. C'est dans cet espace que l'air chauffe que le phénomène d'effet de serre se crée. Une distance minimum de 10 cm doit être observée pour un système efficace et la moyenne tourne autour d'une quinzaine de centimètres

- **Le mur, l'autre élément décisif**

Le mur est l'autre élément constitutif essentiel du mur trombe. Sa fonction étant d'emmagasiner le plus de chaleur possible pour ensuite en resauter le plus possible, il est de préférence plein et sombre. La pierre et le béton sont privilégiés, mais on évite l'utilisation de parpaings creux.

L'épaisseur du mur doit être envisagée en fonction du matériau utilisé et du temps d'ensoleillement dont est possible de bénéficier en hiver.

2.2.5 La bonne épaisseur d'un mur trombe

L'épaisseur optimale l'épaisseur optimale dépend du matériau utilisé et du temps d'ensoleillement disponible en hiver. Si le mur est trop épais, il risque de ne pas pouvoir se réchauffer suffisamment en profondeur durant une journée d'hiver ensoleillée, ou la durée d'ensoleillement efficace ne dépasse pas 5 heures.

Un mur avec 20 à 30 cm d'épaisseur est une valeur correcte pour un matériau comme le béton.

2.3 Mur trombe : tirer parti des saisons

De plus en plus utilisé en architecture bioclimatique, il est possible d'adapter l'usage du mur trombe aux différentes saisons.

2.3.1 En hiver pour chauffer l'intérieur

L'hiver le mur trombe a pour fonction de chauffer l'air extérieur. Le concept utilise pour cela le principe du thermosiphon. L'air emprisonné entre la surface vitrée et la paroi maçonnée va grimper en température par effet de serre. L'air chaud moins dense et donc plus léger va alors monter provoquant de fait l'aspiration, au niveau des ouvertures présentes en bas de paroi d'air plus frais venant de l'intérieur.

L'air chaud sera quant à lui diffusé au sein de la maison par une ouverture située en haut de la paroi.

2.3.2 En été pour rafraîchir la maison

Si le mur trombe permet de chauffer l'intérieur en hiver, il peut également rafraîchir l'atmosphère d'un bâtiment en été lorsqu'il est équipé de vannes de circulation d'air. Pour cela l'entrée d'air située en bas du capteur doit être branchée à une prise d'air placée en haut de la maison. L'air chaud sera ensuite immédiatement évacué à l'extérieur et l'air frais cumulé la nuit pourra, toujours grâce au phénomène de thermosiphon, entrer dans le logement. [32]



Figure 2-1: Installation du mur trombe avec brique et architecture écologique [33]

Systèmes de stockage passif

Si le système de chauffage nécessite des pièces mobiles (ventilateur, pompe, électrovanne...) on parlera de système actif. Un tel système nécessite une énergie autre que solaire ; en générale celle-ci est électrique vu sa souplesse d'utilisation.

Quand la seule énergie utilisée est celle du soleil, on parle du système passif [34].

Pour le chauffage d'habitation, le fluide caloporteur est soit l'air, soit l'eau se passe facilement d'énergie auxiliaire pour le mouvoir. L'air est chauffé par les capteurs puis envoyé directement dans les pièces d'habitation. Le stockage de l'énergie se fait alors par léchage d'un matériau solide (mur en béton, lit de pierres...). Il peut cependant être intéressant de recevoir à des ventilateurs pour créer une circulation forcée ; les puissances mises en jeu sont toujours faibles, de l'ordre de celles nécessaires au fonctionnement d'une VMC (ventilation Mécanique Contrôlée).

L'utilisation de l'eau nécessite à un échangeur. Son avantage réside dans le volume de stockage nécessaire, beaucoup plus faible qu'avec l'air¹. Dans ce cas on trouvera sur le circuit, une ou plusieurs pompes (calculateurs), des électrovannes, etc.

Dans les paragraphes suivants on s'intéresse plus particulièrement aux différents types

de stockages [34] :

-ballon d'eau

-lit de pierres

-Mur porteur

a. Stockage par ballon d'eau :

Le schéma de principe d'une telle installation est donné à la figure 1.1. Les capteurs solaires chauffent l'eau du stockage par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Cette disposition permet de traiter l'eau qui circule dans les capteurs. Un appoint est souvent nécessaire sous nos latitudes [34].

Quant à l'échangeur stockage-habitation il doit avoir une surface le plus grand possible afin de minimiser l'écart de température entre l'eau à T_{st} provenant du ballon de stockage et l'air à T_i de la maison. Chauffer à basse température améliore le confort. D'autre part le rendement des capteurs est d'autant meilleur que l'écart de température ($T_{fe}-T_a$) entre la température de l'eau à l'entrée des capteurs et celle de l'air extérieur est faible. Or en première approximation $T_{fe}\approx T_{st}$ il faut donc avoir T_{st} la plus basse possible. La gestion de l'énergie doit favoriser le solaire. L'appel à une énergie d'appoint devant être minimisé. Le stockage sert de tampon journalier et permet de fournir la nuit le surplus d'énergie solaire stockée, le cas échéant, durant la journée. Accroître le volume de l'eau du stockage permet de diminuer la température maximale T_{smax} atteinte par l'eau durant une journée très ensoleillée et donc, comme on vient de le voir, d'améliorer le rendement des capteurs. La température T_{st} de l'eau du stockage doit cependant être supérieure ou égale à une température minimale T_{smin} qui permet de transmettre convenablement la chaleur de l'échangeur à l'air de la maison à T_i . Mais augmenter le volume prend de la place et coûte plus cher. Par contre, le diminuer peut entraîner une température de stockage trop grande. Pour conserver un bon rendement des capteurs solaires, cette température ne doit pas dépasser une valeur T_{smax} (70° par exemple). Dans certains configures, on peut être amené à rejeter une partie de l'énergie solaire

quine peut être stockée.



Figure 2-2 : Image2 d'un mur du l'extraordinaire de l'eau : le mur capteur et le clos des hautes

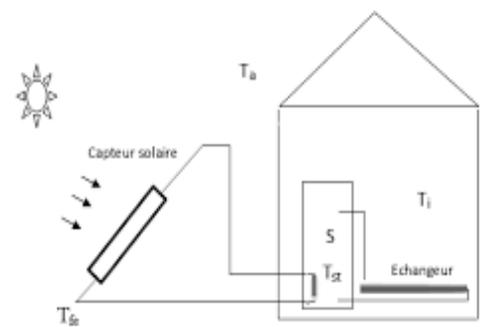


Figure 2-3: Installation par ballon d'eau

b. **Stockage par lit de galets :**

Le problème principal du chauffage solaire à air réside dans le stockage de l'énergie en provenance des capteurs mais aussi de la restitution de cette énergie. Le plus souvent c'est une masse importante de matériau solide qui va emmagasiner la chaleur.



Figure 2-4: Mur en galet hourdé [35]

Pendant une journée ensoleillée, on chauffe la maison grâce à l'énergie apportée par les capteurs solaires. Si celle-ci est supérieure aux besoins du moment, le surplus est stocké. Durant la nuit l'énergie est déstockée pour maintenir la température intérieure à une valeur acceptable.

Un système utilisé est le stockage par lit de galets. On fait circuler, dans un empilement de galets, de l'air préalablement chauffé dans des capteurs solaires. Il s'en suit une augmentation de la température des pierres est une diminution de celle de l'air qui retourne aux capteurs. Pour réchauffer l'habitation, il suffit de faire circuler l'air de la maison en sens contraire dans le lit de pierres pour récupérer l'énergie emmagasinée. Les surfaces d'échange étant élevées, les écarts de température fluide/galets sont faibles.

Les précautions à prendre dans la réalisation d'un tel système sont les suivantes :

- Les galets ne doivent pas être trop petits afin que la perméabilité du milieu n'entraîne pas des pertes de charge importantes. Les saisis ne doivent pas plus que la température intérieure. Pour cela on utilise des galets dont le diamètre moyen est de l'ordre de 3 cm.

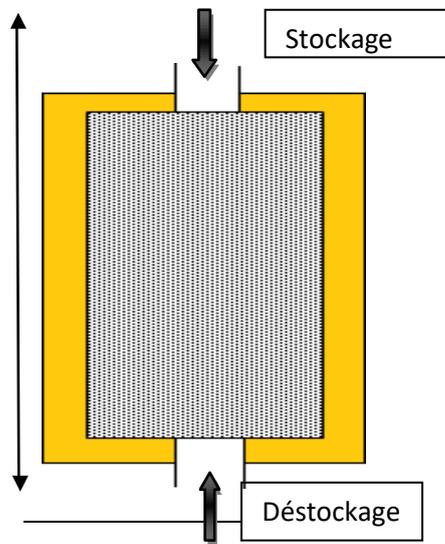


Figure 2-5: Schéma d'un lit de galets avec le sens d'écoulement de l'air en stockage et en déstockage

Le volume de stockage, qui devra être bien isolé, sera calculé pour que les températures atteintes ne soient pas trop fortes. En général une masse de 300 kg par m² de capteurs convient. La longueur L ne doit pas être trop.

Importante à cause des pertes de charge.

Les grandeurs habituelles vont de 1 à 3m.

-Quant au débit d'air qui circule dans les capteurs, un déstockage. Valeur de 40m³/h et par m² de capteur est raisonnable. On peut en visage de réduire ce débit lors du déstockage.

-Il faut éviter que l'air chaud envoyé au stockage ne soit trop chargé en humidité. Durant le déstockage, il y a une diminution de la température des galets. Si cette

dernière atteint la température du point de rosée de l'air, il y aura condensation de la vapeur d'eau et risque de prolifération de micro-organismes préjudiciables à la salubrité de l'air injecté dans la maison.

Le coefficient d'échange de chaleur entre les galets et l'air peut être caractérisé par un coefficient volumique, noté h_v (en $W/m^3 \cdot K$), dont une expression expérimentale a pu être donnée par Lof et Hawleyen 1948:

$$H_v = 650(\rho_f V) / (S D_g)$$

Avec :

ρ_f : volumique de l'air (kg/m^3)

V : débit volumique de l'air (m^3/s)

S : section droite du stockage (m^2)

D_g : diamètre moyen des galets (m)

c. Stockage par mur capteur :

Une autre possibilité de stockage de l'énergie solaire est d'utiliser la structure même de l'habitation, comme par exemple un mur en béton (figure .1.4). Un double vitrage orienté au sud crée un effet de serre. Le mur joue le rôle d'une cheminée. L'air de la maison y est aspiré ; il s'y réchauffe puis retourne dans la maison en partie haute du mur. Le mur s'échauffe durant le jour être situe la nuit la chaleur emmagasinée. Les pertes nocturnes peuvent être minimisées en déroulant devant la vitre un volet.

2.4 Maison Bioclimatique :

Une maison bioclimatique sous-entend une démarche respectueuse de l'environnement lors de sa construction, de son occupation mais aussi de sa déconstruction. On désigne cette démarche architecturale par l'expression Haute Qualité Environnementale (HQE). La future réglementation thermique, dénommée pour le moment RT2012, devant faire la part belle aux techniques bioclimatique



Figure 2-6: De la maison bioclimatique [36]

Nous nous limiterons dans ce qui suit à la période correspondant à l'occupation des locaux. L'objectif de la démarche est de réduire autant que possible la consommation énergétique tout en offrant aux occupants un confort acceptable.

On a souvent opposé confort et écologie ; en fait les deux sont compatibles si le projet est mené avec rationalité.

Le climat est le facteur déterminant dans les études dimensionnelles et d'orientation de la maison. Dans ce qui suit on s'intéresse plus particulièrement aux habitations situées en Europe de l'ouest ce qui correspond aux latitudes tempérées de l'hémisphère nord.

La réalisation d'une maison bioclimatique fait intervenir des techniques très anciennes et d'autres plus récents. On peut distinguer les techniques passives qui consistent à définir l'implantation, la forme du bâtiment, l'isolation et la nature des matériaux de construction, des techniques dynamiques qui font appel à une énergie extérieure (le plus souvent électronique) pour faire circuler les fluides.[37]

2.4.1 Les techniques passives :

En un site (latitude, longitude, altitude, orientation du terrain) il faut recueillir le maximum d'informations climatique :

- Température de l'air ambiant T_a
- Température de l'eau du réseau T_0
- Humidité relative φ
- Pluviométrie : hauteurs d'eau mensuelles, écoulement des eaux de pluie
- Aérologie : force et direction des vents dominants
- Ensoleillement : éclairement $G_{h\acute{e}t}$ durée d'insolation dd , ainsi que les facteurs mensuels d'éclairement σ et d'irradiation e .

La forme du bâtiment est importante car les pertes thermiques sont proportionnelles à l'enveloppe du bâtiment. Lorsque l'habitation est entièrement à réaliser on peut réfléchir sur la forme extérieure à donner au bâtiment. Pour un volume intérieur fixé, minimiser les surfaces extérieures revient à dessiner une habitation...sphérique ! La nature avait imaginé cette solution bien avant les architectes ; il suffit de regarder les œufs des oiseaux ; leur sphéricité minimise les déperditions calorifiques pour un volume donné. L'igloo hémisphérique des esquimaux se rapproche de la forme idéale. Cette forme sphérique étant difficilement compatible avec le mode de vie habituel tel qu'on le conçoit sous nos latitudes, on peut alors imaginer un habitat cylindrique ; c'est l'atour du château, le corps du moulin à vent...mais il n'en reste pas moins difficile de meubler des pièces aux parois courbes.

On peut caractériser la compacité de la construction par le rapport entre la surface habitable et la surface de l'enveloppe.



Figure 2-7: Compacité d'une maison en fonction de sa forme, pour une même surface de Plancher (120m²) [34].

L'implantation du bâtiment est fondamentale et doit être choisie en fonction des informations climatiques que l'on possède.

Pour récupérer au mieux l'énergie solaire, lors des périodes froides, il faut placer un maximum de parois vitrées face aux sud, telles que fenêtres (en générale pour les pays froid), portes vitrées, Bow-windows, oriels (dans le cas d'immeubles) ...ce qui a, en plus, l'avantage de fournir un éclairage naturel des pièces à vivre.

Pour minimiser les déperditions par les parois non ensoleillées, on peut envisager d'adosser la façade nord à un talus artificiel ou bien d'utiliser la pente naturelle si le terrain est sur la face sud d'une colline.

Dans tous les cas d'implantation, il faut étudier avec attention les effets de masque éventuels dus à la présence d'autres habitations, d'arbres ses feuilles persistantes, ou bien à cause du relief.

L'isolation doit être poussée au maximum. L'hiver, les déperditions sont ainsi minimales tandis que l'été la fraîcheur intérieure peut être conservé.

Les menuiseries doivent posséder un double vitrage et être en matériau isolant (bois, PVC) ou bien en aluminium avec rupture des ponts thermiques.

En hiver la mise en place de volets dès que le soleil est couché permet de diminuer les déperditions par les surfaces vitrées.

L'été ces mêmes volets peuvent servir à réduire l'entrée directe du soleil toujours pour se protéger de l'ensoleillement direct on peut installer des stores ou bien construire un balcon ou un avant toit, dont les démentions seront déterminées en utilisant par exemple le diagramme solaire.

On peut aussi planter des arbres à feuilles caduques au sud : en hiver les

rayons du soleil passent entre les branches nues lorsqu'en été ils sont piégés par le feuillage.

Attention à ne pas oublier de réaliser une bonne aération car une maison bien isolée est aussi une maison hermétique qu'il est absolument nécessaire de bien ventiler afin d'éviter des problèmes d'accumulation de l'humidité générée par la respiration humaine (50g/h environ) et par les appareils de chauffage et de cuisson à flammes.

La construction, au sud, d'une serre ou d'une véranda, favorise la captation de l'énergie solaire en période froide tout en créant un espace tampon qui accroît l'isolation effective de l'habitation. En partie nord de celle-ci il est judicieux de renforcer l'isolation thermique et de prévoir d'autres espaces tampons (cellier, garage, débarras...).

Réaliser une isolation extérieure de l'habitation évite les ponts thermiques au droit des planchers. Cette technique est évidemment plus intéressante pour les immeubles à plusieurs étages. L'inconvénient est de présenter aux intempéries des matériaux qui sont souvent fragiles (polyuréthane, polystyrène, laine de roche...) et qui supportent mal les revêtements en ciment(crépi) [34].

Il faut aussi savoir se protéger du vent. Celui-ci est une composante non négligeable dans l'étude des déperditions thermiques par convection forcée.

La meilleure des solutions est sans conteste de chercher à diminuer les surfaces soumises aux vents n'accroissant la compacité du logement.

On peut aussi cacher au vent certains partis des parois extérieures de la maison. L'éclairage naturel devra alors se faire en toiture.

