

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث

العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد -

تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présentée pour l'obtention du **diplôme de MASTER en Génie Civil**

Spécialité : Efficacité Energétique dans les bâtiments de constructions

Présenté et soutenu par : Farah Mansoura et Narimane Fatima Zohra Mansouri

Sujet

Etude de l'effet du mur trombe sur la distribution de l'air et le confort dans un habitat

Soutenue, le 20/09/2020, devant le jury composé de :

Dr KHELIFI Zakia	Maitre de Conférences B Univ. Tlemcen	Président
Dr SELKA Ghouti	Maitre de Conférences B Univ. Tlemcen	Examineur
PrALIANE Khaled	Professeur Univ. Tlemcen	Encadreur
DrHENAOUI Mustapha	Docteur Univ. Tlemcen	Co-Encadreur

REMERCIEMENTS

Gloire soit rendu au Dieu tout puissant créateur de toutes choses, le très miséricordieux pour tous ses bienfaits dont il nous a comblé et de nous a avoir donné le courage et la force pour réaliser ce modeste travail

Nous tenons à remercier en premier lieu notre encadrant Mr. Khaled ALIANE pour sa confiance en nous, notre co-encadrant Mr. Mustapha HENAOUI pour son orientation et sa patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nos remerciements s'étendent également aux membres de jury, qui nous font l'honneur d'accepter et de juger ce travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.

Enfin, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à nos très chères familles et aussi nos enseignants du département de Génie Civil qui nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

DEDICACE

Afin d'être reconnaissant envers ceux qui m'ont appuyé et encouragé à effectuer ce travail de recherche,

Je dédie ce mémoire :

À ma très chère mère et à mon très cher père qui n'ont cessé de me combler par leur amour, leur soutien, leur tendresse et leur encouragement.

À mes chers frères Ahmed, Ilyes et Abdelhadiet mes belles sœurs Imene et Ibtissem

À mes chers petits neveux et nièces Meriem, Yasmine, Adam et Ali , source de joie et de bonheur .

À mon mari pour son soutien moral et ses encouragements.

À tous les membres de ma famille sans aucune exception.

À tous mes amis et collègues et toute la promotion EEBC en particulier .

À tous mes professeurs et enseignants.

À ma chère binôme Rimane et toute sa famille .

Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.

MANSOURA FARA

DEDICACE

En guise de reconnaissance, je tiens à dédier ce mémoire :

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs soutiens et leurs prières tout au long de mes études,

À ma sœur et mon frère pour leurs humours cyniques et uniques

À mon mari pour sa présence permanente et son soutien moral

À mon binôme Farah pour sa patience et compréhension tout au long de ce projet

À toute la promotion EEBC

À mes professeurs et enseignants

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible

MANSOURI NARIMENE FATIMA ZOHRA

RESUMÉ

Le secteur du bâtiment est à l'origine de 45% de la consommation énergétique en Algérie, parce qu'il cherche toujours à répondre aux besoins des occupants.

Dans le contexte actuel, l'énergie solaire est l'alternative la plus intéressante et la plus avantageuse. Notre objectif est de l'utiliser dans l'habitat .Au cœur de ce dernier, le mur trombe pourrait jouer un rôle majeur grâce à sa capacité à capter la chaleur du soleil et à la restituer de manière uniforme à l'intérieur de la maison, c'est l'un des systèmes les plus efficaces pour le chauffage passif des locaux.

Le but de ce travail est de :

- Evaluer le confort thermique dans un habitat.
- D'effectuer une nouvelle recherche dans le domaine du chauffage solaire passif et actif en étudiant le comportement thermodynamique de deux types de murs capteurs solaires (murtrombe).
- Essayer d'encourager l'étude et la construction de maisons qui utilisent l'énergie solaire.

Une simulation numérique a été faite pour étudier qualitativement l'aspect dynamique et thermique des deux types de murs trombe dans le but de déterminer le type le plus performant qui répond aux besoins en chauffage d'un habitat.

Les résultats obtenus par simulation sous FLUENT montrent que, comparativement aux deux types de murs, le mur cannelé bénéficie du potentiel d'amélioration de l'efficacité et de l'efficacité en matière de production et optimisation d'énergie

Mot-clé : Energie solaire, mur Trombe, confort thermique, capteurs solaires, simulation numérique, chauffage solaire.

SUMMARY

The building sector is at the origin of 45% of energy consumption in Algeria, because it always seeks to meet the needs of the occupants.

In the current context, solar energy is the most interesting and advantageous alternative. Our objective is to use it in homes, where the Trombe wall could play a major role thanks to its ability to capture the sun's heat and release it uniformly inside the house, making it one of the most efficient systems for passive space heating.

The aim of this work is to:

- To evaluate the thermal comfort in a home.
- Carry out new research in the field of passive and active solar heating by studying the thermal behaviour of two types of solar collector walls (Trombe wall).
- To encourage the study and construction of houses that use solar energy.

A numerical simulation was carried out to study qualitatively the dynamic and thermal behaviour of two types of solar collector walls.

There are two types of thermic walls: the first one is the classic Trombe wall which already exists in the literature. The second is the Trombe wall with a grooved wall geometry. The aim of this work is to determine the performance of the fluted wall in relation to the simple Trombe wall for the heating needs of a house.

The results obtained by simulation under FLUENT show that compared to both types of wall, the corrugated wall considerably improve the efficiency in terms of energy production and optimization.

Key-words : Solar energy ,Trombe wall ,simple Trombe wall , fluted Trombe wall, thermal confort , solar captor ,numerical simulation , solar heating .

ملخص

دراسة تأثير جدار ترومب على توزيع الهواء والراحة في المنزل

يشكل قطاع البناء مصدر 45% من استهلاك الطاقة في الجزائر، لأنه يسعى دائماً إلى تلبية احتياجات القاطنين.

في السياق الحالي، تعد الطاقة الشمسية بديلاً أكثر إثارة للاهتمام واستفادة. هدفنا هو استخدامه في المنازل. في قلب هذا الأخير، يمكن لجدار ترومب أن يلعب دوراً رئيسياً بفضل قدرته على التقاط حرارة الشمس وإعادتها بشكل موحد داخل المنزل. ، إنه أحد أكثر الأنظمة كفاءة للتدفئة السلبية للمساحات.

يمكن الهدف من هذا العمل في :

- تقييم الراحة الحرارية في المنزل.
- إجراء بحث جديد في مجال التسخين الشمسي السلبي والنشط من خلال دراسة السلوك الحراري لنوعين من جدران (المجمعات الشمسية (جدار ترومب)).
- تشجيع دراسة وبناء المنازل التي تستخدم الطاقة الشمسية.

تم إجراء محاكاة عددية للدراسة النوعية للجانب الديناميكي وحراري لنوعين من جدران الترومب : الأول هو جدار ترومب الكلاسيكي. والثاني هو جدار ترومب بهندسة محددة للجدار. الهدف من هذا العمل هو تحديد أداء الجدار المحدد مقارنة بجدار الترومب البسيط لتقييم احتياجات التدفئة في المنزل.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة باستخدام برنامج فلوينت أنه ، مقارنة بنوعي الجدران ، يعمل الجدار المحدد على تحسين الكفاءة بشكل كبير من حيث إنتاج الطاقة وتحسينها .

الكلمات المفتاحية : الطاقة الشمسية ، جدار ترومب بسيط ، جدار ترومب محدد ، راحة حرارية ، مجمعات شمسية ، محاكاة رقمية ، تسخين شمسي .

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
DEDICACE	ii
DEDICACE	iii
RESUMÉ	iv
SUMMARY	v
ملخص	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTES DES ACRONYMES ET NOMENCLATURE	x
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES TABLEAUX.....	xviii
INTRODUCTION GENERALE.....	xix
Chapitre 1 : notions dur le confort dans un habitat et l'efficacité énergétique	1
1.1 Introduction	4
1.2 L'efficacité énergétique dans un habitat.....	5
1.2.1 Qu'est-ce que l'efficacité énergétique ?.....	5
1.2.2 Pourquoi l'efficacité énergétique est-elle nécessaire ?.....	6
1.3 Confort dans un habitat	6
1.3.1 Définition du confort	6
1.3.2 Le confort thermique dans un habitat.....	6
1.3.2.1 Définition	6
1.3.2.2 Température légal dans un habitat.....	7
1.3.2.3 Mode de transfert de chaleur	8
1.3.2.4 Différents facteurs agissant sur le confort thermique	10
1.3.2.5 Facteurs ayant une incidence sur le confort thermique	13
1.3.2.6 Le rapport entre l'enveloppe et le confort thermique	14
1.3.2.7 Les paramètres du confort thermique	15
1.3.2.8 Impact de l'inertie thermique sur le confort du bâtiment.....	21
1.4 Conclusion.....	26
CHAPITRE 2 : mur trombe et chauffage des habitats	33
2.1 Introduction :	34
2.2 Schéma de principe du mur trombe.....	34

2.2.1	Qu'est ce que c'est le mur trombe ?	34
2.2.2	Définition	35
2.2.3	Principe de fonctionnement	36
2.2.4	La réponse du mur Trombe aux besoins de chauffage.....	37
2.2.5	Mur trombe : Avantages et inconvénients [31]	38
2.3	Le fonctionnement d'un mur Trombe	39
2.3.1	Fonctionnement de la paroi thermique en hiver	39
2.3.2	Fonctionnement de la paroi thermique en été.....	40
2.3.3	Calcul de l'inertie thermique.....	42
2.3.3.1	Circulation de la chaleur	42
2.3.3.2	Radiation	42
2.3.4	Masse thermique du mur trombe	43
2.3.5	Thermocirculation	43
2.3.6	Performance du mur trombe (nord de l'ALGERIE)	48
2.3.6.1	Effet des dispositifs des protections solaire	48
2.4	La modélisation des transferts de chaleur dans une cavité ventilée naturellement	49
2.4.1	Echange radiatif.....	50
2.4.1.1	Rayonnement solaire et distinction entre CLO et GLO	50
2.4.1.2	Phénomène de multi-réflexion entre les deux plaques.....	51
2.4.1.3	Echange <i>radiatif entre deux surfaces</i>	52
2.4.2	Les échanges convectifs.....	53
2.4.2.1	Caractérisation de la convection naturelle	53
2.4.3	Approche numérique CFD.....	55
2.5	CONCLUSION.....	57
CHAPITRE 3 : simulation numérique de la circulation d'air dans un habitat.....		57
3.1	Introduction	58
3.1.1	Ecoulement laminaire.....	58
3.1.2	Ecoulement turbulent.....	59
3.2	Définition du problème	61
3.3	Equations gouvernantes de l'écoulement	62
3.4	Conditions aux limites.....	63
3.5	Simulation numérique	64
3.5.1	La méthode des volumes finis (MVF)	65

3.6	Présentation de Gambit et Fluent	66
3.6.1	Initiation au logiciel GAMBIT.....	66
3.6.1.1	Démarrage de Gambit	66
3.6.1.2	Construction de la géométrie.....	67
3.6.1.3	Réalisation du maillage.....	69
3.6.1.4	Exportation du maillage.....	71
3.6.2	Initiation au logiciel FLUENT	71
3.6.2.1	Importation de la géométrie	71
3.6.2.2	Vérification du maillage importé.....	72
3.6.2.3	Vérification de l'échelle.....	73
3.6.2.4	Affichage de la grille	73
3.6.2.5	Choix du solver	74
3.6.2.6	L'équation de l'énergie	75
3.6.2.7	Choix du modèle de l'écoulement	75
3.6.2.8	Définition des caractéristiques du fluide.....	76
3.6.2.9	operating conditions.....	77
3.6.2.10	Conditiond aux limites	78
3.6.2.11	Choix d'ordre des équations et l'algorithme	80
3.6.2.12	Lancement du calcul	80
3.7	Conclusion.....	81
	CHAPITRE 4 : résultats et interprétations	82
4.1	Résultats et interprétations.....	83
4.1.1	Maillage	83
4.1.2	Vitesse et température	84
4.1.3	Le temps.....	86
4.1.4	Le flux.....	97
	BIBLIOGRAPHIES	100