Toujours pour se protéger du vent, on peut envisager la plantation d'une haie ou d'arbres à feuilles persistantes, la construction d'un mur ou bien l'édification d'une butte de terre.

Une maison bioclimatique sera construite avec des matériaux naturels tel que le bois, le chanvre, la brique crue, ... matériaux qui respirent, ce qui permet une régulation de l'humidité du logements sans installation technique coûteuse.

Des mur sa forte capacité calorifique, par exemple en pierre ou en béton, créent une inertie thermique favorisant un meilleur confort thermique. La chaleur solaire accumulée pendant la journée est restituée durant la nuit [34].

Certaines des remarques précédentes sont reportées sur la figure ci-dessous.

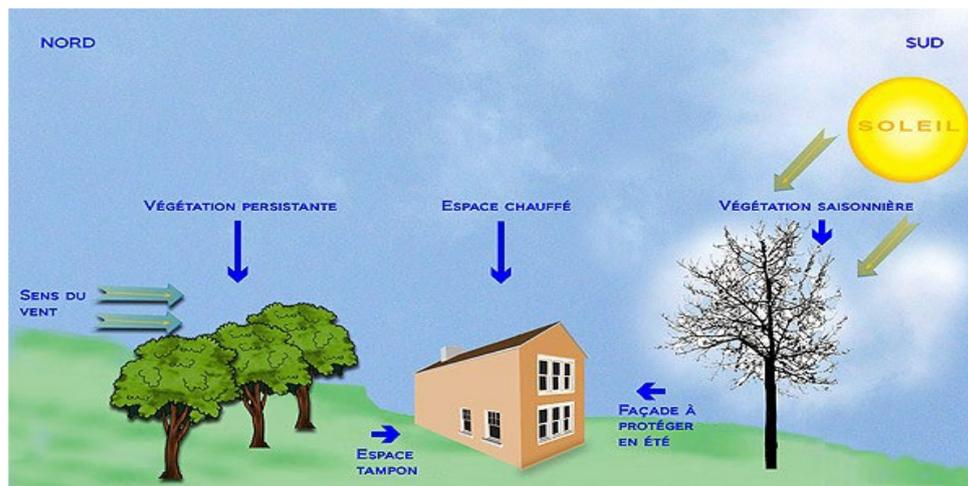


Figure 2-8: Schéma d'une habitation bioclimatique.

2.4.2 Les techniques dynamiques :

Il est pratiquement impossible sous nos latitudes de subvenir aux besoins énergétiques d'une maison en utilisant la seule énergie solaire passive. La mise en mouvement des fluides (air et eau) par thermosiphon ou convection naturelle n'est, le plus souvent, pas suffisante pour respecter les débits nécessaires. Les techniques à mettre en place sont alors dites dynamiques puisqu'il faut une machine tournante, ventilateur ou pompe, pour faire circuler ces fluides.

En hiver. Ces fluides qui sortent de l'enceinte du bâtiment, ont la plupart du temps une température qui est supérieure à la température ambiante extérieure. De la chaleur sensible est évacuée et donc perdue. Il est possible d'entrecouper une partie au moyen d'échangeurs de chaleur.

Considérons le cas du renouvellement de l'air. Celui-ci est absolument nécessaire pour une bonne hygiène de vie (teneur en CO₂, hygrométrie, odeurs). L'air vicié évacué se trouve à la température T_i de la maison. En hiver cet air est plus chaud que l'air frais à T_a qui vient le remplacer ; il y a perte de calories. Pour un débit V_a d'air échangé, la puissance perdue Q_{air} s'écrit :

$$Q_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} * V_{\text{air}} * C_{p_{\text{air}}} * (T_i - T_a) \dots\dots\dots (2.1)$$

T_i : température intérieure

T_a : température ambiante

C_{p_{air}} : capacité calorifique de l'air

ρ_{air} : la masse volumiques (kg /v²)

V_{air} : Le débit de l'air

Où ρ_{air} représenté la masse volumique de l'air et C_{pa} sa chaleur massique.

Une ventilation mécanique contrôlée (VMC) permet d'optimiser le débit d'air évacué. Si de plus celle-ci comporte un échangeur de chaleur entre l'air sortant et l'air entrant, on réalise une économie d'énergie non négligeable : c'est la VMC double flux.

3le seul souci de ce type d'installation est le risque de condensation au niveau de l'échangeur ; en effet l'air chaud est chargé en humidité et si sa température, en baissant au contact de l'air frais, atteint celle du point de rosée, il y a condensation d'une partie de la vapeur d'eau ; il faut alors évacuer cette eau pour éviter les phénomènes de corrosion net de prolifération de micro-organismes.

Une autre source de fuites thermiques est constituée par les eaux ménagères (ou eau grise). Celles-ci, contrairement à l'air, n'ayant pas un débit continu, on peut concevoir la récupération des calories par un échangeur eaux ménagères/eau du réseau, situé dans un ballon de pré chauffage. [34]

2.5 Description du système de chauffage par mur TROMBE :

L'utilisation de l'énergie solaire dans le domaine de l'habitat pour réduire sa consommation énergétique a fait l'objet de plusieurs études. Une technique de chauffage se basant sur un système de captation solaire, de stockage et de restitution de la chaleur a été développé par le C.N.R.S(France) par le Professeur Trombe. [37]

Le mur trombe est un système de chauffage qui utilise l'énergie solaire. Il est constitué d'un mur sombre orienté plein sud auquel on vient coller un vitrage pour profiter de l'effet de serre. Le mur ne doit pas être isolé pour permettre une bonne conduction vers l'intérieur de l'habitation, il est préférentiellement en pierre ou en béton lourd pour profiter de l'inertie thermique de ces matériaux. C'est un mur capteur qui comporte dans sa partie basse et dans sa partie haute des orifices de communication entre l'espace de vie et la lame d'air comprise entre vitrage et surface réceptrice. [38]

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

2.5.1 Fonctionnement de mur Trombe pendant le jour (période de chauffe) :

Pendant la période d'ensoleillement de la façade ; les orifices ménagés dans le mur rendent possible la distribution de la chaleur par thermocirculation : l'air intérieur entre par les orifices du bas du mur, se réchauffe au contact de la paroi (qui peut être portée à 65°C). Il élève et retourne dans le volume habitable par les orifices supérieurs. [38]

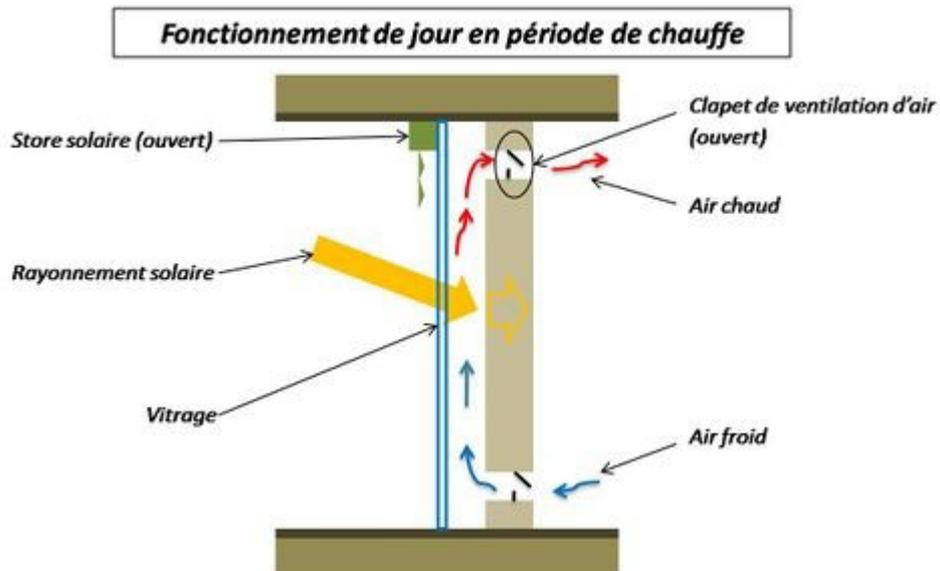


Figure 2-9: Fonctionnement de jour en période de chauffe.[38]

2.5.2 Fonctionnement de mur Trombe pendant la nuit :

Lorsque les besoins de chauffage instantanés n'ont plus lieu d'être ou lorsque le soleil ne chauffe plus la paroi, les orifices bas et haut sont refermés. La chaleur accumulée par le mur se transmet alors plusieurs heures après par rayonnement dans l'espace habitable... Le mur trombe fonctionne alors comme un mur capteur de base.

Les études et les mesures effectuées sur les premières maisons expérimentales utilisant le mur trombe ont montré que l'énergie solaire utilisée fournissait de 70% à 85% des besoins de chauffage sans aucune assistance mécanique. Aujourd'hui, avec des vitrages deux à trois fois plus performants, de tels résultats sont possibles sur des projets moins typés, avec des surfaces plus restreintes et plus variées. Pour une maison de 100m² au Solon peut espérer récupérer 175kWh/(m².an) à Paris.[38]

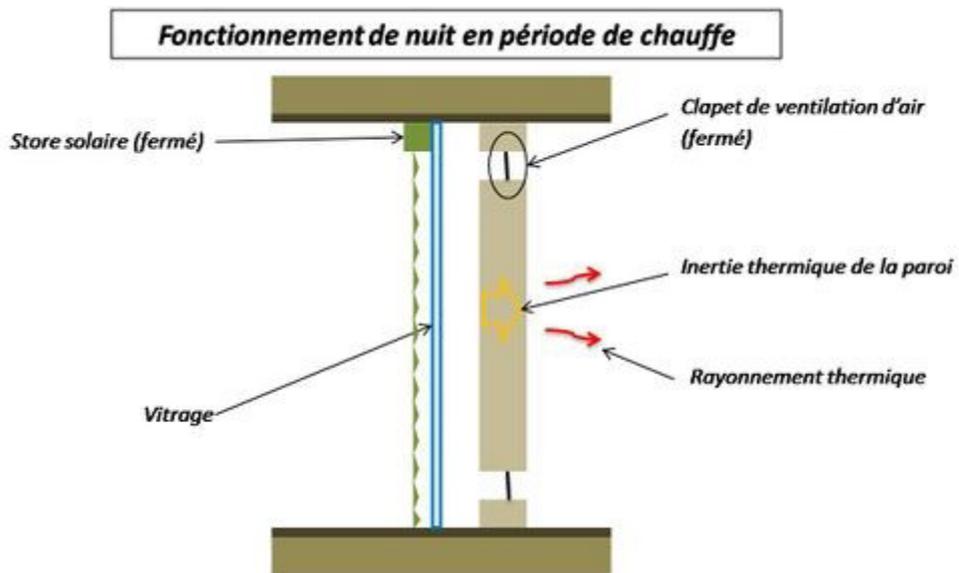


Figure 2-10 : Fonctionnement de nuit en période de chauffe

On 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 2.9 et la figure 2.10.

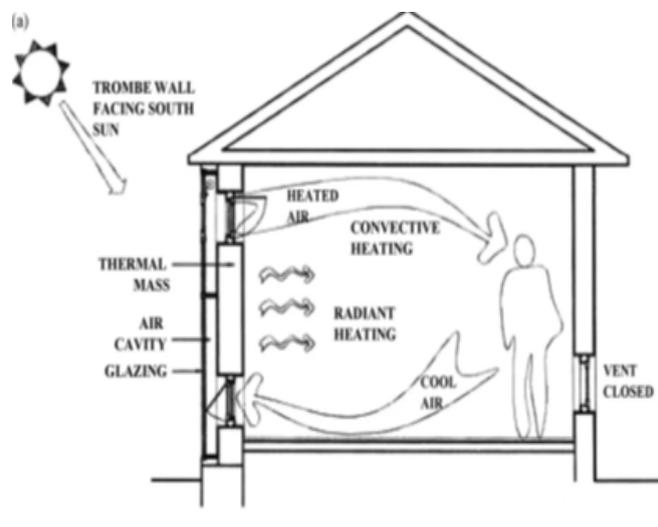


Figure 2-11: Fonctionnement Hiver

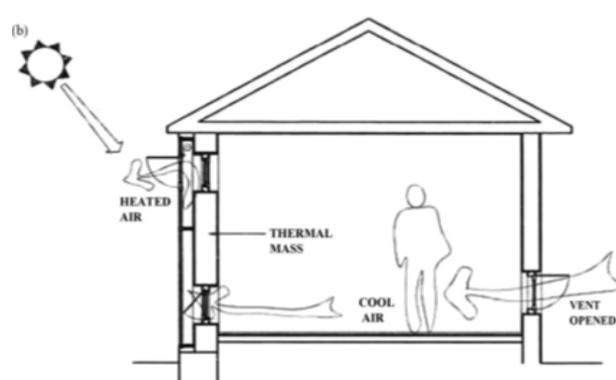


Figure 2-12: Fonctionnement d'été

2.5.3 Caractéristiques du vitrage et de la lame d'air

Le choix du vitrage demande un compromis entre résistance thermique et transmission de l'énergie solaire.

Un vitrage simple transmet mieux le rayonnement mais est plus déprédatif pendant les périodes non ensoleillées. Les vitrages peu émissifs sont intéressants, grâce à un film mince réfléchissant ils créent une barrière au rayonnement infrarouge venant de l'intérieur. On a donc moins de pertes par rayonnement dans la paroi.

2.6 Avantages et inconvénients

Comme tout système de chauffage, le mur trombe présente son lot d'avantages et d'inconvénients.

Une construction écologique qui permet de réaliser des économies :

Les avantages du mur trombe sont nombreux, parmi eux

- Le mur trombe permet de réaliser des économies sur ses factures énergétiques.
- Système de chauffage écologique, le mur trombe utilise le soleil, une source d'énergie renouvelable et propre pour son fonctionnement. Il ne produit qui plus est aucun gaz toxique ou à effets de serre.
- Le mur trombe n'est soumis à aucune réglementation
- Simple d'utilisation, le mur trombe ne nécessite pas, a moins de faire le choix de l'automatisation, l'installation de capteurs thermique.
- Les risques des pannes sont minimales.

Le mur trombe a aussi ses inconvénients

- Il faut bien l'avouer un mur trombe n'est pas très esthétique notamment du fait de sa couleur sombre difficile à intégrer dans une construction globale.
- Les contraintes liées à son exposition au sud et à un ensoleillement régulier ne facilitent pas son intégration dans un projet de construction ;
- Le mur trombe exempt d'ouverture peut priver l'intérieur d'un logement d'un apport de lumière naturelle.
- Le nettoyage du vitrage est compliqué. Cela est d'autre plus vrai pour la partie intérieure qui nécessite de démonter la vitre.
- Un mur Trombe peut difficilement pourvoir aux besoins en chauffage d'un logement. Dès lors, il est donc nécessaire de compléter son utilisation avec un autre mode de chauffage notamment pendant l'hiver.

- Bien que la construction d'un mur trombe n'ouvre droit à aucune aide financière.

2.7 Le cout d'un mur trombe

La technique étant encore peu répandue en France, l'estimation du cout de ce type d'ouvrage est difficile à faire. On peut néanmoins facilement statuer sur le fait qu'un mur trombe coutera logiquement plus cher qu'un mur classique pour les raisons suivantes :

- ✓ Une étude de faisabilité est indispensable avant tout projet.
- ✓ Les ouvrages doivent être réalisés sur mesure.
- ✓ Du fait de l'importance des surfaces, le cout du vitrage est aussi supérieur à un projet classique.
- ✓ Les professionnels pouvant intervenir sur ce genre de projet étant rares, les tarifs ont tendance à être élevés.[39]

2.8 Conclusion :

Le mur trombe est avant tout en système de chauffage ou de rafraichissement solaire, il faut absolument que le capteur soit isolé de la maison (pour éviter la surchauffe en été), et la déperdition la nuit. Son fonctionnement est principalement diurne, il s'utilisera donc bien pour les établissements ne fonctionnant pas la nuit (école, bureaux). Le nom de « mur » tient du fait que les capteurs sont placés de façon verticale contre le mur le plus ensoleillé (Nord dans l'hémisphère sud par exemple).

Ses principaux avantages, sont de prendre peu de place, une double conduite d'air sera par contre nécessaire, avec un système de vanne ou clapet, pour passer en mode rafraichissement ou chauffage.

Ce type de capteur pourrait être utilisé avec une VMC double flux par exemple, ou combiné à un autre système avec masse thermique, pour une utilisation nocturne.