LISTES DES ACRONYMES ET NOMENCLATURE

Acronymes :

ASHRAE 55 : American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers

CIBSE : Chartered Institution of Building Services Engineers

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

CFD : computational fluid dynamics

MVF : Méthode des volumes finis

ISO : International Organization for Standardization

11Clo : Isolation vestimentaires

E : Est

S : Sud

N : Nord

W : Ouest

Nomenclature :

a : Coefficient d'absorption de couleur	[-]
A : Surface du mur Trombe	[m ²]
A _d : Surface du canal	[m ²]
A _v : Surface des orifices	[m ²]
C _s : Chaleur spécifique	[J/ Kg K]
c : La vitesse de la lumière	[m/s]
CLO : Unité d'isolement vestimentaire	[m ² °KW ⁻¹]

C_p : Chaleur spécifique d'air	[J/ kg .K]
D_f : Diffusivité thermique	[m ² /h]
E_f : Effusivité thermique	[W/ Km ² s ^{1/2}]
g : Constante gravitationnelle	[m/s ²]
Gr_H : Nombre de Grashof	[-]
H_T : Coefficient de transfert thermique	[W/m ² K]
H_P : Constante de Planck	[J. s]
H_D : Distance entre les orifices	[m]
h_c : Coefficient de convection	[W/m ²]
h_{rad} : Coefficient d'échange radiatif	[W/m ² K]
K : Constante de Boltzmann	[J/K]
L_c : Longueur caractéristique	[m]
m : Débit massique	[Kg/s]
Nu : Nombre de Nusselt	[W/m ² K]
Pr : Nombre Prandtl	[-]
Q : Flux thermique	[W]
Ra : Nombre de Rayleigh	[-]
S : Surface d'échange	[m ²]
T : Température	[K]
T_0 : Température de référence	[K]
T_1 : Température de la vitre	[K]
T_e : Température d'entrée	[K]

T_g : Température de la face externe du mur	[K]
T_g : Température globe noir	[K]
T_{in} : Température d'entrée	[K]
T_m : Température de l'air dans le canal	[K]
T_{mr} : Température moyenne radiante	[K]
$T_{sé}$: Température sèche	[K]
T_{SO} : Température de sortie	[K]
T_{Su} : Température de surface	[K]
v : Vitesse de l'écoulement	[m/s]
v_a : Vitesse de l'air	[m/s]
$Q_{cuisson}$: Valeur de gain de cuisson	[W]
$Q_{éclairage}$: Valeur moyenne de gain d'éclairage	[W]
$Q_{équipements}$: Valeur moyenne de gain d'équipements	[W]
Q_{int} : Valeur moyenne de gain interne	[W]
Q_{occ} : Valeur moyenne de gain des occupants	[W]

Symboles grec :

ρ_0 : Masse volumique à T_0	[Kg/m ³]
β : Coefficient de dilatation thermique	[k ⁻¹]
λ : Conductivité thermique	[W /m K]
Φ_{GLO} : Flux radiatif	[W]
φ : Densité de flux de chaleur	[W/m ²]

φ_{GLO} : Densité de flux radiatif	[W/m ²]
σ : Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² K ⁴]
ρ : Masse volumique	[Kg/m ³]
ε : Emissivité de la surface	[-]

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1	N° de page
Figure 1. 1 : Différents modes de transfert de chaleur	8
Figure 1. 2 : La relation entre l'enveloppe et les paramètres du confort thermique (L'agence internationale de l'énergie)	15
Figure 1. 3 : Valeur exprimée en Clo des tenues vestimentaire [17]	16
Figure 1. 4 : Valeur exprimée en Clo des tenues vestimentaire[17]	16
Figure 1. 5 : Température de l'air ambiant [21 ,22].....	19
Figure 1. 6 : Approche systémique du comportement thermique d'un bâtiment de logements	20
Figure 1. 7 : Gains thermiques internes d'un espace	20
Figure 1. 8 : Variation de température	22
Figure 1. 9 : Principe d'évolution des températures de surfaces intérieure et extérieure d'une paroi à forte inertie [24].....	24
Figure 1. 10 : L'inertie dans une maison passive [25]	25

Chapitre 2N° de page

Figure 2. 1 : Mur Trombe du parc national Zion, Utah Etats Unis, étudié par Torcellini et Pless (2004) [28].....	35
Figure 2. 2 : Principe du fonctionnement du mur trombe [29].....	36
Figure 2. 3 : La spécificité du mur Trombe [29]	37
Figure 2. 4 : Fonctionnement d'un mur thermique en hiver [30].....	39
Figure 2. 5 : Fonctionnement hiver : l'air extérieur est réchauffé par le mur Trombe	40
Figure 2. 6 : Fonctionnement d'un mur thermique pendant l'été [30]	41
Figure 2. 7 : Fonctionnement été : l'air intérieur est aspiré par le capteur	41
Figure 2. 8 : Schéma électrique du mur [34]	46
Figure 2. 9 : Evolution de la température interne du local avec deux méthodes pour l'évaluation du flux échangé par thermocirculation [35]	46

Figure 2. 10 : Influence de la thermocirculation sur la température interne du local	47
Figure 2. 11 : Evolution de la température du local en hiver [35]	48
Figure 2. 12 : Evolution de température la du local en été [35]	49
Figure 2. 13 : Schéma du phénomène de multi-réflexion du rayonnement CLO [36]	52
Figure 2. 14 : Illustration du profil d'écoulement vertical et de la vitesse moyenne dans une cavité chauffée [36].....	54

Chapitre 3N° de page

Figure 3. 1 : le nombre de Reynolds dans l'écoulement laminaire et turbulent	58
Figure 3. 2 : Profil de vitesse dans l'écoulement turbulent vs laminaire	60
<i>Figure 3. 3 : Mur trombe simple</i>	<i>Figure 3. 4 : mur trombe cannelé</i>
Figure 3. 5 : Conditions aux limites	63
Figure 3. 6 : Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel	65
Figure 3. 7 : Description bidimensionnel d'un volume fini	66
Figure 3. 8 : Lancement du Gambit	67
Figure 3. 9 : Réalisation de la géométrie sous GAMBIT	68
Figure 3. 10 : les opérations pour construire une géométrie	69
Figure 3. 11 : Maillage de la géométrie Définition des frontières du mur trombe simple	70
Figure 3. 12 : Maillage de la géométrie Définition des frontières du mur trombe cannelé	70
Figure 3. 13 : Exportation du maillage.....	71
Figure 3. 14 : Importation de la géométrie	72
Figure 3. 15 : Vérification du maillage sous Fluent.....	72
Figure 3. 16 : Vérification des unités	73
Figure 3. 17 : Affichage de la grille et vérification des conditions.....	74
Figure 3. 18 : Choix du solveur sous fluent.....	74
Figure 3. 19 : Equation de l'énergie.....	75
Figure 3. 20 : Choix du modèle d'écoulement	76
Figure 3. 21 : Définition des caractéristiques du fluide	76
Figure 3. 22 : Choix de la pression de référence	77

Figure 3. 23 : Valeurs des conditions aux limites	78
Figure 3. 24 : Vitesse d'entrée	78
Figure 3. 25 : Pression de sortie.....	79
Figure 3. 26 : Parois du mur trombe	79
Figure 3. 27 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme.....	80
Figure 3. 28 : Choix du nombre des itérations.....	81

Chapitre 4

N° de page

Figure 4. 1 : Maillage des géométries	83
Figure 4. 2 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=45$ s	84
Figure 4. 3 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=45$ s	85
Figure 4. 4 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=45$ s.....	85
Figure 4. 5 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=60$ s	86
Figure 4. 6 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=60$ s	87
Figure 4. 7 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=60$ s.....	87
Figure 4. 8 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=60$ s	88
Figure 4. 9 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=90$ s	88
Figure 4. 10 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=90$ s	89
Figure 4. 11 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=120$ s.....	89
Figure 4. 12 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=120$ s	90
Figure 4. 13 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=120$ s	90
Figure 4. 14 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=135$ s.....	91
Figure 4. 15 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=135$ s ...	91
Figure 4. 16 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=135$ s	92
Figure 4. 17 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=195$ s.....	92
Figure 4. 18 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=195$ s ...	93

Figure 4. 19 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=195s	93
Figure 4. 20 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps t=225 s.....	94
Figure 4. 21 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=225s ...	94
Figure 4. 22 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=225s	95
Figure 4. 23 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps t=240 s.....	95
Figure 4. 24 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=240s ...	96
Figure 4. 25 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=240s	96
Figure 4. 26 : Profils de la température pour différents flux de chaleur du mur trombe à la sortie du mur pendant le temps t=45 s.....	97

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1	N° de page
Tableau 1. 1 : Facteur d'absorption en fonction de la couleur (Source : J.L. Izard, 1993).....	13
Tableau 1. 2 : Paramètres influents sur la sensation du confort thermique.....	15
Tableau 1. 3 : vitesse de l'air, réaction, situation [18].....	18

Chapitre 2	N° de page
Tableau 2. 1 : les avantages et les inconvénients de mur trombe	38
Tableau 2. 2 : Flux par thermo-circulation	47

INTRODUCTION GENERALE

La première crise pétrolière du début des années 1970 a totalement modifiée le rapport des pays occidentaux avec l'énergie. L'énergie a toujours été un enjeu vital pour la société humaine. Les comportements humains sont fortement induits par son abondance ou sa rareté.

La prise de conscience de l'importance des enjeux liés à l'énergie (Réchauffement climatique, épuisement des ressources, augmentation des coûts de la santé,...) ont pris une part croissante dans la gestion énergétique mondiale.

Le secteur du logement est très responsable de la consommation d'énergie et de la pollution qu'elle génère. Par conséquent, Il est nécessaire de développer et élaborer des stratégies qui ont recours à la sobriété, l'efficacité et la renouvelabilité énergétique.

Au cours des dernières années, le soutien politique aux énergies renouvelables n'a cessé de croître au niveau international, parallèlement avec le développement des technologies nécessaires pour l'exploitation optimale des ressources énergétiques renouvelables [1].

L'Algérie possède un énorme potentiel d'énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, 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 naturelle 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 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 négligeant 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 deux géométries étudiées. La résolution, le traitement et le post traitement des résultats est réalisé par le code de calculs Fluent.

Les résultats numériques en termes de la vitesse et la distribution de la température sont données dans le **quatrième chapitre**. Le dépouillement des résultats pour chacun des deux modèles de mur trombe sont discutés pour différents temps de fonctionnements des deux modèles du mur Trombe. Nous achevons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre 1 : notions sur le confort dans un habitat et l'efficacité énergétique

1.1 Introduction

Aujourd'hui, l'énergie fossile est de plus en plus rare. La transition vers l'énergie verte modifie nos modes de production et de consommation d'énergie.

L'Algérie est apparemment le pays africain et méditerranéen avec le potentiel d'énergie renouvelable le plus important au niveau régionale, et la capacité la plus appropriée pour développer et exploiter ce potentiel. Un potentiel énergétique lié à plusieurs types de sources, mais dont l'énergie solaire reste la plus importante en disponibilité et en puissance et, sans doute aussi, la plus compétitive à développer à l'avenir sous différentes formes.