Enfin, les nombres adimensionnels (Reynolds, Rayleigh, Prandtl constant pour l'air), les paramètres liés à la géométrie (facteur de forme, dimension des orifices l'épaisseur du mur trombe) et les paramètres liés à l'énergie (Rapport des conductivités thermique mur/air) sont des paramètres qui influent la convection thermique qu'elle soit naturelle, mixte ou forcé.[40]

CHAPITRE 3 : Simulation Numérique 3D De La Circulation D'Air Dans Un Mur Trombe

3.1 Introduction

Les bases de la mécanique des fluides sont résumées en insistant sur l'aspect énergétique, car l'ingénieur doit le plus souvent considérer des écoulements de fluides non isothermes. On s'est efforcé de présenter clairement l'unité des concepts qui concernent tous les fluides et dont l'application porte ici uniquement sur les fluides monophasiques newtoniens.

En dynamique des fluides, un écoulement turbulent est caractérisé par le mouvement irrégulier des particules (on peut dire chaotique) du fluide. Contrairement à l'écoulement laminaire, le fluide ne coule pas en couches parallèles, le mélange latéral est très élevé et il existe rupture entre les couches. La turbulence est également caractérisée par une recirculation, des remous et un caractère aléatoire apparent. Dans un écoulement turbulent, la vitesse du fluide en un point subit continuellement des changements d'amplitude et de direction.

3.1.1 Ecoulement laminaire

Un écoulement est dit laminaire lorsqu'il est régulier (qu'il ne présente pas des variations spatiales ou temporelles). Un fluide présentant une viscosité importante s'écoulera de façon laminaire.

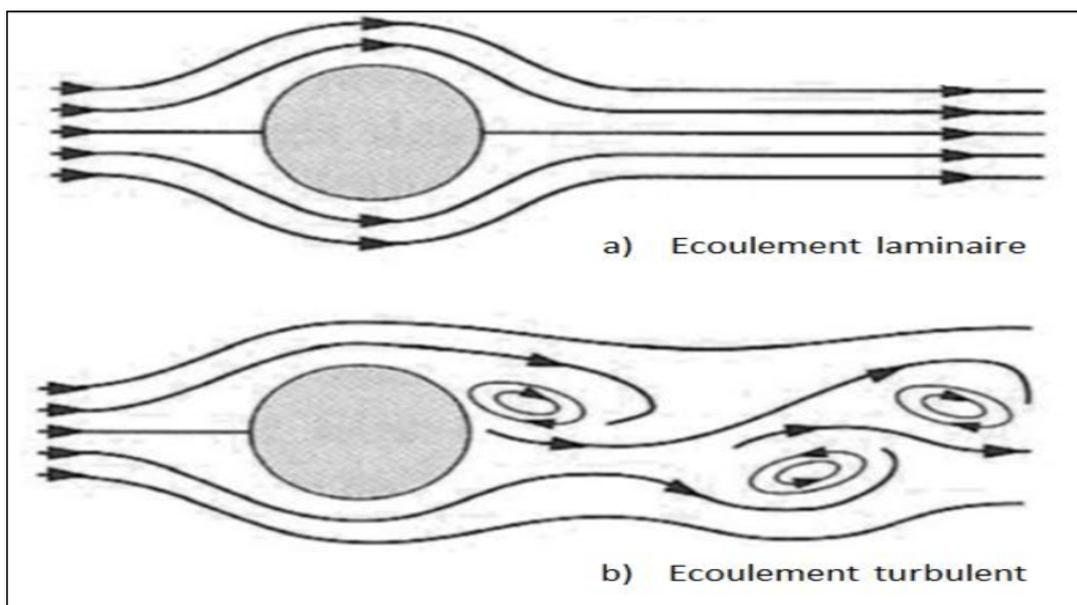


Figure 3. 1 : schématisation des écoulements laminaire et turbulent

3.1.2 Écoulement turbulent

La turbulence désigne l'état de l'écoulement d'un fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée. De tels écoulements apparaissent lorsque la source d'énergie cinétique qui met le fluide en mouvement est relativement intense devant les forces de viscosité que le fluide oppose pour se déplacer.

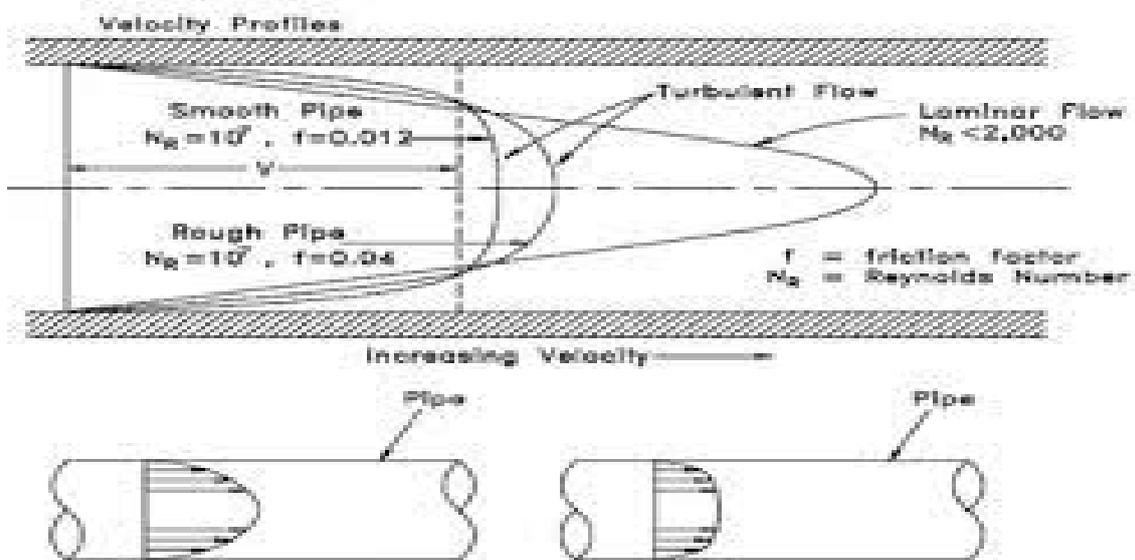


Figure 3-1: Profil de vitesse dans les écoulements turbulent et laminaire

- Le nombre de Reynolds (Re) aide à prédire les modèles d'écoulement dans différentes situations d'écoulement de fluide.

Dans ce cas pour des faibles nombres de Reynolds, les écoulements ont tendance à être dominés par un écoulement laminaire, tandis qu'à des nombres de Reynolds élevés, les écoulements ont tendance à être turbulents.

Le nombre de Reynolds est le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses dans un fluide qui est soumis à un mouvement interne relatif en raison de différences de vitesses de fluide (figure 3-2). [39]

3.2 Définition du problème

Nous considérons les géométries des trois modèles de mur trombe cannelé, avec une différence de nombre et volume de canaux d'un modèle à l'autre.

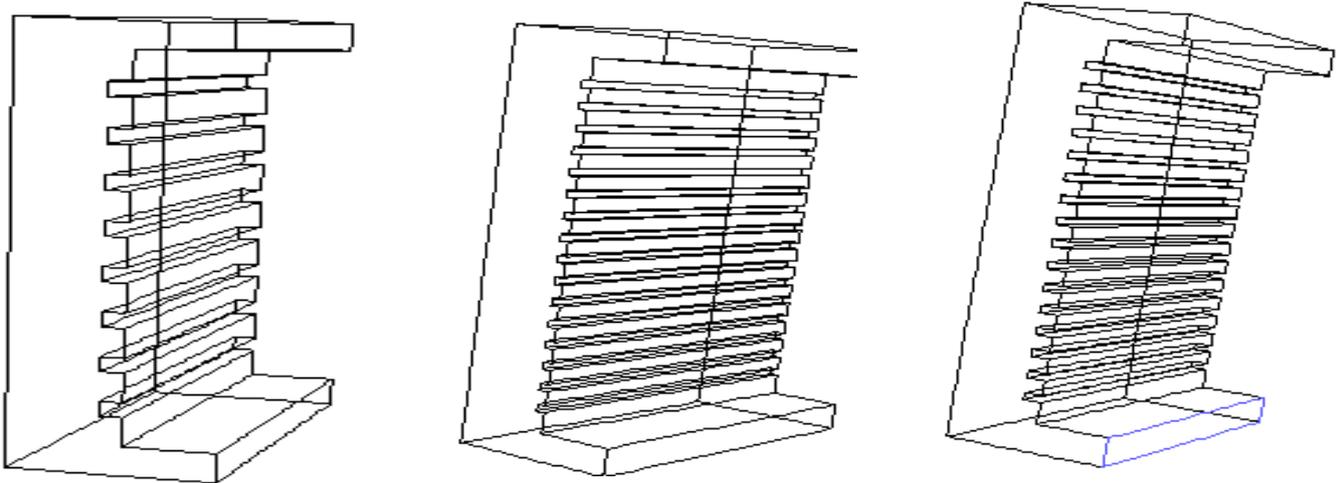


Figure 3-2: Les trois configurations de mur trombe

Hypothèses simplificatrices :

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

- Le fluide utilisé est un fluide newtonien, incompressible (l'air).
- L'écoulement de l'air est considéré stationnaire.
- Les propriétés de l'air sont considérées constantes.

3.3 Equations gouvernantes de l'écoulement

Les équations de Navier- Stokes pour un écoulement Incompressible :

- Equation de la conservation de la masse

$$\nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (3.1)$$

-Equation de la conservation de la quantité de mouvement

$$\rho [\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] \quad (3.2)$$

-Equation de la conservation de l'énergie.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{V} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.3)$$

3.4 Modélisation de la turbulence

Le modèle classique de turbulence k-epsilon de Launder et Spalding (1974) est un modèle dans lequel on suppose que les contraintes de Reynolds sont proportionnelles aux gradients de vitesse moyens, avec la viscosité turbulente.

Le modèle k-epsilon utilise deux équations, l'équation pour l'énergie cinétique turbulente k et l'équation pour l'énergie dissipation epsilon :

-La formulation de boussinesc pour un écoulement incompressible :

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (3.4)$$

La viscosité turbulente :

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\rho \overline{\left(u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon$$

$$\rho(\overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_T \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.5)$$

Les constantes empiriques pour le modèle k-Epsilon sont :

$$C_{\mu} = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3,$$

$$\sigma_T = 0.9$$

3.5 Conditions aux limites

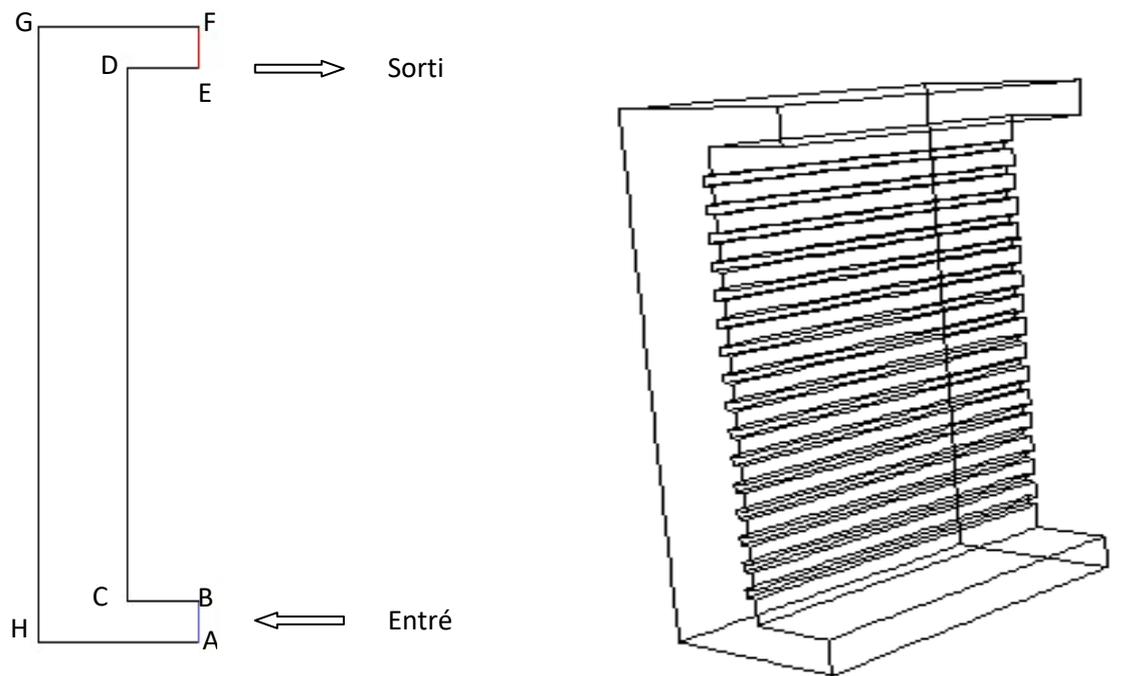


Figure 3-3: Conditions aux limites

A l'entrée

$$-v = 2 \text{ m/s} ; T_e = 293 \text{ K}$$

Au niveau des murs, condition $u=v=0$

- Paroi [bc] : adiabatique

- Paroi [cd] : Flux constant $\phi = 300 \text{ W/m}^2$

- Paroi [de] : adiabatique

- Paroi [gh] : Isotherme $T_i=273$ K

- Paroi [fg] : adiabatique.

- Paroi [ha] : adiabatique.

A la sortie

$P=Patm$

3.6 Simulation numérique

3.6.1 La méthode des volumes finis (MVF)

Les méthodes des volumes finis ont été initialement développées et mis au point pour des lois de conservation.

Pour les équations de Navier-Stokes incompressible, la méthode des volumes finis utilise un schéma semi-implicite en temps et une formulation Volumes Finis upwind pour le terme de convection linéarisé.

La méthode des volumes finis exploite directement les équations à résoudre.

L'équation au dérivée partielle est résolue de manière approchée à l'aide d'un maillage constitué de volumes finis.

La méthode des volumes finis est utilisée pour discrétiser la partie spatiale des lois de la conservation, la partie temporelle est quant à elle discrétisée.

Le nœud principal "P" est entouré par quatre nœuds voisins celui du Nord "N", celui du "S" (dans la direction y) et celui de l'Ouest "W" et celui de l'Est "E" (dans la direction x) . Les points (e : est, w : ouest, n : nord, s : sud).

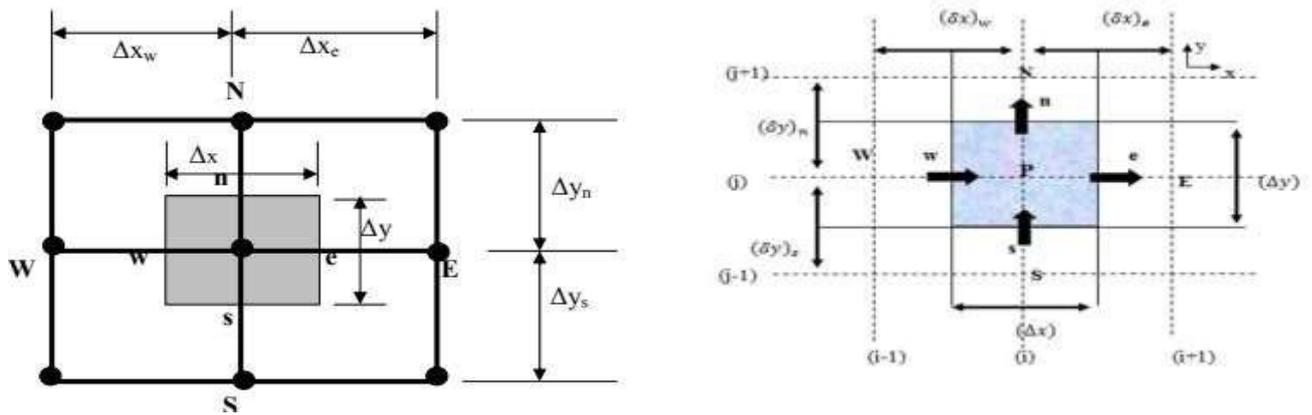


Figure 3-5 : Description bidimensionnel d'un volume fini

3.7 Présentation de Gambit et Fluent

3.7.1 Initiation au logiciel GAMBIT

GAMBIT est un mailleur 2D/3D ; préprocesseur qui permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. Il génère des fichiers *.msh pour Fluent.

Au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la limite du domaine de calcul, la définition des conditions aux limites appropriées peut se faire également à ce niveau. Il permet de créer plusieurs types de maillage basé sur des formes géométriques et de spécifier le type de matériau (fluide ou solide).

3.7.1.1 Démarrage de Gambit

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant: /Fluent.Inc/ntbin/ntx86/Gambit.exe.

Vous pouvez créer un raccourci dans la barre des tâches. S'il y a un problème d'exécution, supprimez tous les fichiers *.lok dans le répertoire : /Fluent.Inc/ntbin/ntx86 et relancez Gambit.exe.

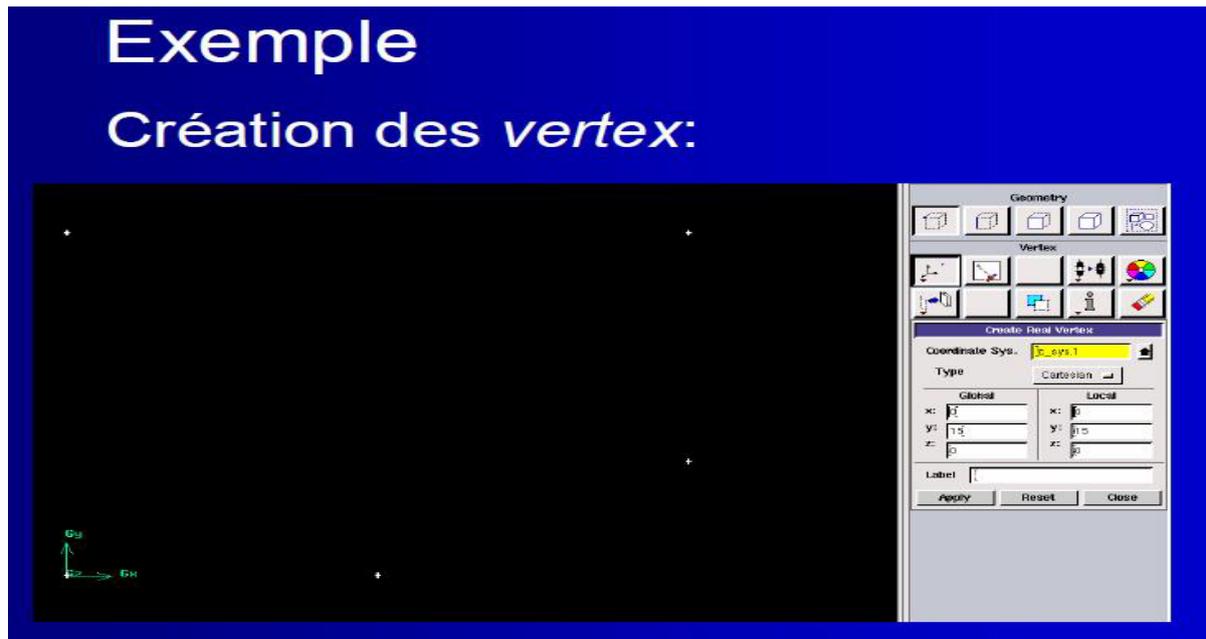


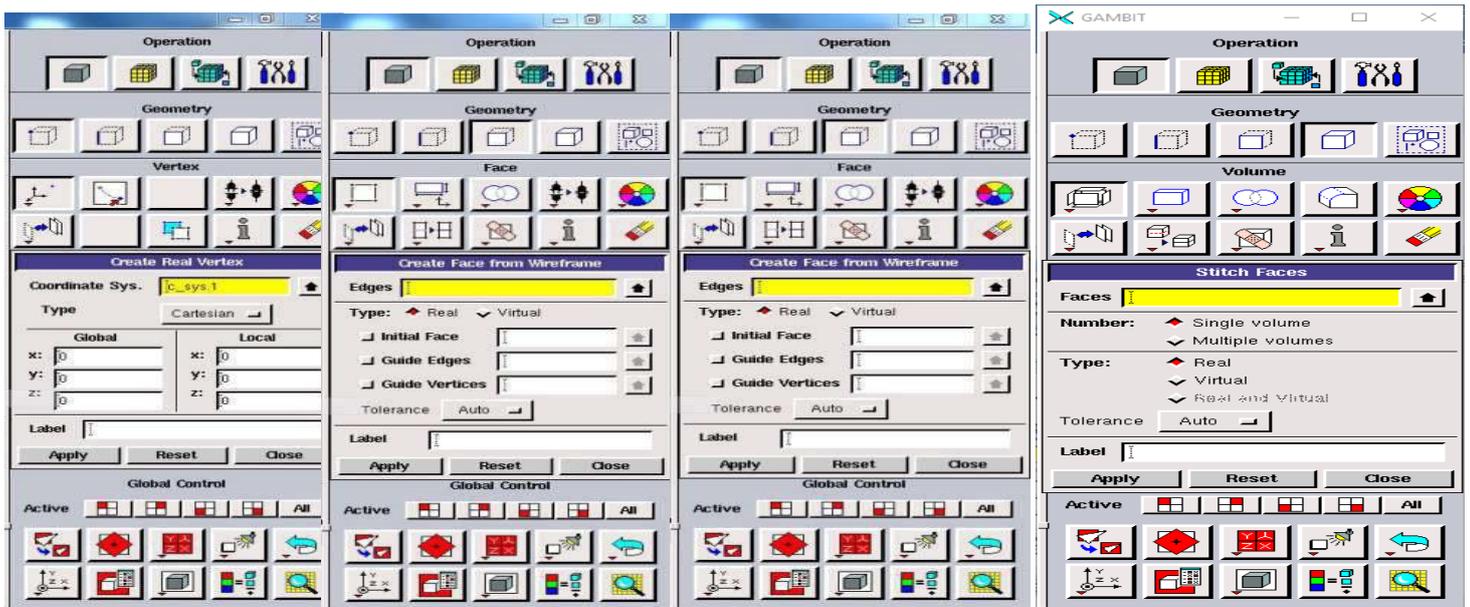
Figure 3-6: Lancement du Gambit

3.7.1.2 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 3.9) :

- 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.
- d) Création des volumes : créer les volumes limitées par les surfaces déjà créés.



Création des points

Création des lignes

Création des surfaces

Création des volumes

Figure 3-7: Réalisation de la géométrie sous GAMBIT

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

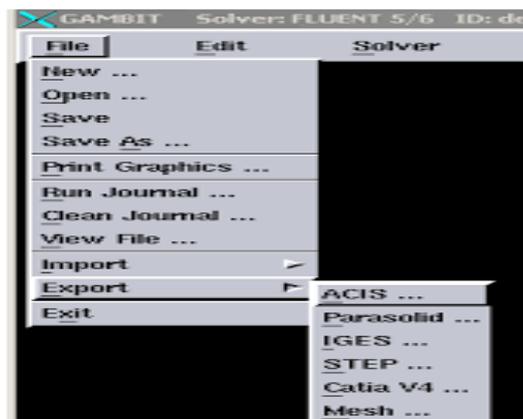


Figure 3-8: les opérations pour construire une géométrie

3.7.1.3 Réalisation du maillage

En tenu compte des paramètres sur la solution calculée, La génération du maillage (2D ou 3D) est une étape très importante dans l'analyse CFD. Ce menu permet particulièrement le maillage en une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions

particulières (utiliser des ratios pour modifier le poids du maillage et appliquer différentes formes de maillage).

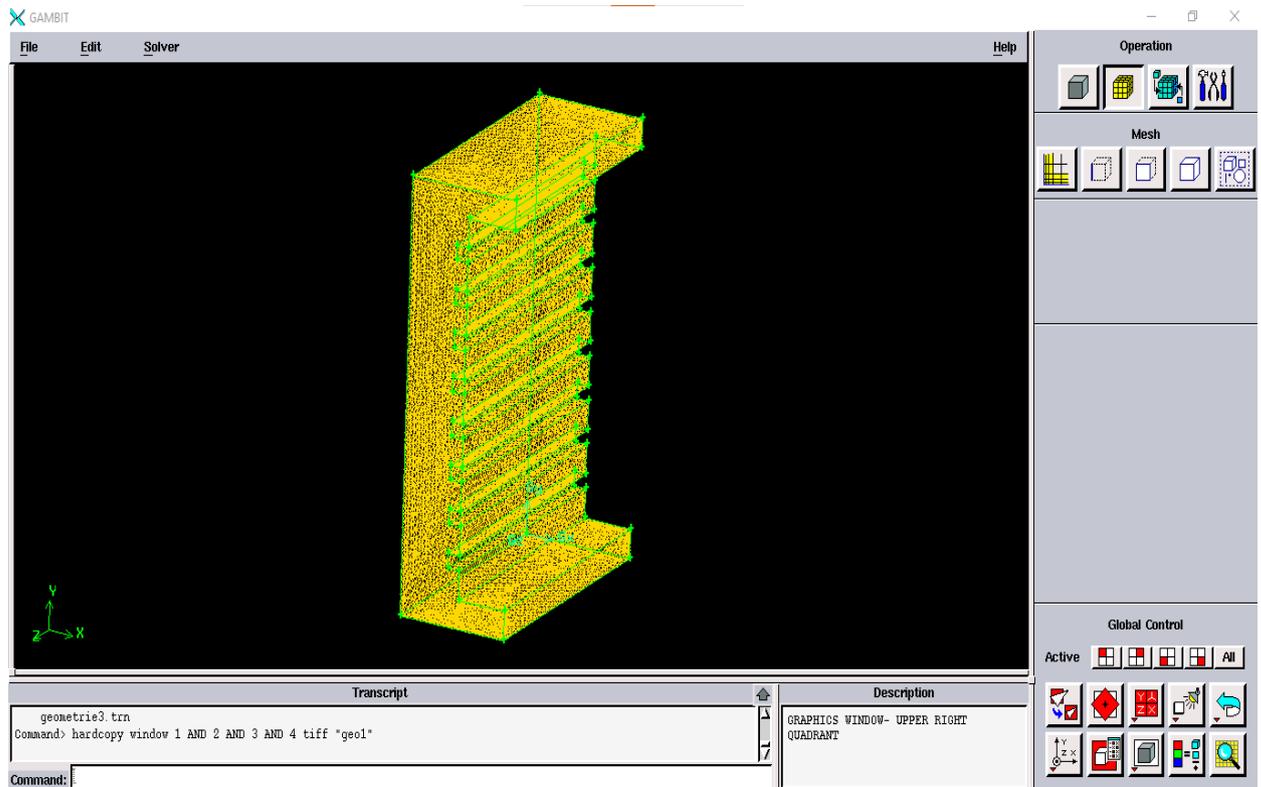


Figure 3-9: Maillage de la géométrie 1 Définition des frontières du mur trombe

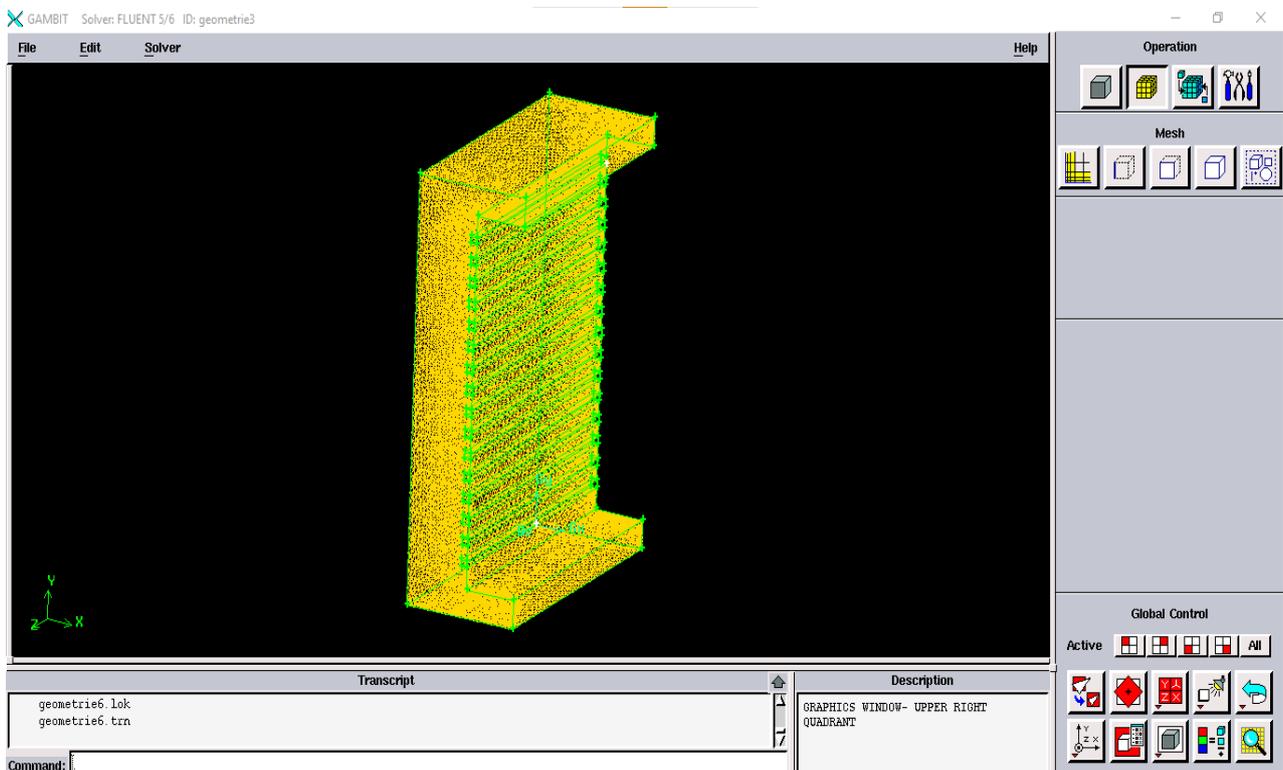


Figure 3-10: Maillage de la géométrie 2 Définition des frontières du mur trombe

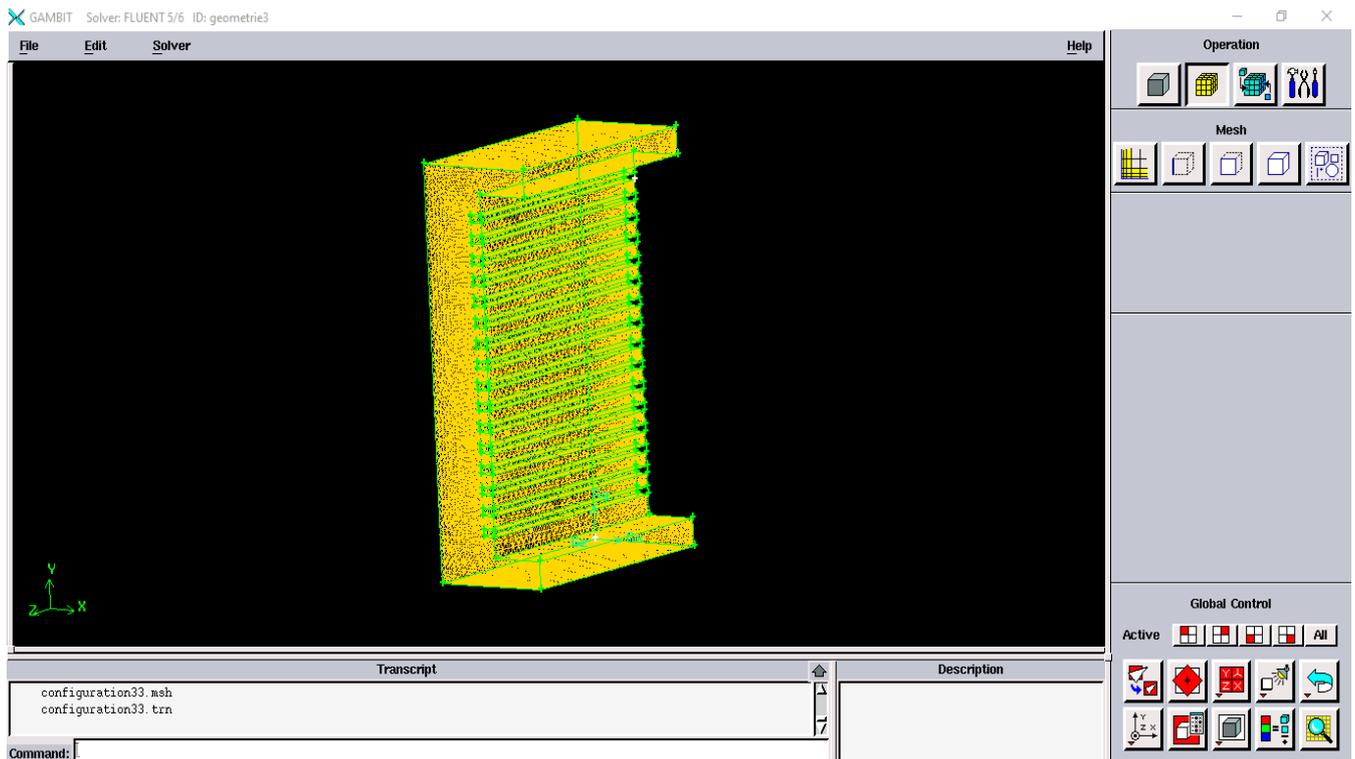


Figure 3-11: Maillage de la géométrie 3 Définition des frontières du mur trombe

3.7.1.4 Exportation du maillage

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

File → Export → Mesh

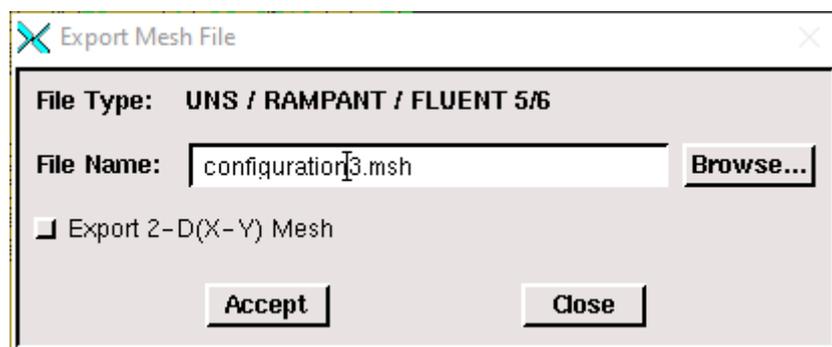


Figure 3-12: Exportation du maillage

3.7.2 Initiation au logiciel FLUENT

FLUENT est utilisé pour la simulation numérique et le résout des problèmes de mécanique des fluides et le transfert thermique grâce à la méthode des volumes finis. Il peut prédire l'écoulement des fluides en résolvant des équations de conservation basées sur la méthode des volumes finis. Ce logiciel est capable de simuler une large gamme d'écoulement de fluides dans des configurations très diverses (écoulement laminaire ou turbulent, régimes permanents ou variables, écoulement incompressibles et compressibles, écoulements externes et internes sans ou avec transfert de chaleur... etc.).