Le solaire thermique est basé sur l'utilisation de la chaleur transmise par le rayonnement qui est différente de celle du photovoltaïque où l'électricité qui est générée par l'énergie des photons. Grâce au progrès technologique, les techniques de capture directe d'une partie de l'énergie solaire sont considérablement améliorées afin de rendre les systèmes solaires plus fiables, efficaces et rentables [5].

Dans l'état actuel, le thème de l'efficacité énergétique, notamment dans le secteur du bâtiment, a une réelle opportunité de développement dans le monde. Le bâtiment devient soudainement un enjeu central des deux grands défis mondiaux: le changement climatique et l'approvisionnement énergétique.

Ainsi que la question du confort par rapport à la consommation d'énergie qui est très présente en architecture notamment dans l'habitat. En effet, on remarque que les bâtiments gèlent de l'intérieur. Autrement dit, ils cherchent à avoir leur propre système, à la fois en termes de température. Partout dans le monde, le secteur résidentiel est un secteur en plein essor, mais l'impact de ce secteur n'est pas neutre sur l'économie et surtout sur l'environnement car il a des demandes spécifiques en termes d'énergie.

Pour les bâtiments (résidentiel et tertiaire), les concepteurs doivent bien sûr continuer à offrir aux utilisateurs des logements et du confort, mais ils doivent également veiller à minimiser l'impact des bâtiments sur l'environnement.

On constate alors que cette notion de confort consiste à améliorer la qualité de vie et assurer notre bien-être, sans oublier en parallèle la réduction de nos dépenses en matière énergétique.

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous allons mettre en évidence d'une part, l'importance du confort (thermique) dans les milieux résidentiels et d'autre part, l'efficacité énergétique.

À ce propos, nous allons en premier lieu définir ce terme en montrant sa nécessité dans l'environnement, après nous allons baser sur le confort thermique dans un habitat en traitant les différents facteurs agissant sur le confort thermique des habitants. Ensuite, nous exposons d'une manière détaillée les paramètres du confort thermique. Enfin nous allons voir l'impact de l'inertie thermique sur le confort du bâtiment. Et on clôture ce chapitre avec une petite conclusion.

1.2 L'efficacité énergétique dans un habitat

Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie et deuxième émetteur de gaz à effet de serre, il présente donc des potentialités élevées d'économie. En Algérie, la consommation d'énergie finale au cours des dernières années, n'a cessé de progresser en raison de l'augmentation de la demande en énergie liée principalement au développement économique et à l'évolution du niveau de vie des Algériens. Notre pays connaît depuis près d'une décennie un développement intense et soutenu des secteurs du bâtiment et de la construction. Que ce soient pour les grands projets publics (1 million de logements sociaux, équipements socio-éducatifs, administratifs, ...) ou les grands projets immobiliers (résidentiels, tertiaires) et touristiques initiés par les promoteurs privés et publics, les exigences et normes internationales en matière de l'énergie et les performances environnementales des constructions ne sont pas encore suffisamment intégrées aux processus de conception et de construction, ce qui a justement incité les pouvoirs publics à rechercher la meilleure efficacité dans le bâtiment à travers plusieurs projets visant à améliorer le confort thermique dans les logements et à réduire la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation.

1.2.1 Qu'est-ce que l'efficacité énergétique ?

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

service dans les bâtiments, autrement dit la meilleure utilisation de l'énergie pour une qualité de vie constante [6].

La performance énergétique d'un bâtiment correspond au rapport entre l'énergie utile générée par le bâtiment et l'énergie utile qu'il absorbe. L'objectif est donc d'intégrer des solutions permettant l'optimisation des consommations sans diminuer le confort des occupants, ni compromis sur les capacités techniques des outils propres à l'activité du bâtiment [7].

1.2.2 Pourquoi l'efficacité énergétique est-elle nécessaire ?

En augmentant l'efficacité énergétique, nous utilisons moins d'énergie et nous réduisons du même coup les émissions de gaz à effet de serre, protégeant ainsi l'environnement. La sécurité de l'approvisionnement en énergie s'en trouve également renforcée. Et n'oublions pas qu'en adoptant des solutions favorisant l'efficacité énergétique, nous dépensons moins d'argent pour l'énergie.

1.3 Confort dans un habitat

1.3.1 Définition du confort

Le confort est le résultat de la sensation de bien-être au niveau physique et mental. Le confort dans la maison sera perçu par les sens tels que la sensation de froid ou de chaleur, l'odorat, l'ouïe (bruit), l'œil ou la vision (couleurs, équipements visuellement agressifs ou non,...). En effet, le confort dépend de nombreux facteurs en dehors de l'atmosphère il-même. Ces facteurs sont : la santé, l'âge, la façon de s'habiller, les habitudes, l'état psychologique du moment, etc. Il est donc presque utopique.

1.3.2 Le confort thermique dans un habitat

1.3.2.1 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 normal 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 à + 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 » [8].

La norme ASHRAE 55 définit le confort thermique comme « la condition d'esprit qui exprime la satisfaction en présence d'un environnement thermique donné » [9].

Le confort thermique concerne principalement la température intérieure des pièces, sa répartition harmonieuse dans l'espace et la qualité de l'air ambiant.

1.3.2.2 Température légale 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 [10].

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.

1.3.2.3 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 au convection.

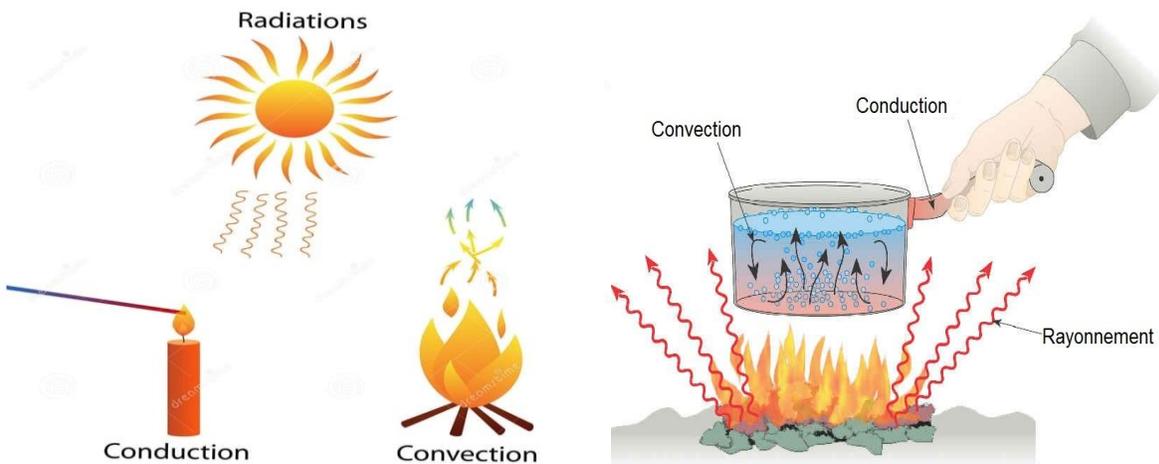


Figure 1. 1 : Différents modes de transfert de chaleur

- **Conduction** : C'est le transfert de chaleur en milieu opaque sous l'influence de la différence de température, sans déplacement de matière. La propagation de la chaleur à l'intérieur du corps humain s'effectue selon deux mécanismes différents: la transmission des vibrations atomiques ou moléculaires et la transmission des électrons libres [11].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de FOURIER : la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température.

$$\mathbf{q}'' = \lambda \nabla T \quad (1.1)$$

Où :

∇ : Opérateur gradient

λ : Conductivité thermique

La constante de proportionnalité λ est appelée conductivité thermique du matériau .Les valeurs de λ varient de 10^{-2} à 10^3 et s'exprime en (W /m. K) (= W/m.°C) .

T : Température (s'exprime en **K** ou °C).

• **Rayonnement** : Le rayonnement est le processus physique de transfert de chaleur sans support matériel. Par conséquent, entre deux objets, l'un est chaud et l'autre est froid, placé relativement (même séparé par un vide), la chaleur est transférée de l'objet chaud à l'objet froid par rayonnement: la chaleur libère le flux Φ_1 , Une partie du flux Φ_2 libéré par le corps froid est absorbé. Comme $\Phi_1 > \Phi_2$, l'équilibre du débit fait que le corps chaud dégage de l'énergie vers le corps froid. Inversement, un équilibre de flux peut être trouvé sur le corps froid, qui émet moins d'énergie que l'énergie absorbée.

La théorie de rayonnement repose sur l'hypothèse de Stefan-Boltzmann qui relie L'énergie totale $E(T)$ à la température du corps noir :

$$\mathbf{E}(T) = \sigma \mathbf{T}^4 \quad (1.2)$$

Avec σ une constante, appelée « constante de Stefan-Boltzmann » et qui vaut :

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5,670\ 400 \cdot 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (1.3)$$

où :

$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ est la constante de Planck.

$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ est la constante de Boltzmann.

• **Convection** : La convection est le mécanisme le plus important pour le transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le processus de transfert d'énergie par convection se déroule en plusieurs étapes et la température de surface est supérieure à la température du fluide environnant. Premièrement, la chaleur s'écoule de la surface vers les molécules de fluide adjacentes par conduction. L'énergie ainsi transférée est utilisée pour augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite, ces molécules se mélangeront avec d'autres molécules situées dans la région à basse température et transféreront une partie de leur énergie [12].

La théorie de la convection repose sur l'hypothèse de NEWTON : pour un écoulement à une température T_{∞} autour d'une structure à une température uniforme T_s de surface S , l'expression du flux de chaleur en convection est la suivante :

$$\Phi = h S (T_{Su} - T_{\infty}) \quad (1.4)[13]$$

Où :

Φ : Flux de chaleur est exprimé en Watts (**W**).

h : Le coefficient de transfert thermique s'exprime en **W/m²k**.

$(T_{Su} - T_{\infty})$: Différence de température entre le corps et le fluide s'exprime en **K**.

S : Surface d'échange s'exprime en **m²**.

1.3.2.4 Différents facteurs agissant sur le confort thermique

1.3.2.4.1 L'orientation

B. Givoni[14] 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.

1.3.2.4.2 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 négliger, car elle augmente les pertes par convection [15].

1.3.2.4.3 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 à 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.

1.3.2.4.4 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 (V. Olygay (1963) [16]), 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.

1.3.2.4.5 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, dans (Tableau 1.1) [17], le coefficient d'absorption sera donné en fonction de sa catégorie.

Tableau 1. 1: Facteur d'absorption en fonction de la couleur [17]

Catégorie	Claire	Moyenne	Sombre	Noire
Absorptivité	$a < 0.5$	$0.5 < a < 0.7$	$0.7 < a < 0.9$	$a > 0.9$
Couleurs	Blanc, Crème, Orange, Rouge clair	Rouge sombre, Vert clair, Bleu clair	Brun, Vert sombre, Bleu vif, Bleu sombre	Noir, Brun sombre

1.3.2.4.6 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'appliqués 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 doivent être protégés, tandis que ceux exposés 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 capacité de traverser les ouvertures vitrées et réchauffe ainsi les façades. Notant que ces façades bénéficient du soleil levant et couchant en toute saison [18].

1.3.2.5 Facteurs ayant une incidence sur le confort thermique

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

1.3.2.5.1 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.

1.3.2.5.2 Humidité de l'air

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

1.3.2.5.3 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.

1.3.2.6 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 2.2). La mesure d'amélioration la plus économiquement raisonnable est d'intervenir au niveau de l'enveloppe du bâtiment pour atteindre la performance énergétique [19,20].