3.7.2.1 Importation de la géométrie

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

File → Read → Case...

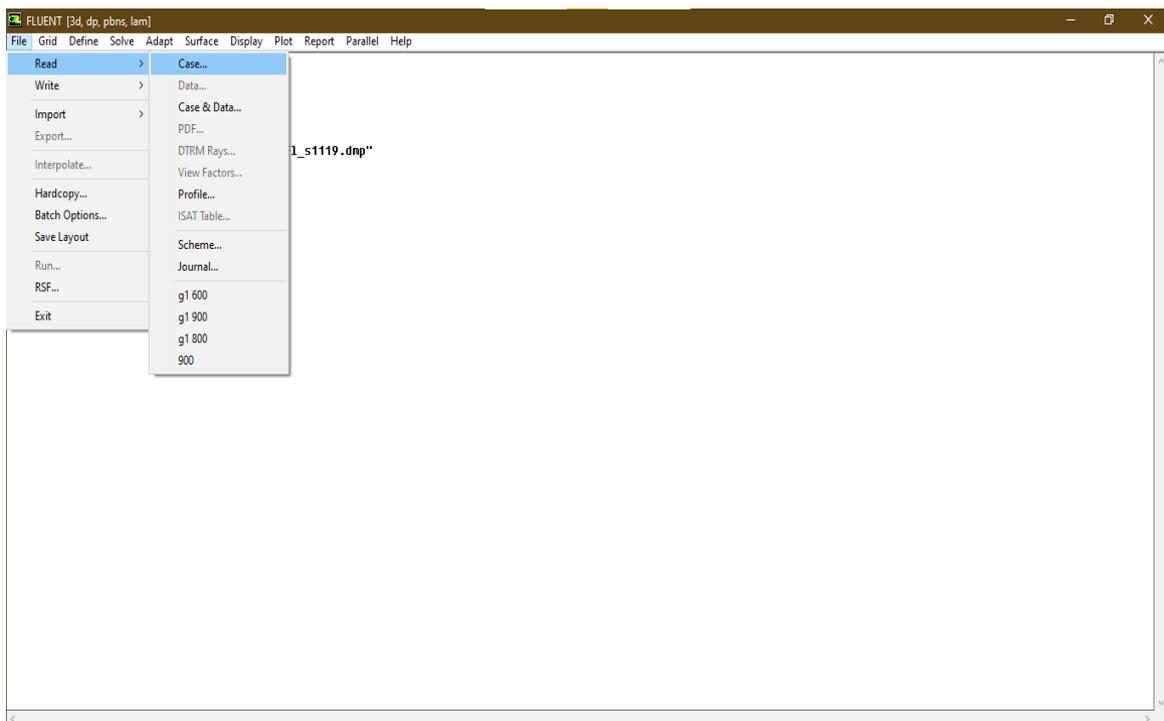


Figure 3-13: Importation de la géométrie

3.7.2.2 Vérification du maillage importé

Grid → Check

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

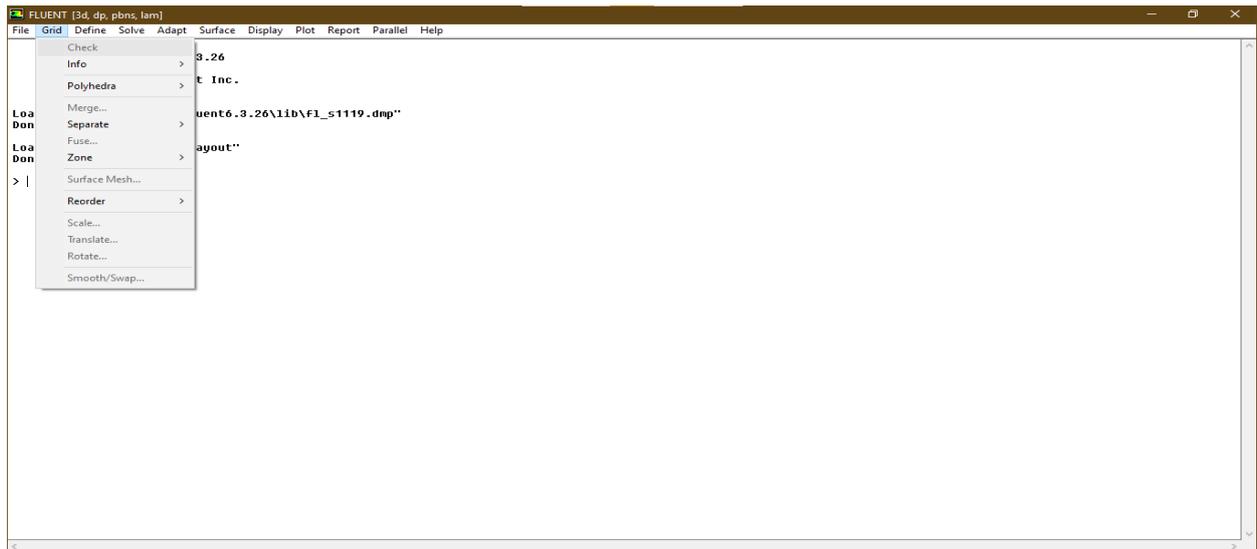


Figure 3-14: Vérification du maillage sous Fluent

3.7.2.3 Vérification de l'échelle

Grid→Scale

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

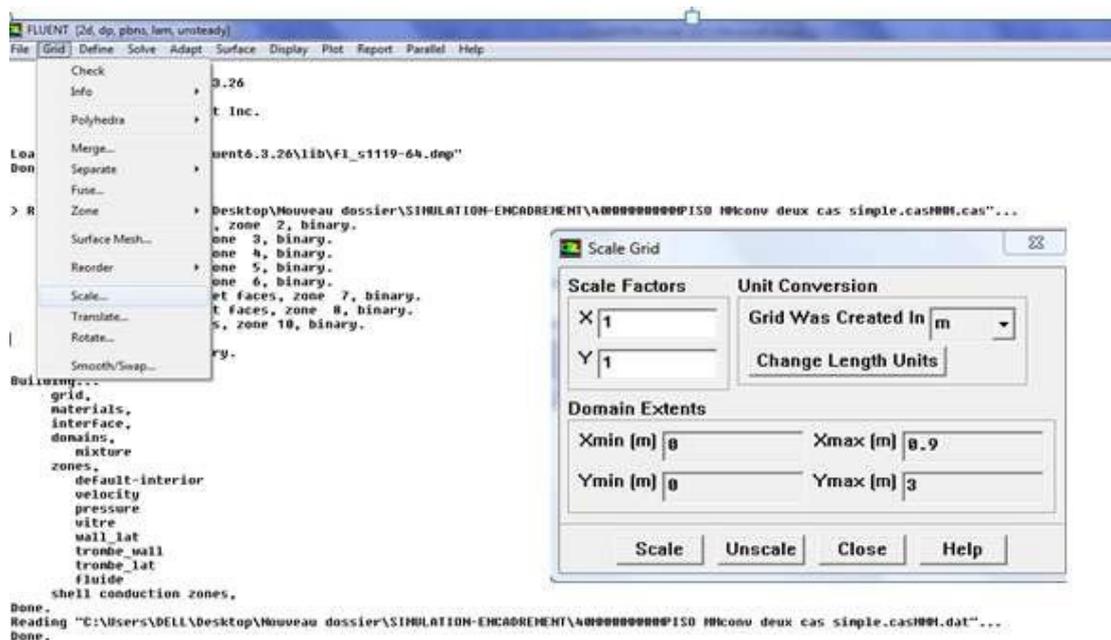


Figure 3-15: Vérification des unités

3.7.2.4 Affichage de la grille

Display → Grid

Vous pouvez afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans Gambit

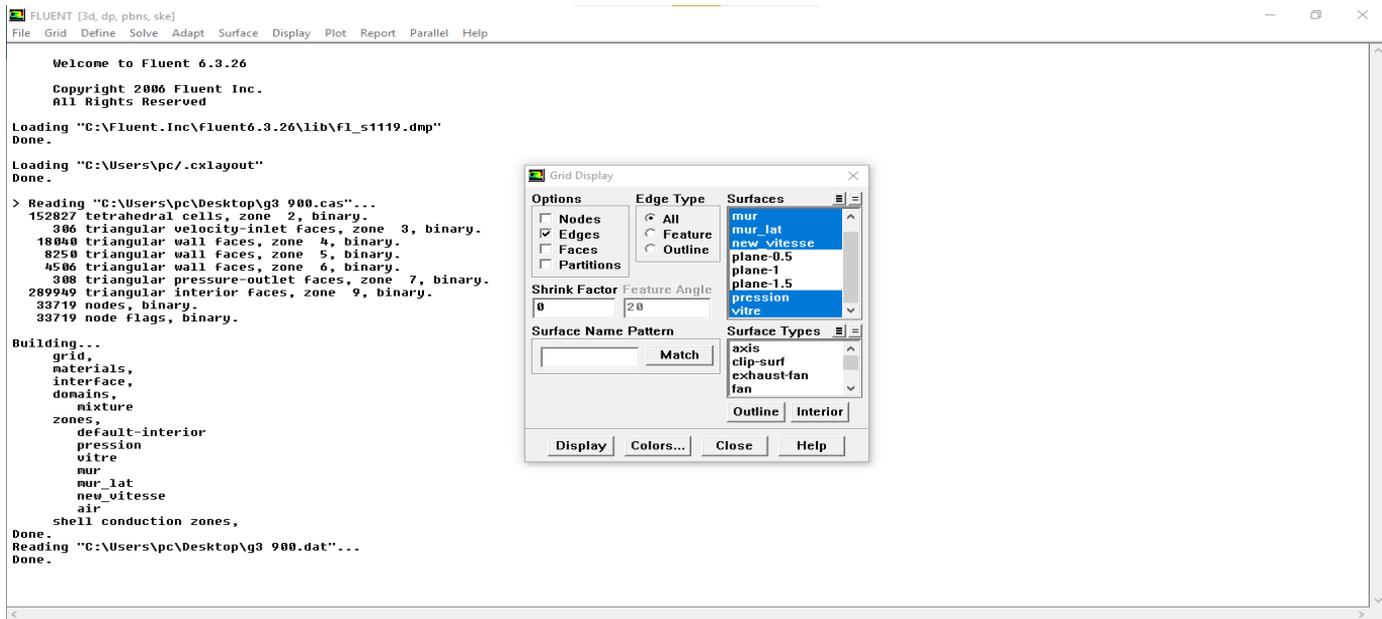


Figure 3-16: Affichage de la grille et vérification des conditions

3.7.2.5 Choix du solver

Define → Models → Solver

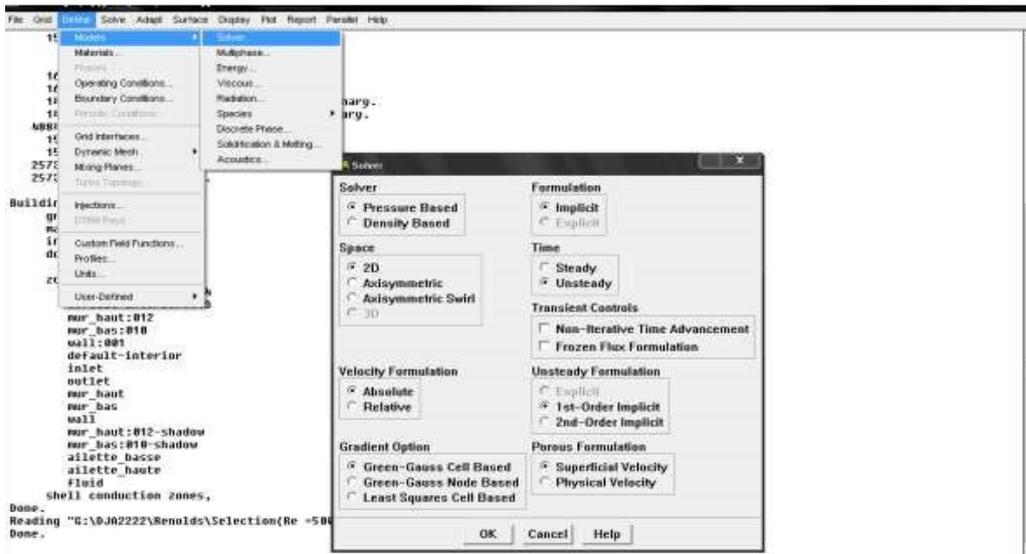


Figure 3-17: Choix du solveur sous fluent

- Segregated Solver : est le plus approprié pour les écoulements incompressibles (Ventilateurs, pompes...)
- Coupled Solvers, les solveurs « coupled implicit » et « coupled explicit », sont plutôt réservés aux écoulements compressibles à grande vitesse.

C'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire.

3.7.2.6 L'équation de l'énergie

Define → Models → Energy

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

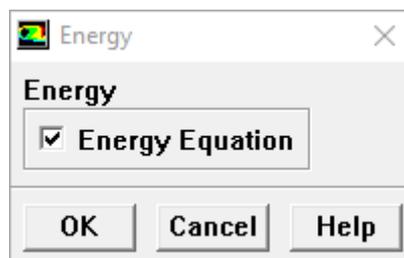


Figure 3-18: Equation de l'énergie

3.7.2.7 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 :

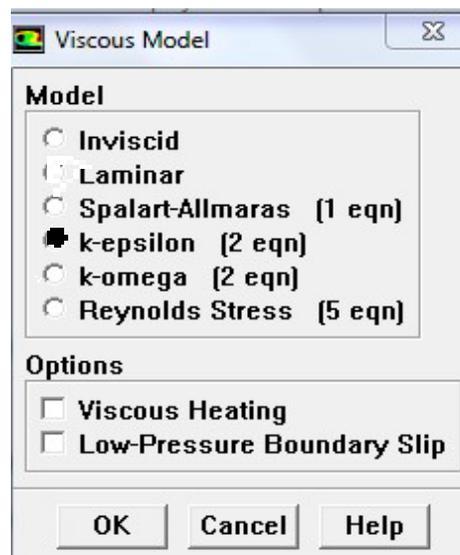


Figure 3-4: Choix du modèle d'écoulement

3.7.2.8 Définition des caractéristiques du fluide

Define → Materials

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

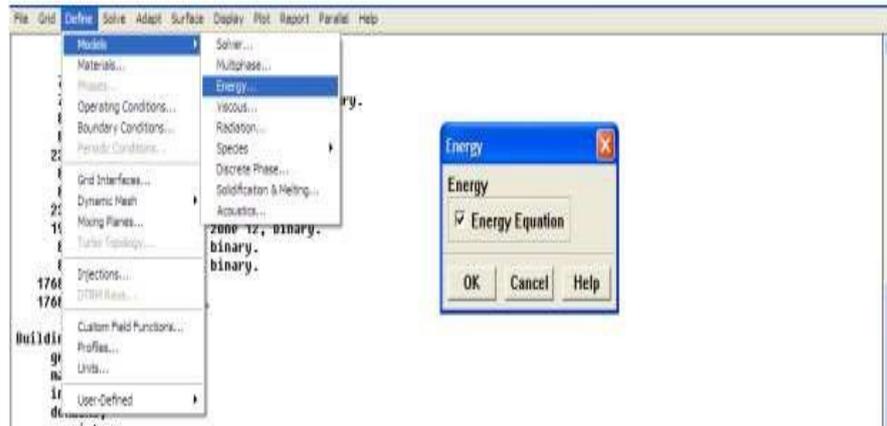


Figure 3-5: Définition des caractéristiques du fluide

3.7.2.9 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 ».