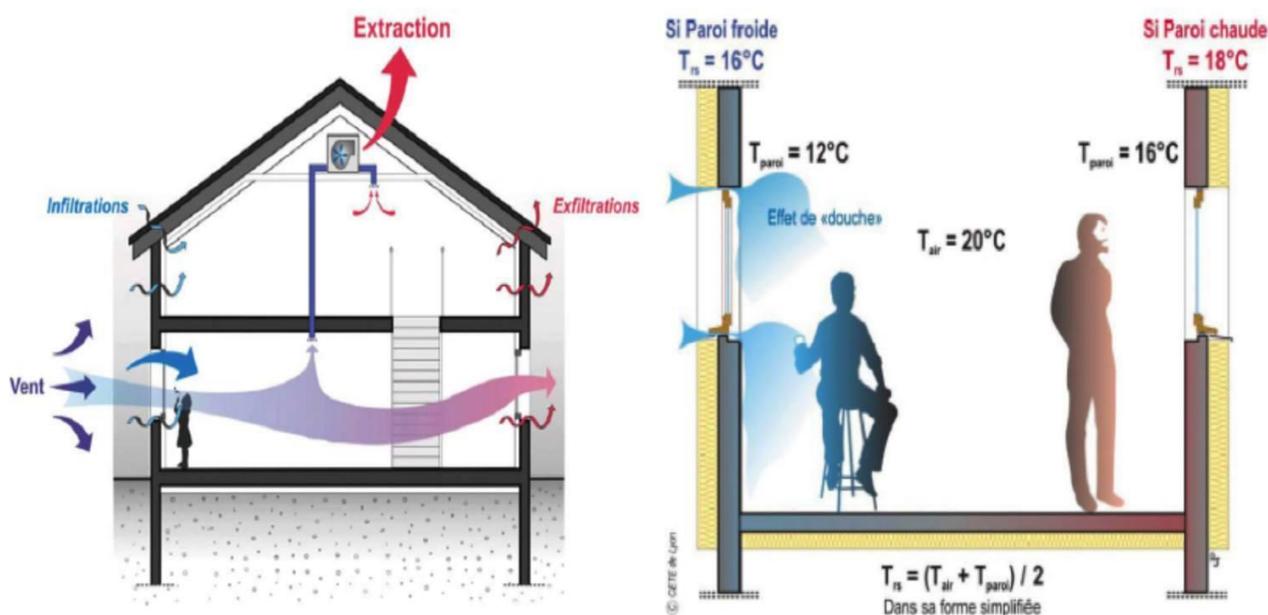


Figure 1. 2 : La relation entre l'enveloppe et les paramètres du confort thermique (L'agence internationale de l'énergie)

1.3.2.7 Les paramètres du confort thermique

La sensation de confort thermique est en fonction de plusieurs paramètres donnés par le tableau (A) ci-dessous :

Tableau 1. 2 : Paramètres influents sur la sensation du confort thermique [19,20]

Paramètres liés à l'individu	L'activité physique et l'habillement
Paramètres liés à l'environnement	La température de l'air, les sources de rayonnement (radiateurs, soleil), température de surfaces environnementales, la vitesse relative de l'air par rapport au sujet et l'humidité de l'air
Autres influences	Les gains thermiques internes, degré d'occupation des locaux, couleur, ambiance,...etc

Paramètres liés à l'individu

• **La vêtue (habillement)** : Les vêtements jouent un rôle majeur dans l'isolation thermique, en particulier en hiver et dans tous l'ambiance froide. Cet effet est pris en compte en définissant l'indice de vêtements dans Clo11 qui représente la résistance à la chaleur des vêtements. Naturellement, la couture des vêtements et le mouvement des objets affectent également ces échanges de chaleur avec l'environnement.

11 Clo : Unité d'isolement vestimentaire, $1\text{Clo}=0.155\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$

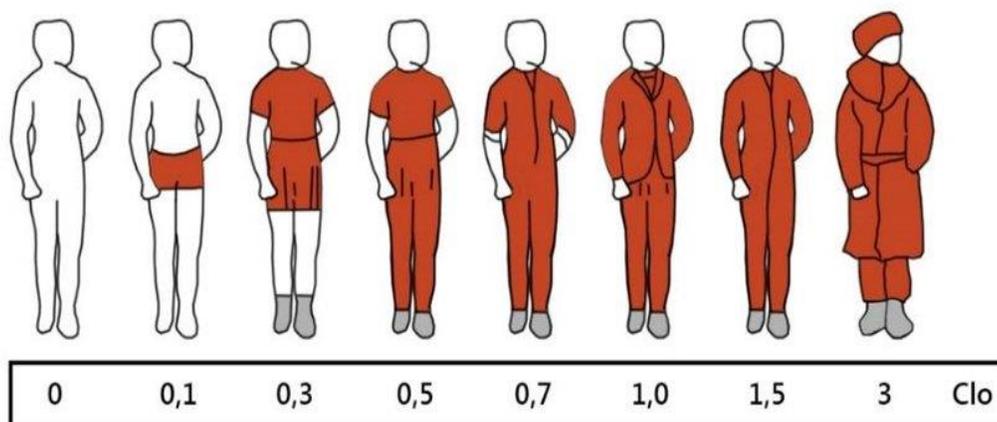


Figure 1. 3 : Valeur exprimée en Clo des tenues vestimentaire[21]



Figure 1. 4 : Valeur exprimée en Clo des tenues vestimentaire[21]

• **L'activité** : C'est le paramètre de base de la sensation thermique d'un individu et définit directement le métabolisme 13 de l'individu, qui est la qualité de la chaleur produite par le corps humain. Dans des conditions très actives, il peut provoquer une gêne thermique même dans des conditions météorologiques très favorables.

Paramètres liés à l'environnement :

• **Température de surface** : C'est la moyenne des températures de surface des parois qui entourent la personne.

• **La température de l'air ambiant** : La température de l'air ou température est un paramètre essentiel du confort thermique. Il participe à l'évaluation de l'équilibre thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs, conductifs, conducteurs et respiratoires. Dans une pièce, la température de la zone n'est pas uniforme, les différences des températures de surface se produisent également dans le plan près des surfaces froides et des corps de chauffe.

• **Température moyenne radiante (T_{mr})** : D'abord ce terme désigne la température de l'air mesurée à l'abri de tout rayonnement à une hauteur d'environ 1.50 mètre du sol.

- Température moyenne rayonnante moyenne pondérée des températures des parois.
- La température uniforme du corps noir, avec laquelle l'unité échange la même quantité de chaleur que dans son environnement immédiat.
- On peut obtenir cette valeur avec un thermomètre de globe noir ou capteur de température globe noir (T_g) la température sèche (T_s) et la vitesse de l'air (v_a).

$$T_{mr} = T_g + 0,24(T_g - T_{sé}) + v_a^{1/2}(1.5)$$

• **La vitesse de l'air** : la vitesse de l'air joue un grand rôle dans les échanges convectifs et évaporatoires, elle intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès qu'elle est supérieure à 0.2m/s. toutefois, à l'intérieur des bâtiments, ces vitesses demeurent limitées, ne dépassant pas généralement cette vitesse, sauf en cas de mauvaise conception du bâtiment ou du système d'aération. Elle peut, en revanche être tenue pour responsable de l'application

d'inconforts locaux, liées à la présence de courants d'airs froids ou chauds localisés. A titre de comparaison : marcher à une vitesse de 1 km/h produit un déplacement d'air de 0.3m/s sur le corps .Le mouvement de l'air abaisse la température du corps, facteur recherché en été, mais pouvant être gênant en hiver (courants d'air) .Condition hivernale :

De façon plus précise :

Tableau 1. 3 : vitesse de l'air, réaction, situation [22]

Vitesses résiduelles	Réaction	Situation
0 à 0.08 m/s	Plaintes quant à la stagnation de l'air	Aucune
0.13 m/s	Situation idéale	Installation de grand confort
0.13 à 0.25 m/s	Situation agréable, mais à la limite du confort pour les personnes assises en permanence.	Installation de confort
0.33 m/s	Inconfortable, les papiers légers bougent sur les bureaux.	Grandes surfaces et magasins
0.38 m/s	Limite supérieure pour les personnes se déplaçant lentement	Grande surfaces et magasins
0.38 à 0.5 m/s	Sensation déplacement d'air important.	Installations industrielles et usines où l'ouvrier est en mouvement

- **L'humidité de l'air** : L'humidité relative de l'air affecte les échanges évaporatifs de la peau, elle détermine la capacité d'évaporation de l'air et donc l'efficacité de refroidissement de la sueur. Selon A. Liébard, une humidité relative comprise entre 30% et 70% a peu d'effet sur le confort thermique. Une humidité trop élevée va interférer avec la régulation de la température de l'organisme, car l'évaporation à la surface de la peau ne se produit plus, donc Transpiration accrue et plus d'inconfort [23,24].

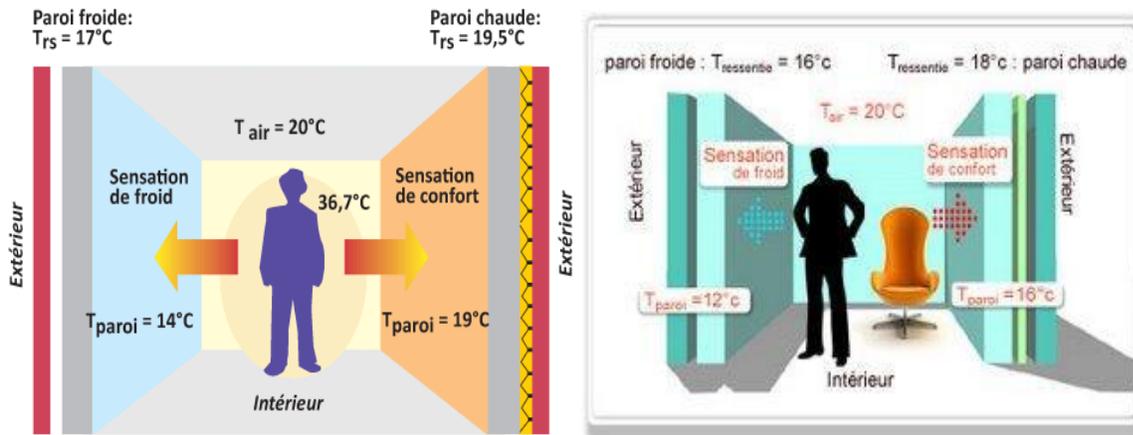


Figure 1. 5 : Température de l'air ambiant[25 ,26]

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 1.6). 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 :

$$Q_{int} = Q_{occupants} + Q_{éclairage} + Q_{équipements\ électriques} + Q_{cuisson} \quad (1.6)$$

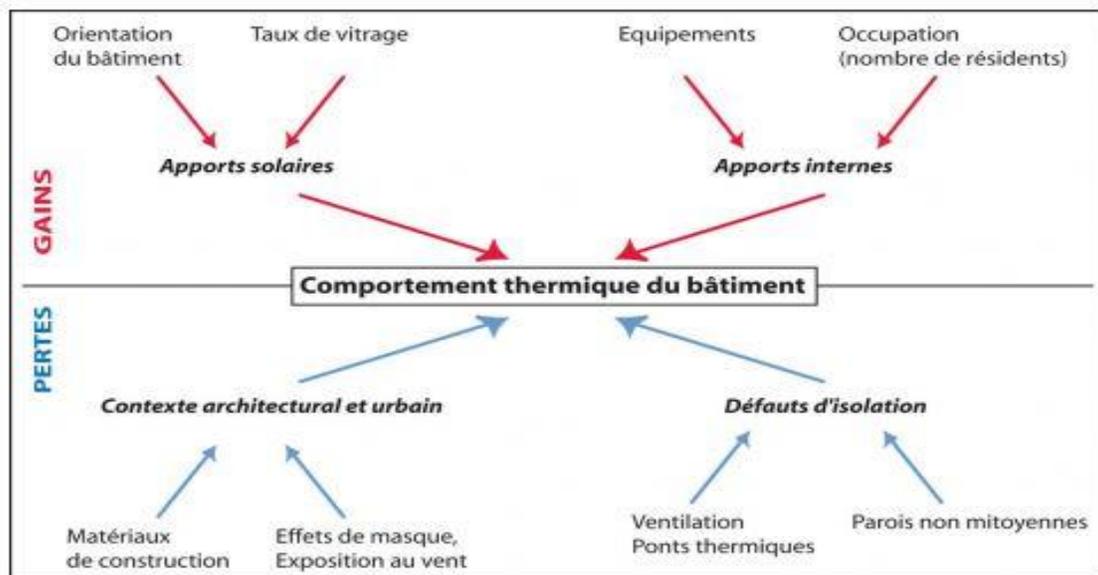


Figure 1. 6 : Approche systémique du comportement thermique d'un bâtiment de logements

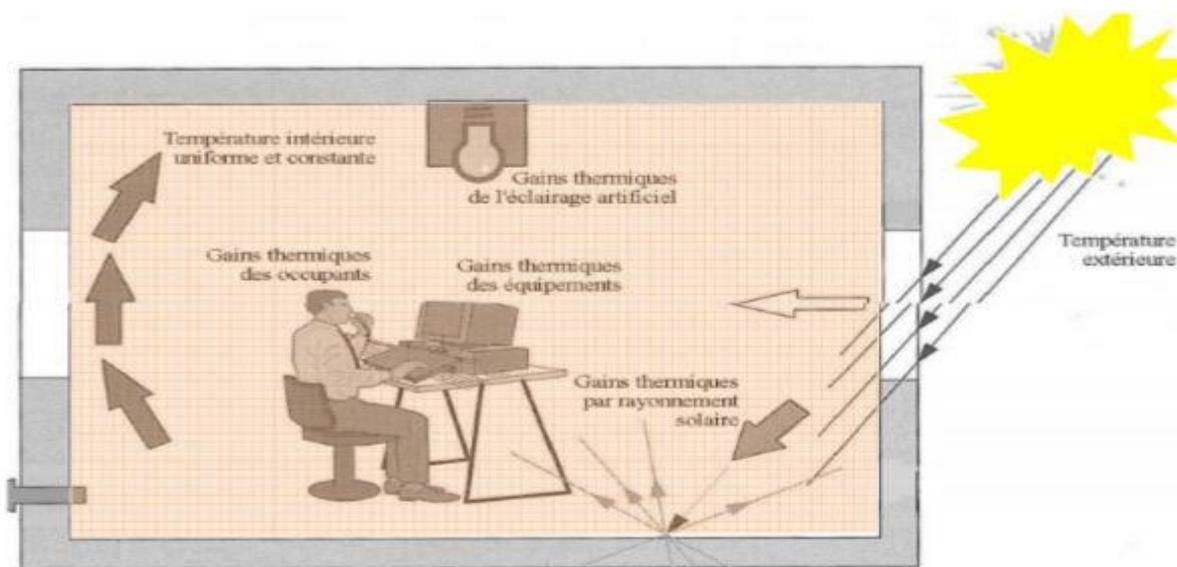


Figure 1. 7 : Gains thermiques internes d'un espace

• 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 murs 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.

1.3.2.8 Impact de l'inertie thermique sur le confort du bâtiment

L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à stocker et à libérer de l'énergie thermique dans sa structure, quelle que soit la saison. Elle se caractérise par sa capacité thermique et exprime flux de chaleur échangé par les murs du bâtiment avec son atmosphère intérieure, par mètre carré de sol : $W/m^2 \cdot K$ par m^2 . Autrement dit, elle est derrière l'intelligente relation qui

repose sur la bonne compréhension des échanges thermiques entre le dedans et le dehors. (Elle définit la vitesse à laquelle le bâtiment se réchauffe ou se refroidit).

L'inertie thermique d'un mur est sa capacité à la fois à accumuler de la chaleur (ou de la fraîcheur) et à la restituer, avec un déphasage en fonction des caractéristiques physiques, dimensionnelles et environnementales du mur de stockage. Plus l'inertie d'un mur est grande, plus il stocke des quantités importantes de chaleur (ou de fraîcheur), puis les libère, compensées par les variations de température extérieure.

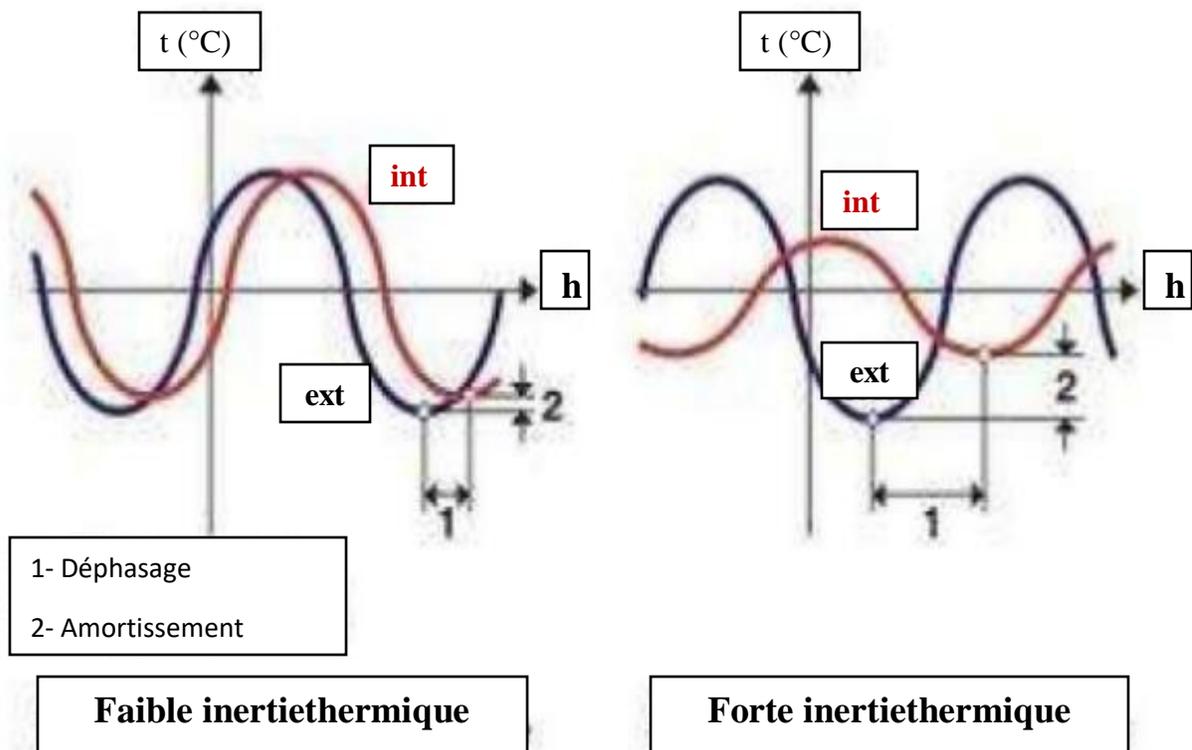


Figure 1. 8 : Variation de température

1.3.2.8.1 Les paramètres de l'inertie

Les paramètres de l'inertie thermique d'un matériau se caractérisent par 2 valeurs :

1- La diffusivité thermique

(Df, en m²/h) : elle caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage, par conduction, dans un corps. Plus elle est faible, et plus le déphasage est important.

$$\text{Diffusivité : } Df = \lambda / (\rho \cdot c) \quad (1.7)$$

2- L'effusivité thermique

(Ef, en w/K.m².s^{1/2}) : Elle caractérise la capacité des matériaux à réagir plus ou moins rapidement à un apport de chaleur intérieur au logement (provenant d'une source interne ou du rayonnement solaire). Plus l'effusivité est grande, et plus vite la chaleur interne sera absorbée par le mur, plus l'élévation de la température sera limitée. Une grande effusivité implique une grande capacité thermique du mur, dont la température ne s'élève que lentement.

$$\text{Effusivité : } Ef = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (1.8)$$

Avec : λ : conductivité (W/m. K) ρ : masse volumique (kg/m³)

c : chaleur spécifique (J/ (kg.K)) [27]

1.3.2.8.2 Optimisation de l'inertie

Associe les 3 caractères suivants :

- Une forte chaleur spécifique (murs et planchers lourds en contact avec l'air intérieur) ;
- Une conductivité élevée (murs en matériau "absorbant") ;
- Une grande surface d'échange.

1- La capacité thermique massique ou chaleur spécifique

Il s'agit de la quantité de chaleur qui doit être fournie à l'unité de masse pour voir sa température augmenter d'un degré. Un matériau « stocke » plus d'énergie que lorsque sa chaleur spécifique est élevée.

2- La conductivité thermique des matériaux

La conductivité thermique est la quantité de chaleur transférée par unité de temps par un matériau avec une unité de surface et une unité d'épaisseur lorsque deux surfaces opposées diffèrent d'une unité de température.

Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur, plus il est petit, plus le matériau est isolé.

3- La surface d'échange

L'inertie d'un mur dépend également de la surface d'échange. Un mur transversal intérieur a deux fois plus de surface d'échange utile qu'un mur en contact avec l'extérieur. Les volumes compacts ont une petite surface d'échange. [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.

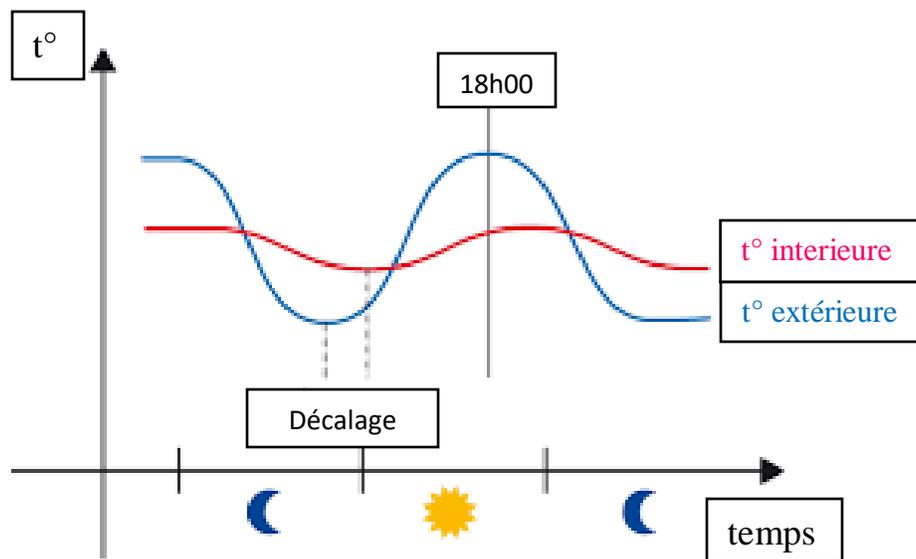


Figure 1. 9 : Principe d'évolution des températures de surfaces intérieure et extérieure d'une paroi à forte inertie[28]

1.3.2.8.3 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.