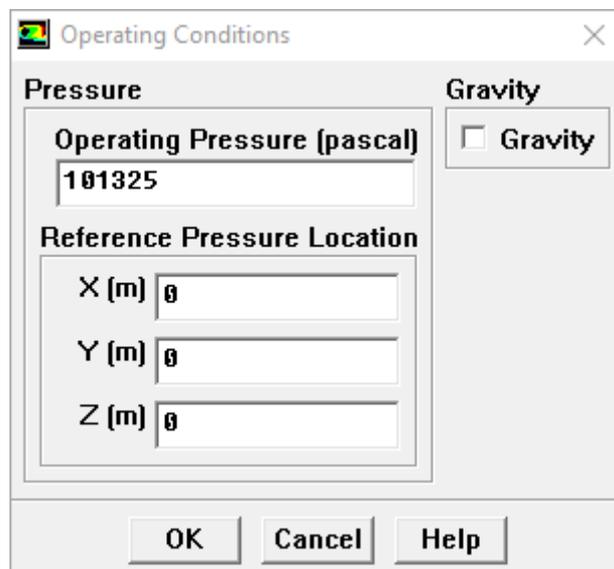


Figure 3-6: Choix de la pression de référence

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 :

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{op}} + P_{\text{gauge}}$$

Pop (Operating pressure) : Pression de référence

Fluent prend par défaut la valeur de la pression atmosphérique comme operating pressure.

The screenshot shows the 'Materials' dialog box with the following settings:

Property	Value
Density (kg/m ³)	constant 1.225
Cp (J/kg-k)	constant 1006.43
Thermal Conductivity (W/m-k)	constant 0.0242
Viscosity (kg/m-s)	constant 1.7894e-05

Material Type: fluid
 Fluent Fluid Materials: air
 Mixture: none

Order Materials By: Name (selected), Chemical Formula

Buttons: Change/Create, Delete, Close, Help

3.6.2.10 Conditions aux limites

Define → Boundary Conditions

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

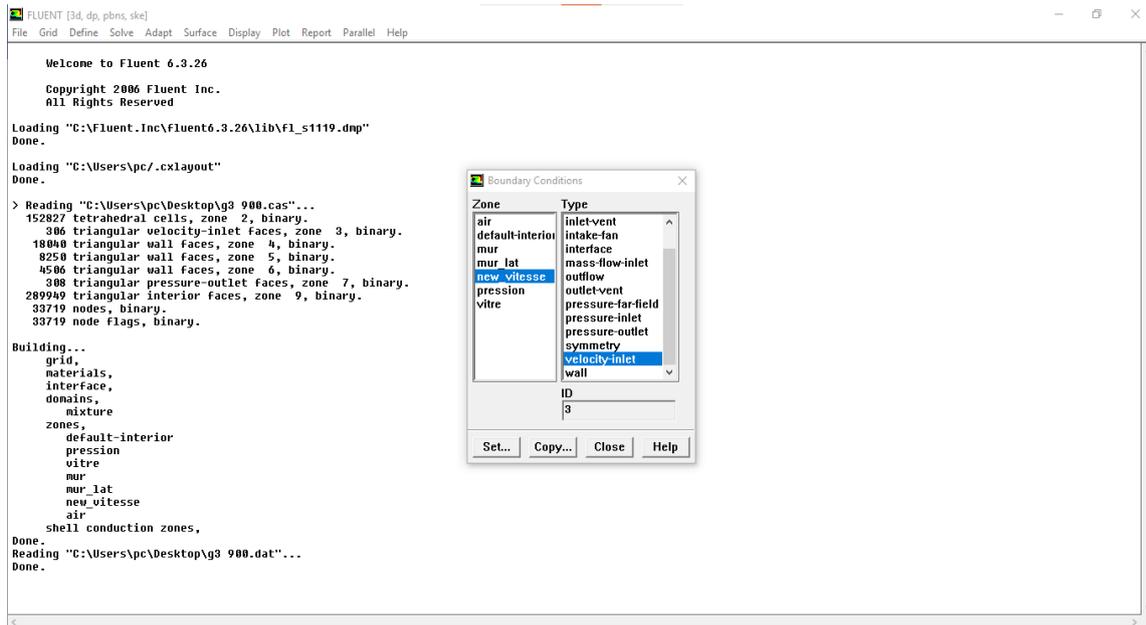


Figure 3-7: Valeurs des conditions aux limites

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

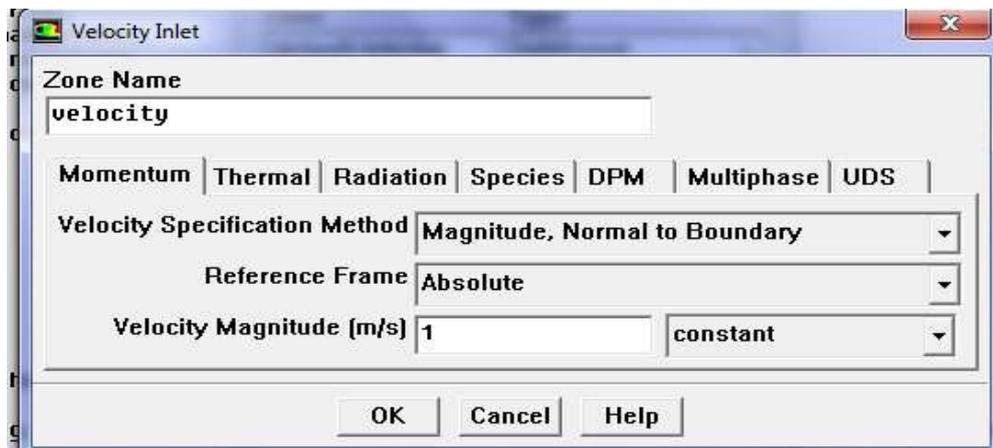


Figure 3-8: Vitesse d'entrée

***Pressure Outlet** : Spécifie la pression statique de sortie.

L'utilisation de Pressure Outlet sert à définir la pression statique à la sortie.

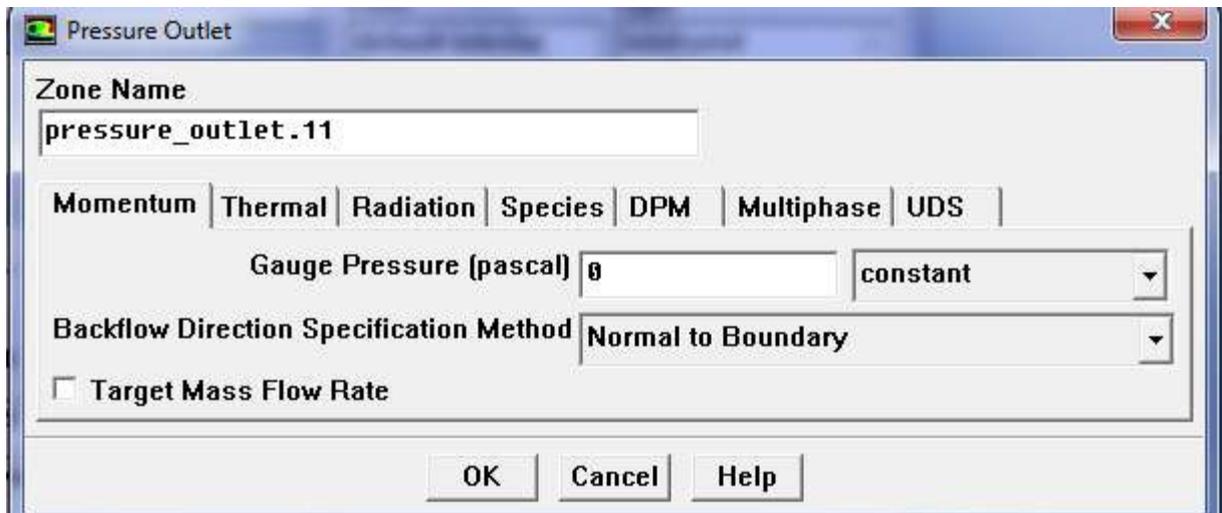


Figure 3-9: Pression de sortie

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

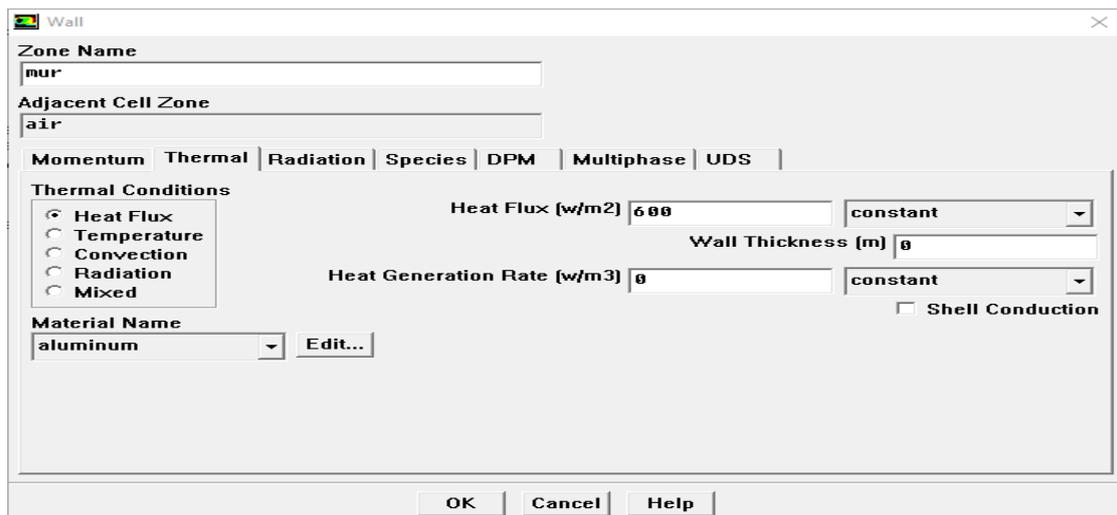


Figure 3-10: Parois du mur trombe

3.7.2.11 Choix d'ordre des équations et l'algorithme

Solve → Controls → Solution

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

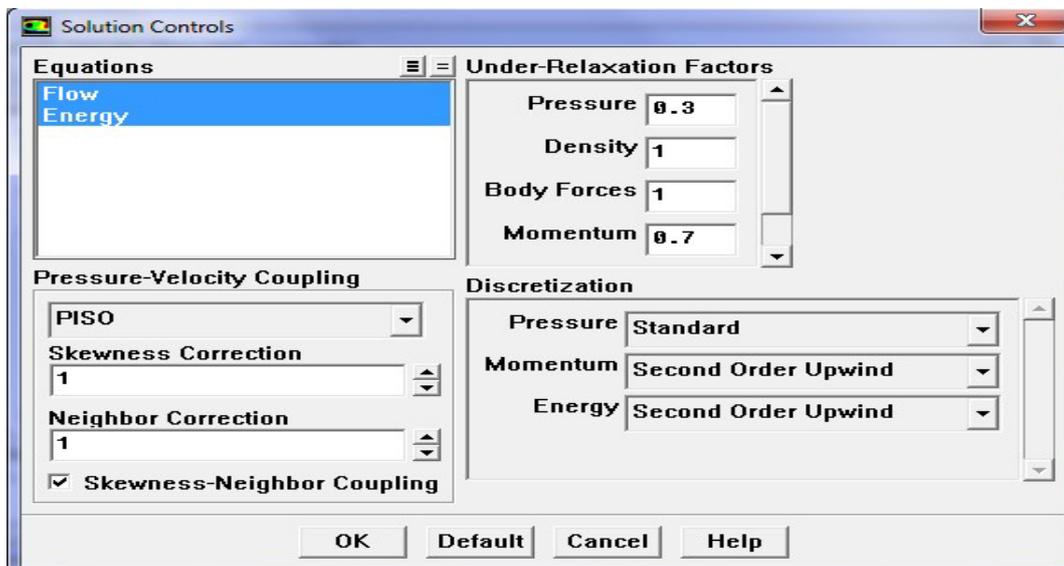
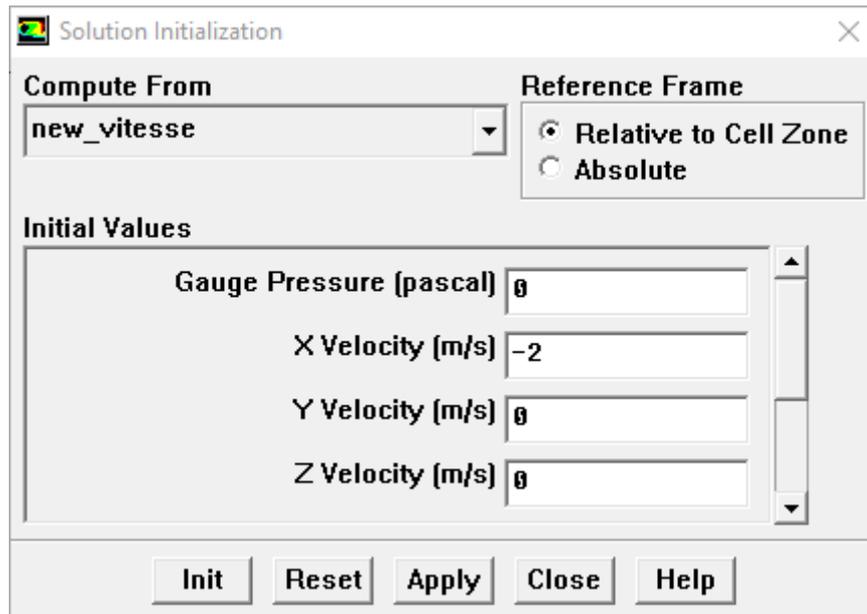


Figure 3-11: Choix d'ordre des équations et l'algorithme

3.7.2.12 Lancement de calcul

Solve → initialize → initialize → compute from → velocity



Puis :

Solve → Iterate

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

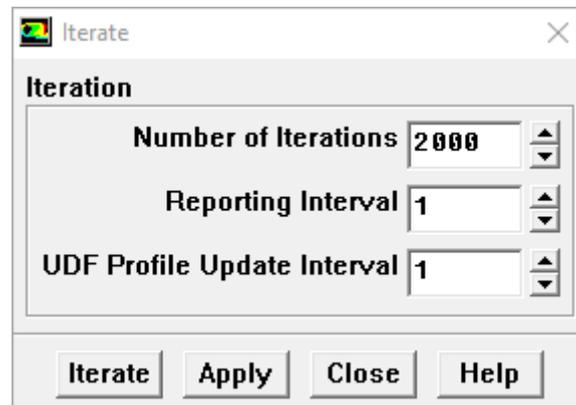


Figure 3-12: Choix du nombre des itérations

3.8 Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous a permis de nous familiariser avec deux logiciels utilisés en entreprise : **GAMBIT** et **FLUENT**. Il a permis de mettre en évidence que le logiciel, aussi bon soit-il, ne pouvait pas remplacer le physicien.

Le logiciel FLUENT utilise la méthode numérique des volumes finis pour la discrétisation des équations de Navier Stokes, de conservation de la masse et de l'énergie, qui est faite ici sur des éléments quadrilatéraux structurés. Elle conduit à un système d'équations non linéaires couplées qui est résolu de manière itérative.

Il faut toujours faire très attention à utiliser avec soin Fluent et à vérifier les résultats obtenus par comparaison avec des résultats expérimentaux.

CHAPITRE 4 : résultats et interprétations

4.1 Résultats et interprétations

Nous avons entamé dans notre travail une simulation numérique tridimensionnel avec le logiciel fluent de l'écoulement de l'air dans un mur trombe.

L'écoulement a été considéré stationnaire turbulent incompressible, en considérant les propriétés de l'air constant.

Notre travail a été validé par rapport au travaux antérieur. [41,42 et 43]

4.2 Maillage

La figure suivante montre l'illustration du maillage pour les trois configurations considérées.

Nous avons choisi un maillage tétraédrique Tgrid raffiné considéré pour les géométries complexes.

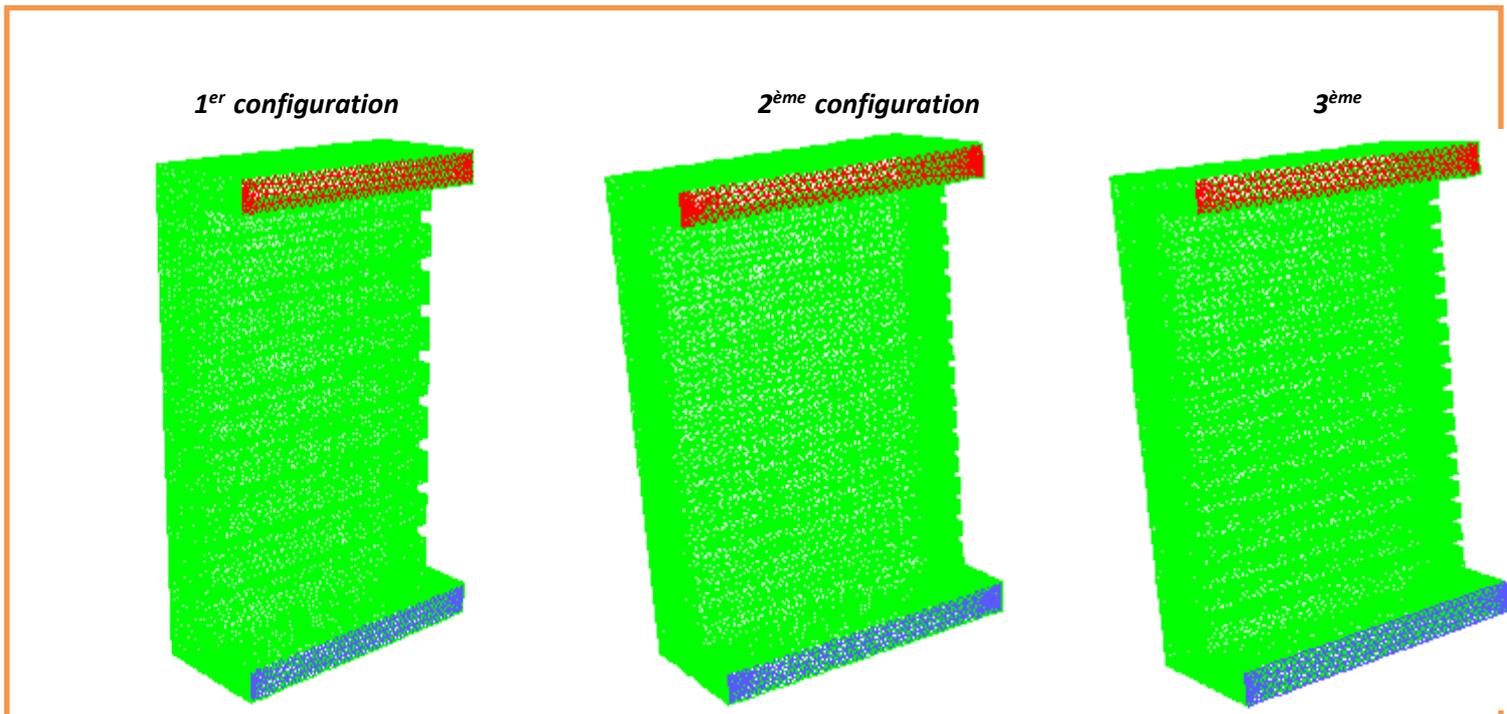


Figure 4-1: Maillage des différentes géométries

4.3 Distribution de la vitesse suivant les 3 directions (x ; y ; z)

La figure suivante montre l'évolution de la vitesse suivant les 3 directions (x ; y ; z) pour les trois configurations. (Figure 4.2)

La vitesse à la sortie elle a une valeur importante pour les trois configurations en remarque aussi une montée rapide de l'écoulement d'air au niveau de vitrage.

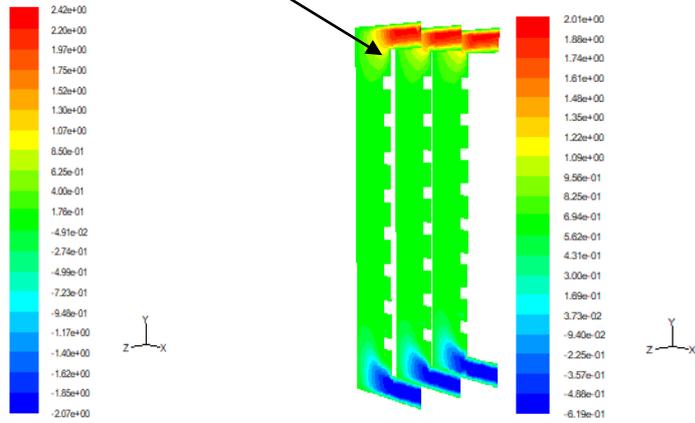
La vitesse de l'écoulement au niveau de vitrage est moins importante pour la 2^{ème} configuration aux deux autres configurations.

Les profils de la figure suivante (figure 4.3) illustre l'évolution de la vitesse à la sortie pour les trois configurations à la position $x=0.9$; $y=2.8$ à 3m.

En remarque que la vitesse est importante pour la 2^{ème} et la 3^{ème} configuration par rapport à la 1^{er} configuration.

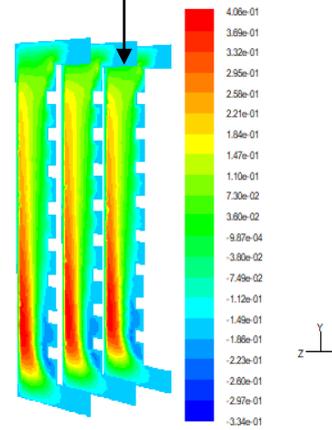
1^{er} Configuration

Plan z = 0.5



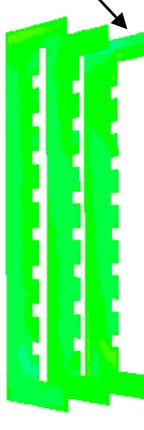
Suivant l'axe (X)

Plan z = 1



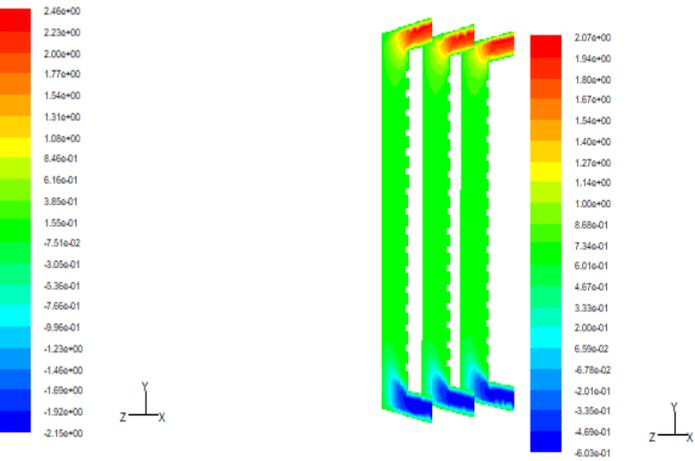
Suivant l'axe (Y)

Plan z = 1.5

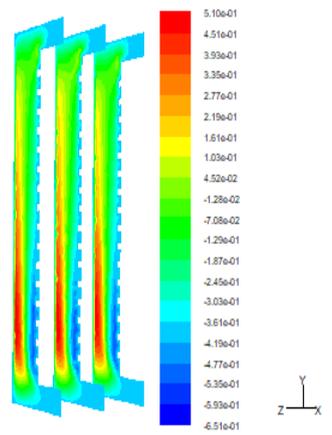


Suivant l'axe (Z)

2^{ème} Configuration



Suivant l'axe (X)

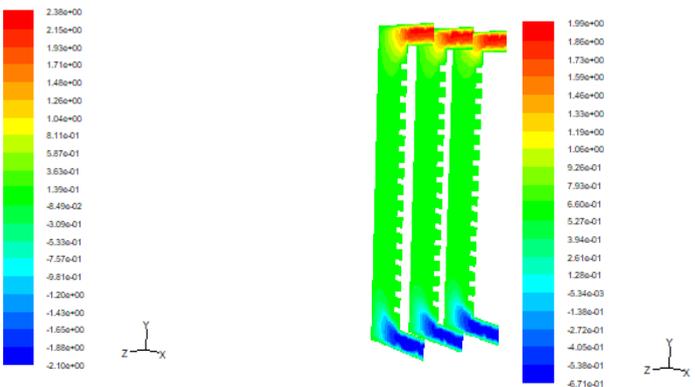


Suivant l'axe (Y)

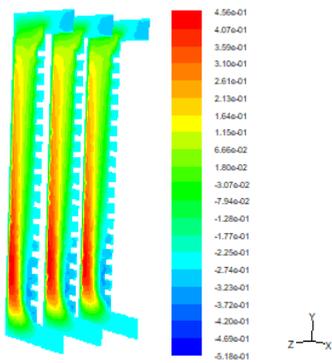


Suivant l'axe (Z)

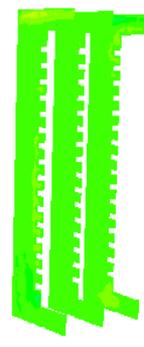
3^{ème} Configuration



Suivant l'axe (X)



Suivant l'axe (Y)



Suivant l'axe (Z)

Figure 4-2: contour de vitesse pour les trois configurations

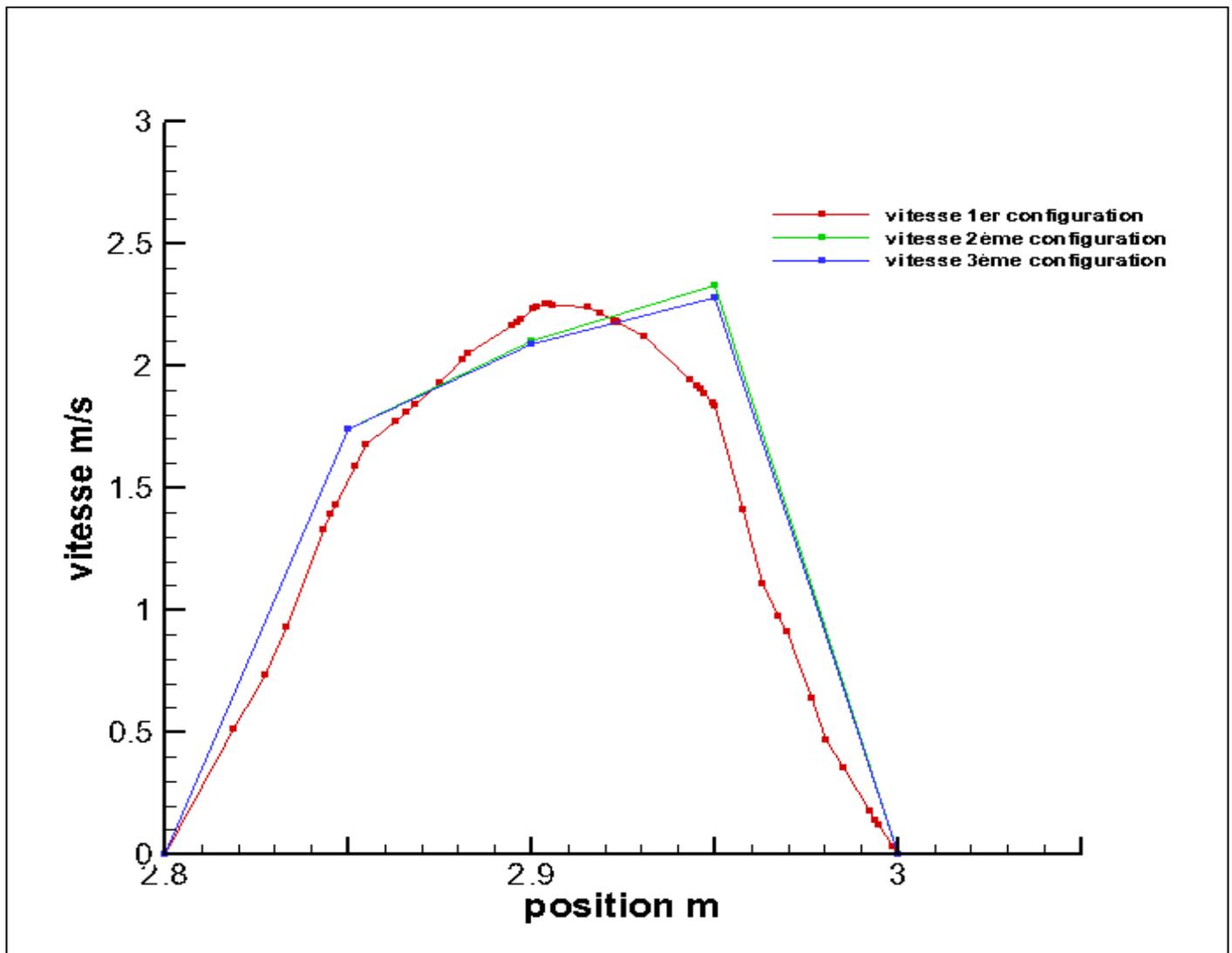


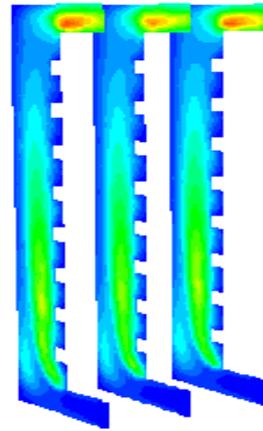
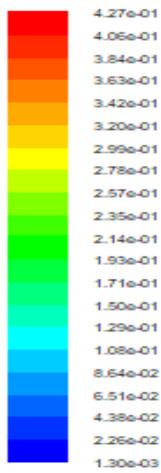
Figure 4-3: Profils de vitesse à la sortie pour les 3 configurations

4.4 Distribution de l'énergie cinétique

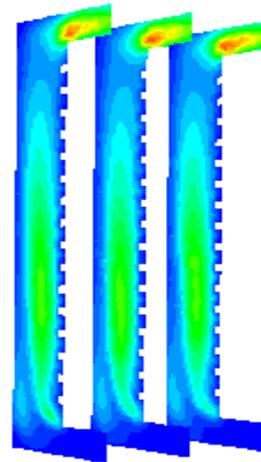
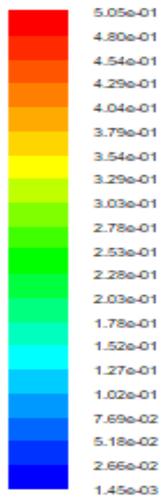
La figure suivante représente le contour de l'énergie cinétique turbulente pour les trois plans $z=0.5$ m ; $z=1$ m ; $z=1.5$ m, (figure 4.4).

Les valeurs maximums de l'énergie cinétique turbulente sans visualiser à la sortie du mur trombe pour les trois plans.

1^{er} Configuration



2^{ème} Configuration



3^{ème} Configuration

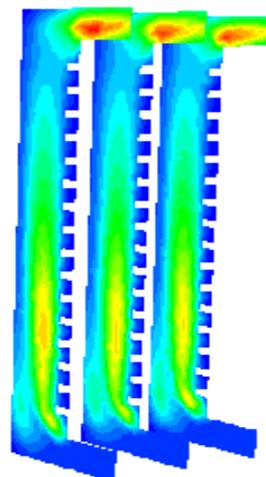
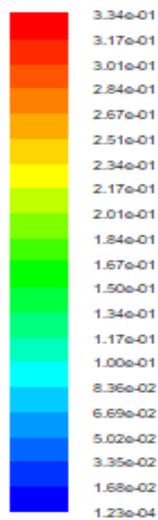


Figure 4-4:Contour de la turbulence pour les 3 géométries

4.5 Distribution de la Température

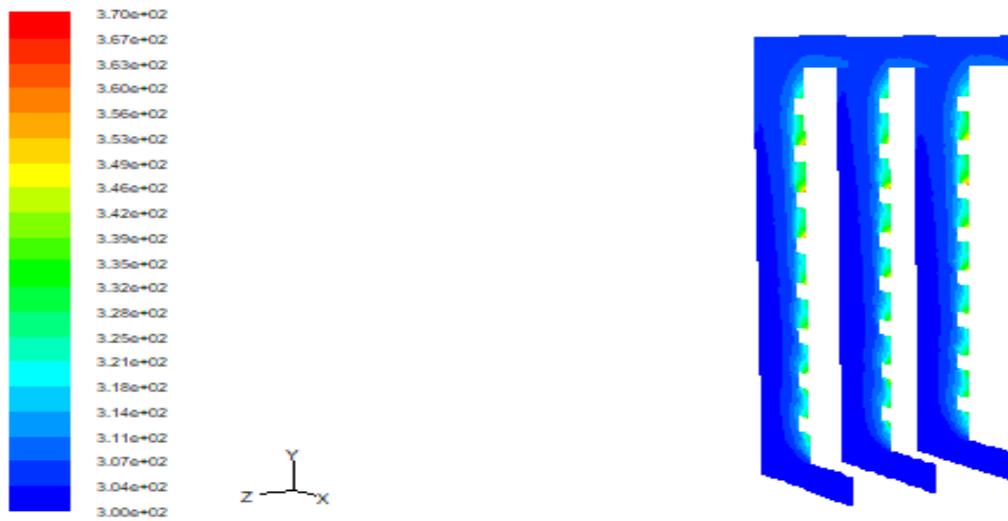
Le contour de la figure suivante (Figure 4.5) illustre la distribution de la température de l'air du mur trombe pour les trois plans $z=0.5\text{m}$; $z=1\text{m}$; $z=1.5\text{m}$.