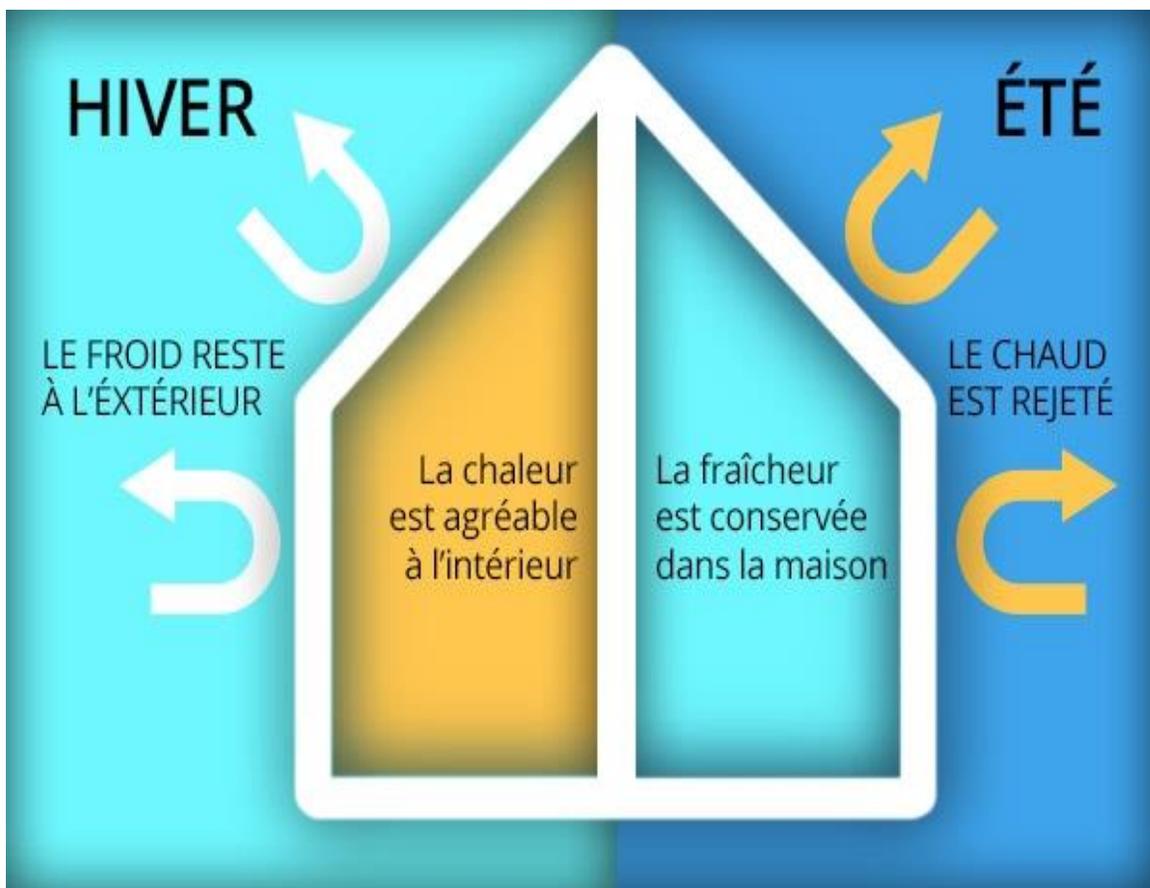


Figure 1. 10 : L'inertie dans une maison passive[29]

1.4 Conclusion

Le bâtiment est considéré comme un secteur clé de l'économie, fortement consommateur d'énergie et émetteur de gaz à effet de serre. On constate que la climatisation et le chauffage consomment une quantité importante en matière d'énergie. Pour atteindre une meilleure efficacité énergétique dans les bâtiments, un fonctionnement rationnel et le remplacement progressif des sources d'énergie traditionnelles par des énergies renouvelables doivent faire partie des objectifs de toute politique énergétique rentable.

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.

De ce fait pour assurer un équilibre entre ces deux dernière une architecture consciente de l'énergie et une approche intelligente des problèmes énergétiques devrait commencer par l'intégration du mur Trombe qui consiste à chauffer l'air avec le soleil puis le diffuser dans le bâtiment, c'est ce que nous allons développer dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2 : Le mur trombe et chauffage des habitats

2.1 Introduction :

Le soleil peut jouer plusieurs rôles dans l'habitat. Il peut nous éclairer le jour à travers les fenêtres, comme il peut également nous éclairer la nuit si nous avons capté et stocké de l'énergie par des accumulateurs.

Dans notre Algérie, le chauffage et la climatisation sont les éléments les plus importants du budget énergétique domestique, notamment dans le secteur du logement qui porte une part importante des responsabilités en matière de consommation d'énergie et de pollution qu'il génère. Pour cela nous nous limiterons à l'étude du chauffage et de la climatisation par voie solaire pour minimiser la consommation d'énergie et pour un confort agréable. Il est donc nécessaire de développer des stratégies qui utilisent la sobriété énergétique, l'efficacité et les énergies renouvelables.

L'addition d'un système de chauffage solaire passif à un logement est une solution intéressante qui permet d'économiser et d'utiliser l'énergie de manière rationnelle. Parmi ces systèmes, celui développé par le professeur Trombe et qui consiste à placer un lourd mur de maçonnerie orienté plein sud derrière le vitrage et à le doter de deux orifices.

A travers le premier chapitre, nous avons pu identifier précisément le confort thermique interne, nous avons traité en détail ces différentes approches, méthodes et indices d'évaluation dans les milieux d'habitation.

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 Schéma de principe du mur trombe

2.2.1 Qu'est ce que c'est le mur trombe ?

C'est au cours des années 1950 à 1970 qu'a réellement été testé le mur Trombe, par le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel qui sont à l'origine de la création de ce

mur qui porte leurs noms, le mur Trombe, également appelé mur Trombe-Michel. Il est particulièrement adapté aux constructions bioclimatiques dont le but de limiter les besoins en chauffage et de faire un usage optimal de l'énergie climatique. Sa méthode repose sur l'exploitation du phénomène de tirage thermique pour chauffer une pièce. Il s'agit de capter l'énergie solaire incidente puis de la redistribuer dans les bâtiments associés.



Figure 2. 1 : Mur Trombe du parc national Zion, Utah Etats Unis, étudié par Torcellini et Pless (2004)[30]

2.2.2 Définition

Le mur Trombe est un système simple et intéressant qui repose sur le solaire passif, son objectif consiste à valoriser le rayonnement du soleil en associant deux propriétés physiques : l'inertie thermique du mur et l'effet de serre à travers un vitrage. Il est constitué d'un mur entièrement plein vertical en maçonnerie lourde (souvent composé de béton ou de pierre dans quelques cas) orienté vers le sud et muni de deux orifices permettant la circulation de l'air entre la pièce et la serre formée par la surface de réception du mur et le vitrage qui le précède. Grâce à ce vitrage, la chaleur captée auprès du soleil bénéficie de ce que l'on appelle l'effet de serre et se restitue à travers le béton et la pierre, puis ensuite au cœur de tout le logement équipé.

2.2.3 Principe de fonctionnement

Le mur Trombe est constitué d'une partie en béton devant laquelle on dispose un vitrage en laissant un espace de lame d'air. Il a des ouvertures en haut et en bas pour faire circuler l'air.

Le fonctionnement du mur Trombe est différencié en été et en hiver ; il transmet les rayons solaires captés par les trois moyens de transfert de chaleur ,une partie est transmise par conduction à travers le mur qui est peint dans une couleur sombre pour une meilleur absorption , où il la restitue à l'intérieur du local par convection , la deuxième partie se transmet par circulation de l'air chaud se trouvant dans la cheminée solaire à travers les orifices (la chaleur piégée entre le mur et la vitre). Alors que la troisième se transmet par rayonnement.

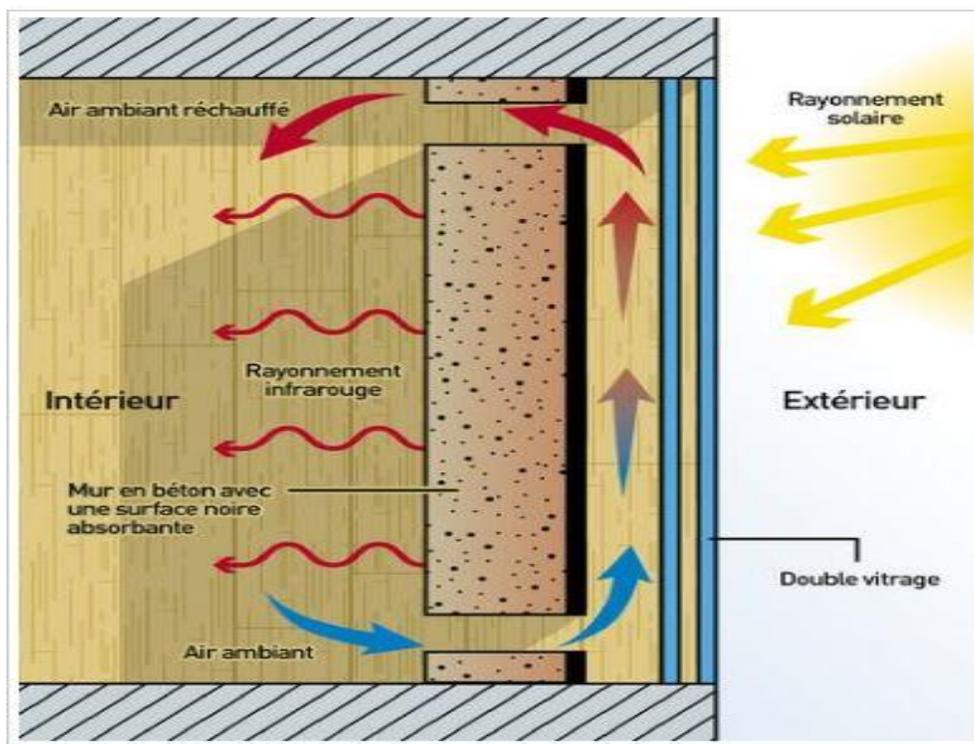


Figure 2. 2 : Principe du fonctionnement du mur trombe[31]

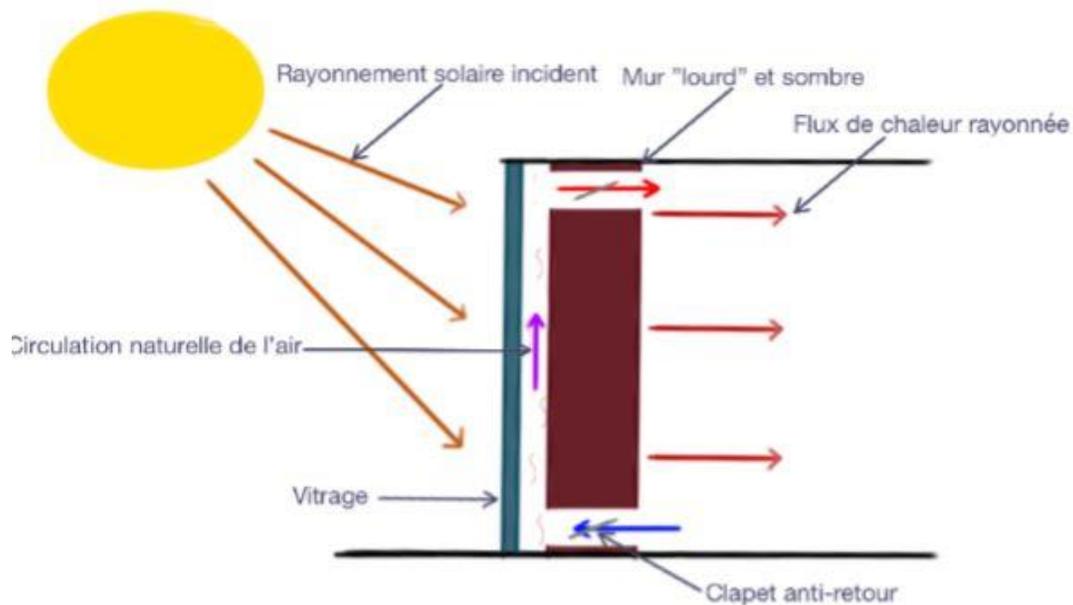


Figure 2. 3 : La spécificité du mur Trombe[31]

Toute différence de température dans le fluide, le liquide ou le gaz, change sa densité et un mouvement d'agitation apparaît. Ce mouvement dans lequel les parties les plus chaudes du fluide ont tendance à s'élever et les parties froides et denses à descendre, s'appelle la convection. Ce dernier est observé entre le fluide en mouvement et la paroi, phénomène principal dans la plupart des échangeurs de chaleur.

Même si les trois processus peuvent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est habituellement primordial. Parmi eux, l'échange de convection est la partie principale du transfert de chaleur, car le phénomène de convection est omniprésent dans la vie quotidienne.

Le mur Trombe est utilisé différemment selon les saisons et la période de la journée.

2.2.4 La réponse du mur Trombe aux besoins de chauffage

La première maison à avoir bénéficié d'un mur Trombe est celle de M. Trombe lui-même. Cette dernière, construite en 1962, la quasi-totalité de la façade Sud est constituée d'un tel mur qui permet d'assurer 70% des besoins en chauffage de la maison.

Avec les progrès techniques au niveau des vitrages et des systèmes d'automatisation, le rendement d'une telle installation est de 30 à 40% des apports solaires. Par conséquent, la capacité du système à répondre aux besoins des maisons dépend en grande partie de l'ensoleillement de la région.

Enfin, comparé à d'autres systèmes de chauffage passifs, le mur Trombe possède des avantages indéniables. Le système le plus simple et le plus répandu est évidemment la baie vitrée performante. Le mur Trombe peut être complété pour lui donner une plus grande liberté architecturale. Il peut également bénéficier du déphasage de la chaleur, de sorte que la maison peut être chauffée toute la nuit, ce qui ne permet pas la baie vitrée seule.[31]

2.2.5 Mur trombe : Avantages et inconvénients [31]

Tableau 2. 1 : les avantages et les inconvénients de mur trombe

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Pas de réglementation.	Système assez complexe a mettre en œuvre.
Possibilité d'automatiser tout le système.	Peut être contraignant : fermeture et ouverture des clapets, des volets, manuellement.
Système passif, propre.	Nettoyage du vitrage difficile, la convection du mur favorisant la poussière si on ne prévoit pas des filtres, des clapets antiretour et des ventilateurs.
	Manque d'esthétisme.
Réduction de la facture énergétique.	Très onéreux à mettre en place en raison de l'étude en amont et de l'installation.

2.3 Le fonctionnement d'un mur Trombe

2.3.1 Fonctionnement de la paroi thermique en hiver

Le concept de la paroi thermique est lié à la paroi du thermosiphon, dans lequel l'air chaud qui est entre le verre et le mur est en train de changer avec l'air généralement plus frais qui se trouve dans l'espace derrière le mur.

Pendant la journée, lorsque le soleil frappe la surface transparente ; le rayonnement solaire passe à travers le verre et atteint la surface sombre de la paroi. Une partie de la chaleur générée est absorbée par le mur et distribuée à l'intérieur, tandis que le reste est piégé dans l'espace entre le verre et le mur. Selon la deuxième loi de la thermodynamique, une partie de la chaleur produite est consommée en chauffant l'air froid qui est entre le verre et le mur. L'air le plus chaud a tendance à se soulever. Jusqu'à présent, le processus est similaire pour tous types de murs solaires (masse, l'eau, les murs de Trombe).

L'innovation du mur Trombe est que la partie supérieure est conçue avec des événements, la partie inférieure de la paroi fait circuler l'air. La circulation de l'air est basée sur l'air chaud circulant de ventilation supérieure vers l'espace derrière le mur. En même temps, le refroidisseur d'air passant par les événements inférieurs tend à combler le vide d'air créé.

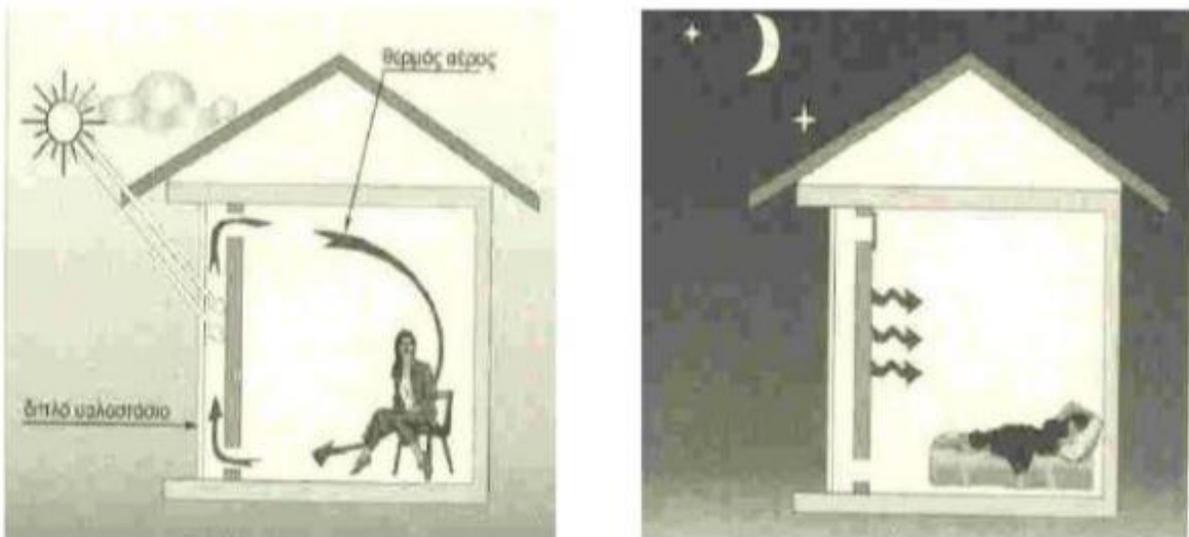


Figure 2. 4 : Fonctionnement d'un mur thermique en hiver [32]

Pendant la nuit , une circulation d'air inversée se produit, ce qui signifie qu'il doit être prévu de façon à fermer les événements pour empêcher la circulation inverse de l'air empêchant ainsi les pertes de chaleur. La combinaison de la désactivation du système et de la fermeture des événements muraux, qui agissent maintenant comme un mur de masse, et l'isolation de la nuit, se compose des conditions de base pour contrôler et réduire les pertes de chaleur surtout pour la nuit que pour les jours sombres avec un manque de radiation solaire.

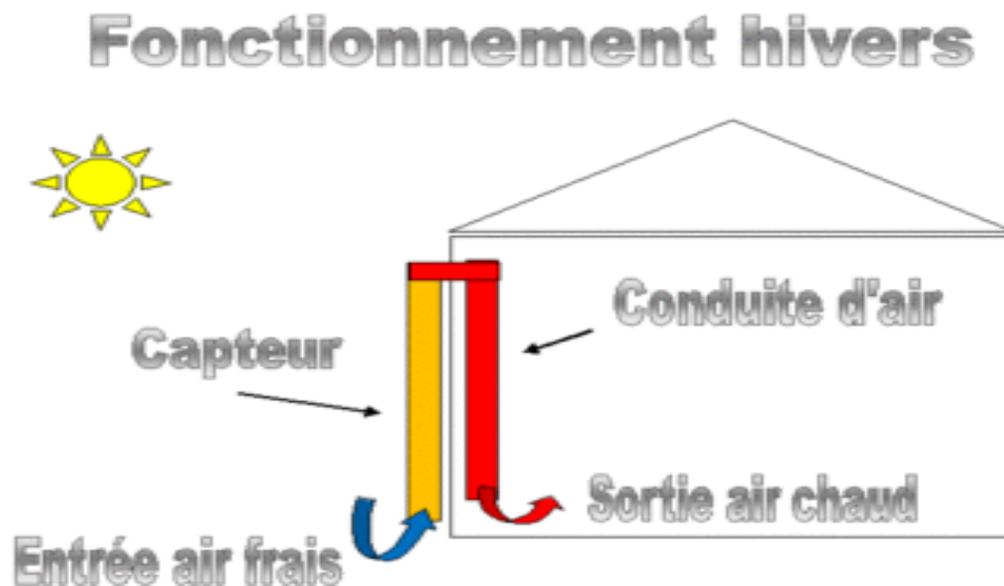


Figure 2. 5 : Fonctionnement hiver : l'air extérieur est réchauffé par le mur Trombe

2.3.2 Fonctionnement de la paroi thermique en été

La plupart des systèmes solaires passifs peuvent être désactivés pendant l'été, ou fonctionnent au verso ; fournir de refroidissement au lieu de chauffage. Par conséquent, le mur thermique avec ou sans événements (mur de masse) offre la possibilité de refroidissement en été pour lequel il existe trois manières d'opérer :

-Fournir un effet d'ombrage élimine presque la possibilité de stockage thermique. Cela peut produire à la fois au mur de masse ou Trombe.

-Retrait de l'air chaud en ouvrant les grilles supérieure et inférieure du vitrage du mur isolant.

-Le flux d'air peut être généré en ouvrant l'ouverture de l'orifice supérieur du vitrage et l'orifice inférieur de la paroi inférieure de la paroi, cela a un effet "cheminée solaire ".En enlevant l'air entre le vitrage et me mur, une basse pression d'air peut créer ce qui aspire l'air intérieur à l'extérieur.

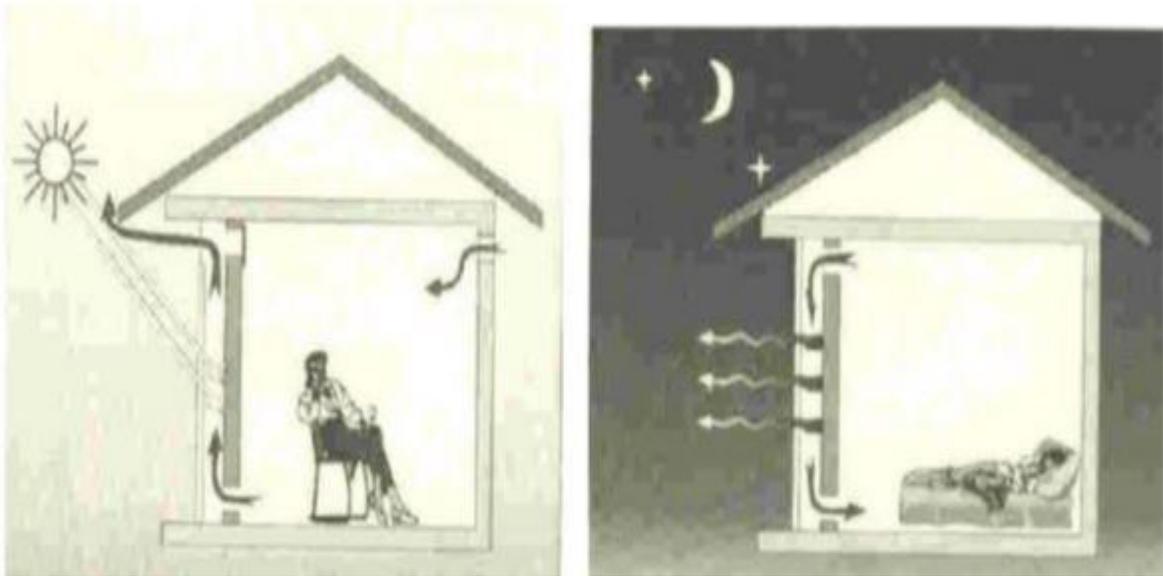


Figure 2. 6 : Fonctionnement d'un mur thermique pendant l'été [32]