En visualise bien l'influence de la température du mur sur l'écoulement de l'air.

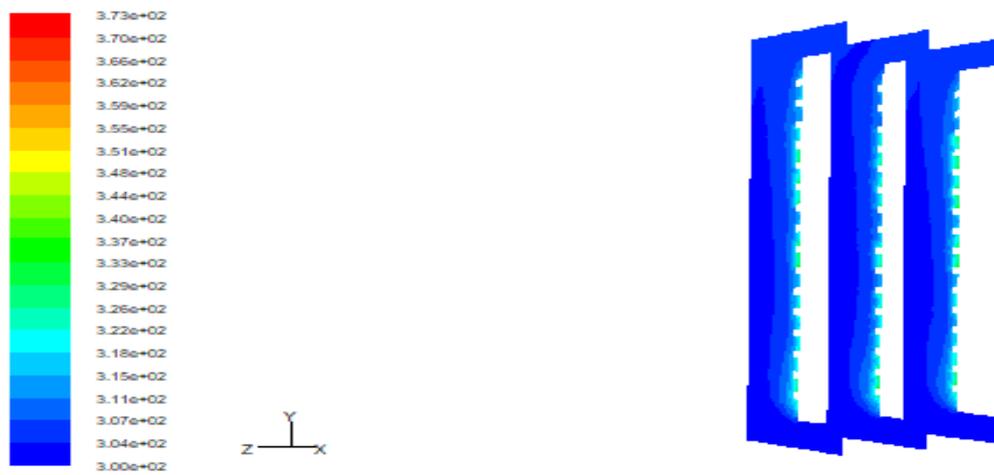
La figure 4.6 représente les profils de la température de l'air à la sortie du mur trombe pour les trois configurations étudiées, position $x=0.9\text{m}$; ($y=2.8$ à 3 m). En remarque que la valeur de la température est plus importante pour la troisième configuration pour les différentes flux imposé $Q=600\text{ w/m}^2$; $Q=800\text{ w/m}^2$; $Q=900\text{ w/m}^2$.

L'échange de chaleur est important pour la troisième configuration par rapport aux deux autres configurations, à cause de la longueur d'échange qui est importante.

1^{er} Configuration



2^{ème} Configuration



3^{ème} Configuration

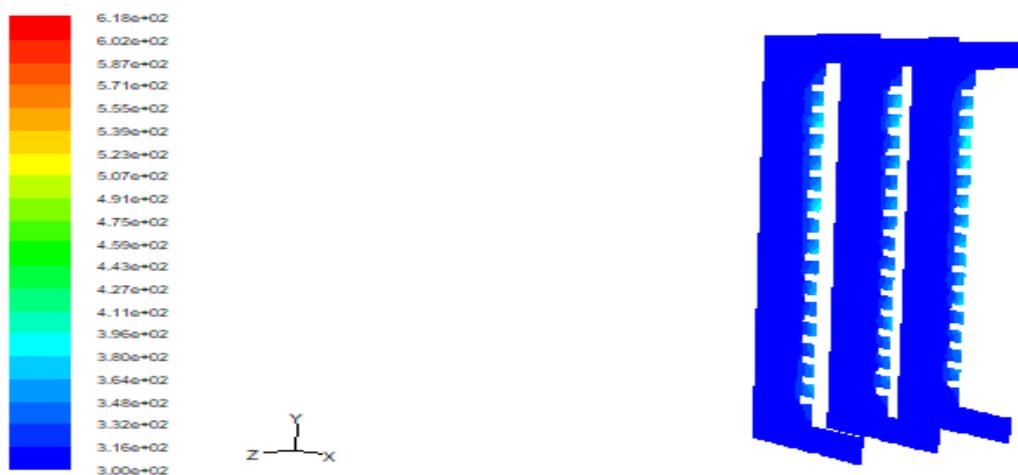


Figure 4-5: Contours de la température (K) pour les différentes configurations

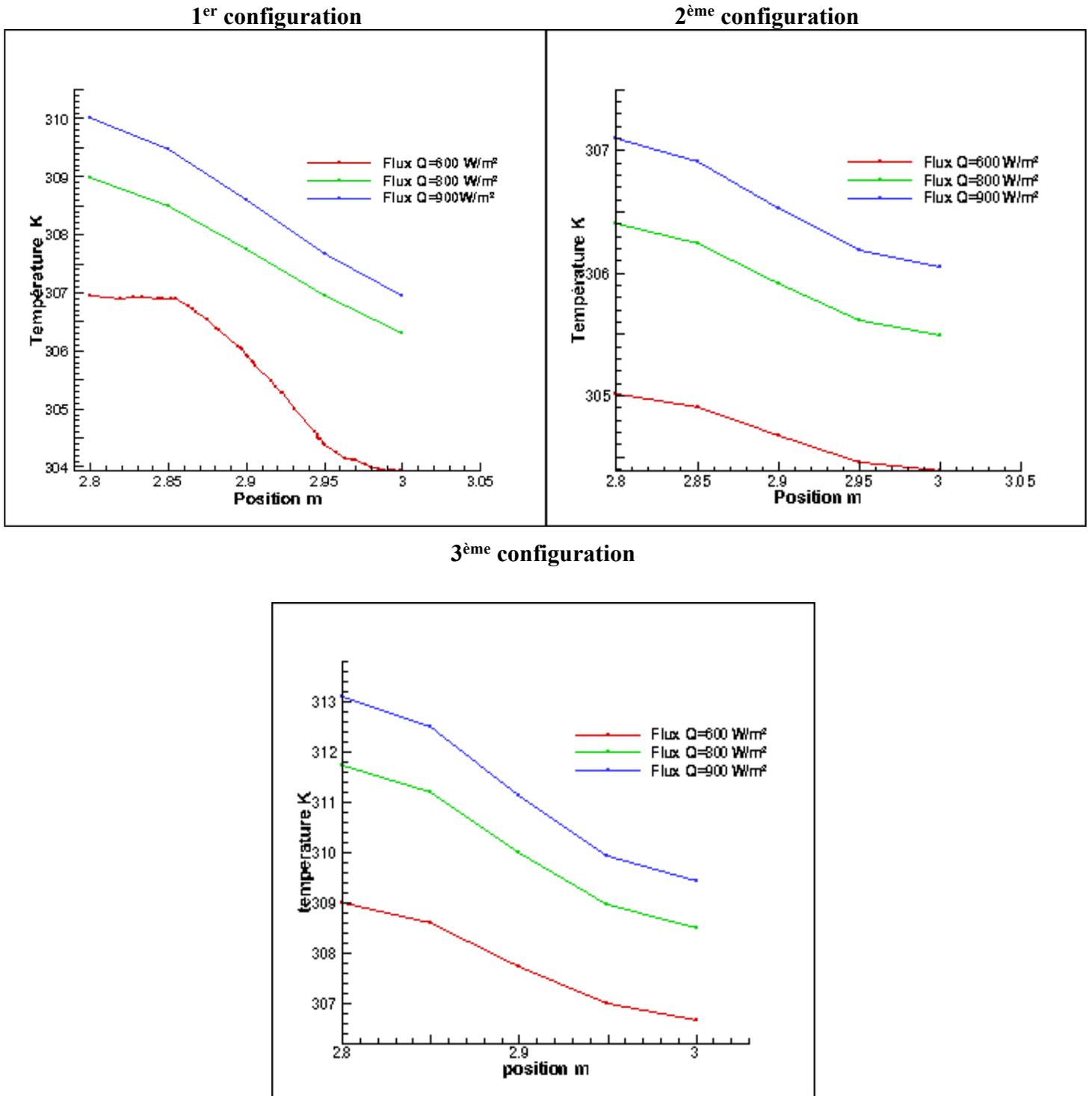


Figure 4-6: profils de température de l'air à la sortie pour les 3 configurations

Dans le tableau suivant (tableau 4-1), nous avons traité les valeur moyennes de la vitesse, de l'énergie cinétique et de la température pour chacun des trois configurations avec différents flux de chaleur (600, 800 et 900 (W/m^2)). Les résultats montrent qu'avec un changement de géométrie ou de flux de chaleur, il n'y a pas une grande influence sur la vitesse moyenne et la turbulence moyenne. Quant à la température, c'est l'inverse qui se produit.

Dans cette dernière, on note qu'avec une augmentation du flux il y a une élévation de la température et on note également que la configuration n°3 a réalisé la plus forte augmentation de la température par rapport aux deux autres configurations.

Tableau 4-1 : Tableau qui montre la valeur moyenne de (vitesse, turbulence et température) pour les différents flux des 3 configurations étudiées

Flux (W/m²)	1^{er} Configuration			2^{ème} Configuration			3^{ème} Configuration		
	<i>Vitesse moyenne(m/s)</i>	<i>Turbulence moyenne(m²/s²)</i>	<i>Température moyenne (K)</i>	<i>Vitesse moyenne(m/s)</i>	<i>Turbulence moyenne (m²/s²)</i>	<i>Température moyenne (K)</i>	<i>Vitesse moyenne (m/s)</i>	<i>Turbulence moyenne (m²/s²)</i>	<i>Température moyenne (K)</i>
600	1.0575	0.1011	306.2195	1.0379	0.1155	304.4767	1.0538	0.0939	309.4945
800	1.0575	0.1011	308.1251	1.0379	0.1155	305.7959	1.0538	0.0939	312.4933
900	1.0575	0.1011	309.0779	1.0379	0.1155	306.4555	1.0538	0.0939	313.9926

Conclusion :

Dans ce travail nous avons essayé d'améliorer la température de l'air fournie par un mur trombe pour le confort thermique dans un locale.

A cet effet nous avons construit trois géométries avec des cannelures de différentes dimensions.

Une étude numérique en trois dimensions (x ; y ; z) a été réalisée avec le logiciel Fluent 6.3.

Les conclusions suivantes de cette étude :

- La simulation CFD est capable de fournir des distributions précises de la température et de la vitesse de l'air à l'intérieur du mur trombe.
- Il a été observé à partir des simulations des trois configurations que la troisième configuration fournit une température à la sortie du mur supérieure par rapport aux deux autres configurations.
- Il a été observé aussi qu'en augmentant le flux imposé au mur trombe la température de l'air augmente pour les trois configurations.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] A.B. Stambouli, « promotion of renewable energies in Algeria: Strategies and perspectives, 'renew. Sustain.EnergyRev., vol.15, no. 2, pp.1169-1181, 2011.
- [2] A. B. Stambouli, Z. Khiat, S. Flazi, and Y. Kitamura, "A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 4445–4460, 2012.
- [3] H. Mahmoudi, O. Abdellah, and N. Ghaffour, "Capacity building strategies and policy for desalination using renewable energies in Algeria," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 4, pp. 921–926, 2009.
- [4] Y. Himri, A. BoudgheneStambouli, and B. Draoui, "Prospects of wind farm development in Algeria," *Desalination*, vol. 239, no. 1–3, pp. 130–138, 2009.
- [5] M. Med S. Bouzer, *Rapport des consommations annuelles, APRUE. 2007.*
- [6] Shobhakar D. « Comment infléchir les émissions de CO2 dans quatre mégapoles « d'Asie » in *La Revue Durable*, « Vivre ensemble en mégapole », n° 14.2005
- [7] soiSalomon, S et Bedel, S. *La maison des méga watts, Le guide malin de l'énergie chez. Terre vivante.2004.*
- [8] PREBAT, ADEME et CSTB. *Comparaison internationale bâtiment et énergie... Rapport final. Décembre 2007. p. A19.*
- [9] Schneider Electric. *Le livre blanc de l'Efficacité énergétique. Février 2011*
- [10] Fadi Chlela. *Thèse de doctorat : Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. Université de La Rochelle. 2008.*
- [11] SEOUD S. *Energy Performance of Non-Domestic Buildings. BORDAS, B 2001.Cité. Mémoire de magister : Audit énergétique de bâtiments tertiaires. EPAU Alger. Année 2008.*
- [12] *Loi n° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie- article 02.*
- [13] *www.climamaison.com. Consulté le 27/03/2017.*
- [14] *Memoiretechnique du bâtiment, confort technique, CERTU – 2003.*

- [15] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE Standard 55 – 2004.
- [16] DTR C3.2/4 'Document Technique Réglementaire, Règlementation Thermique Algérienne du Bâtiment', CNERIB, 2016.
- [17] www.quelleenergie.fr/economies-energie/eco-travaux/ameliorer-confort-thermique
- [18] (source : Boutaba ,2007).
- [19] book. Belgaid, Brahim consulté le 22/03 /2021.
- [20] C. Long & N. Sayma. « Heat Transfer ». Chris Long, NaserSayma&Ventus Publishing APS ISBN 978- 87- 7681-432-8. 2009.
- [21] P. A. C. Raats, « SteadyGravitational Convection Induced by a Line Source of Salt in a Soil », Soil Science Society of America Journal, no 33, 1969, p. 483-487.
- [22] B. GIVONI l'homme, l'architecture et le climat Edition : Le Moniteur Paris 1978 p.45.
- [23] Source: J.L. Izard, 1993.
- [24] V. OLGYAY, «Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism », Princeton, University Press, N.J., U.S.A., page.185, 1963.
- [25] Izard, J. L., &Guyot, A...Archi Bio, Ed. Parenthèses, p52, 1979.
- [26] P. Fernandez.,. Genius Loci : paysage, ambiance, architecture. Edition Pierre Mardaga. Liège, p.5.,1981.
- [27] <https://www.paperblog.fr/5906643/reduire-l-effet-de-paroi-froide/>
- [28]<https://coproprietes.senova.fr/conseils-techniques/ameliorer-confort-copropriete-sanstravaux/attachement/confort-temperature-ressentie/>
- [29] Développer une architecture bioclimatique méditerranéenne. (FichierPDF)
- [30] M. Akemi contribution à l'étude d'un capteur solaire thermodynamique solaire thermodynamique thermosiphon à eau et applicationaux sites de TIARET et ADRAR, Thèse de Magister, Ecole Doctorale Energies renouvelables, UniversitéAbouBakerBelkaid,TLEMCEEN).
- [31] Gasmi Toufik Mr. LARFI Djamel mémoire de fin d'étude, énergiereouvelables (2014/2015)
- [32] <https://www.choisir.com/energie/articles/104525/pour-se-chauffer-le-mur-trombe/>

- [33] <https://www.aa13.fr/design-despace/loft-in-dusseldorf-erpicum-76593>
- [34] J. Bernard. Energie solaire, calculs optimisation, Ellipses Edition marketing S.A 2011.
- [35] pauline redoulés juin 2012 crédits photo.
- [36] Eovillage pathways 2020-nextGENorth American.
- [37] K. Immessad et M. Belhamel, Evaluation des performances d'un Mur Trombe, centre de développement des énergies renouvelables, Alger
- [38] I. Guy La SAGA de mes capteurs solaires à AIR, février 2012, Localisation : Villedieu la Blouère, 49450, Pays de Loire (47°09,049 N et 1° 03.899 W)
- [39] <https://stringfixer.com/fr/Reynolds-number>
- [40] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermodynamique>
- [41] Omar ARBI LADMI, Etude numérique du transfert thermique dans les systèmes à mur capteur-accumulateur, MAGISTERE EN SIMULATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS DES FLUIDES, 2010.
- [42] Sandra Corasaniti, Luca Manni, Flavia Russo, Fabio Gori, Numerical simulation of modified Trombe-Michel Walls with exergy and energy analysis, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 88, November 2017, Pages 269-276.
- [43] Farah Mansoura et Narimane Fatima Zohra Mansouri Etude de l'effet du mur trombe sur la distribution de l'air et le confort dans un habitat. Mémoire de master : Efficacité énergétique dans les bâtiments de construction. FSTTlemcen. Année 2020.