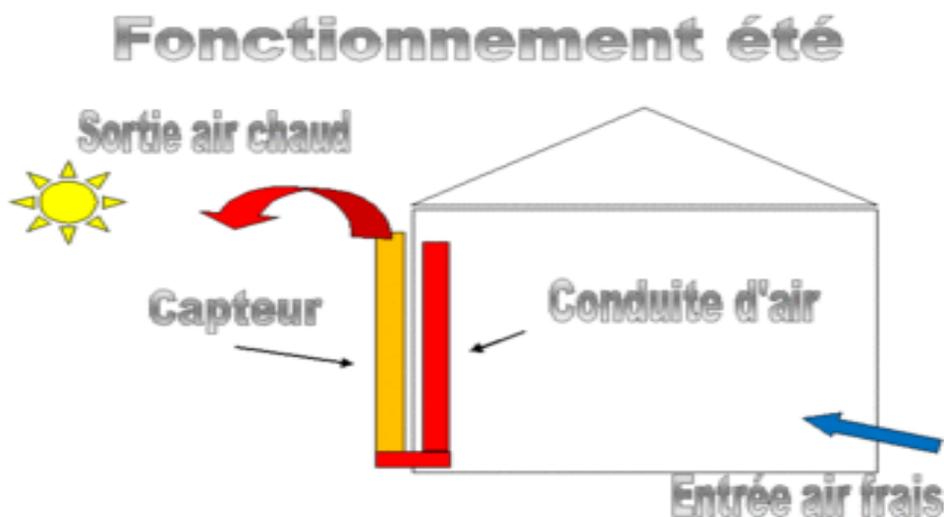


Figure 2. 7 : Fonctionnement été : l'air intérieur est aspiré par le capteur

2.3.3 Calcul de l'inertie thermique

L'inertie thermique est liée à la masse thermique des matériaux .La pierre par exemple est plus difficile à monter en température que le métal, mais une fois chauffée, elle mettra plus de temps à se refroidir.

Ce phénomène est très intéressant dans l'habitat :

Les murs épais et massifs permettent de réguler la température sur un cycle de 24h, mais aussi à l'échelle des saisons, de vivre toute l'année dans une ambiance thermique confortable et relativement constante. Lors des pics de chaleur (ou de froid), la température intérieure ne varie pas, ou très peu.

Voici quelques formules pratiques pour estimer la contribution de la chaleur du système du mur Trombe.

2.3.3.1 Circulation de la chaleur

$$Q_t = V \times d \times C_p \times (T_{so} - T_e) \quad (2.1)$$

Où :

V : vitesse d'écoulement d'air (m/s)

d : densité de l'air (kg / m³)

C_p : chaleur spécifique de l'air (kJ /kg .K)

T_{so} : température de sortie d'air (K)

T_e : température d'entrée d'air (K)

2.3.3.2 Radiation

$$Q_r = \frac{e}{2-e} \times \sigma (T_f^4 - T_{ref}^4) \quad (2.2)[33]$$

Où :

ϵ : Facteur d'émission des murs intérieurs

σ : Stefan-Boltzmann constant ($20.41 \times 10^6 \text{ kJ/h}^2\text{k}^4$)

T_f : Température de la surface intérieure de la paroi Trombe

T_{ref} : Température moyenne des parois (surface des murs à l'intérieur)

2.3.4 Masse thermique du mur trombe

L'épaisseur appropriée de la masse thermique est indispensable pour que le système fonctionne efficacement. la transmission de chaleur dans l'espace intérieur peut être instantanée ou peut être reportée à une période de 16 heures.

L'inertie thermique de la transmission pendant la nuit et le rayonnement solaire diurne est proportionnel à la capacité thermique pour un mètre carré de la masse thermique, mais elle diminue en fonction d'augmentation de la conductivité du matériau. L'utilisation de béton ordinaire dans les prototypes Odeillo a entraîné une vitesse de transfert d'environ 3.7-4.0 cm/h.

Analytiquement :

- 60 cm de béton : 14 – 16 heures
- 45 cm de béton : 11 – 12 heures
- 37 cm de béton : 9 - 10 heures

La même capacité thermique par unité de surface peut être entraînée aussi avec des pierres, des briques pleines ou des dalles. La réduction de la masse thermique, le système tend à fonctionner comme un collecteur d'air avec principalement l'effet de la circulation de la chaleur.

Un autre facteur important de la transmission de la masse thermique est le coefficient d'émissivité de la surface interne. [33]

2.3.5 Thermocirculation

La thermo-circulation c'est un mode ascendant de circulation de l'air dû à l'échauffement de parois sous l'effet du soleil.

Le mur collecteur transmet l'énergie solaire collectée par deux moyens, une partie est conduite par conduction à travers le mur et renvoyée à l'intérieur du local par convection. La seconde partie est transmise par la circulation naturelle de l'air chaud trouvée dans la cheminée solaire à travers les ouvertures. Le débit de cet air peut être calculé à partir de la relation suivante : [34]

$$m = \rho A_d \sqrt{\frac{2gH(T_m - T_{in})}{C T_m}} \quad (2.4)$$

Avec :

m : débit massique (Kg/s)

A_d : surface du canal (m^2)

H : distance entre les orifices (m)

g : constante gravitationnelle (m/s^2)

T_m : température de l'air dans le canal (K)

T_{in} : température d'entrée (K)

C : chaleur spécifique (J/Kg.K)

$$C = C_1 \cdot \left(\frac{A_d}{A_v}\right)^2 + C_2 \quad (2.5)$$

Avec :

A_d : surface du canal (m^2)

A_v : surface des orifices (m^2)

Où :

$$C_1 = 8 \text{ et } C_2 = 2$$

Deux approches différentes pour le calcul de température le long de la cheminée solaire ont été utilisées. Les deux résultats expérimentaux ont été tirés d'un essai en Toscane en Italie sur un local qui présente les caractéristiques suivantes :[35]

Surface du mur Trombe : 32.5 m²

Epaisseur du mur Trombe : 60 cm

Surface des orifices de circulation : 5% de la surface du mur Trombe

Volume de la pièce : 244 m³

Première approche :

La variation de la température de l'air le long de la cheminée solaire (T_m) est supposée être linéaire.

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT_m}{dt} = h_c \cdot (T_1 - T_m) + h_c \cdot (T_g - T_m) \quad (2.6)$$

Avec :

h_c : coefficient de convection (W/m²)

T_1 : température de la vitre (K)

T_g : température de la face externe du mur (K)

Deuxième approche :

La variation de T_m est supposée être non linéaire [36]

$$T_m = T_{in} + \left(\frac{2 \cdot T_{in} - (T_1 - T_g)}{2} \right) \cdot \left(-\frac{m C_p}{2 \cdot h_c \cdot A} \cdot \exp \left(-\frac{2 \cdot h_c \cdot A}{m C_p} \right) - 1 \right) \quad (2.7)$$

Avec :

A : surface du mur trombe (m²)

Afin de recommander celle qui se rapproche le mieux avec la réalité, nous avons procédé à un travail de simulation, le modèle analogique est représenté sur la figure 2.8.

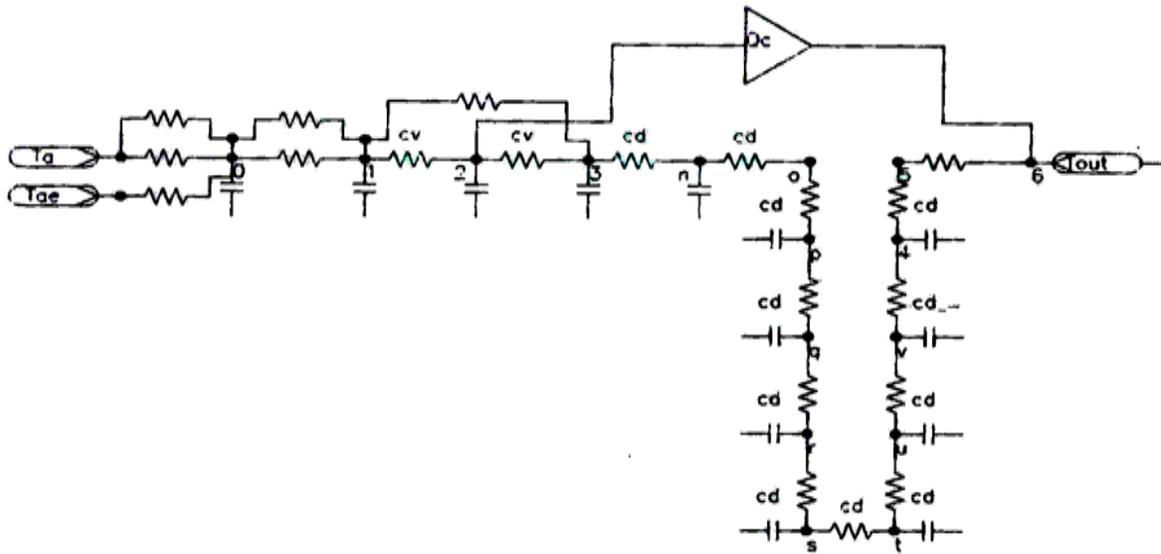


Figure 2. 8 : Schéma électrique du mur [36]

Il en ressort d'après la figure 9 (dessous) que l'approche théorique considérant une variation linéaire de la température le long de la cheminée solaire surestime le débit échangé au cours du cycle thermique est différent du deuxième et la valeur donnée par le second débit est proche du résultat réel.

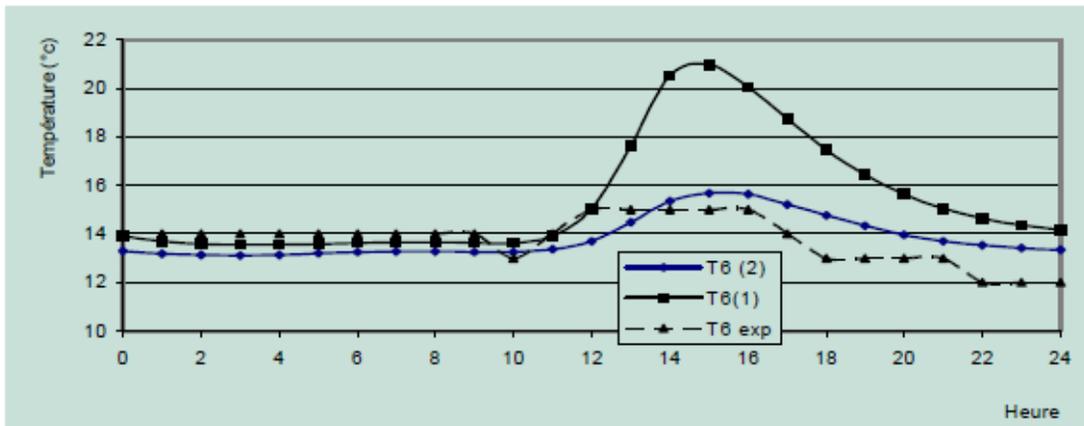


Figure 2. 9 : Evolution de la température interne du local avec deux méthodes pour l'évaluation du flux échangé par thermocirculation [37]

Tableau 2. 2 : Flux par thermo-circulation

Modèle	Qc (MJ)
Variation linéaire de la température	1.8
Variation en exponentielle	0.86

L'intérêt de la thermo-circulation et son effet sur l'évolution de la température intérieure du local est illustré par la figure 10 , nous remarquons que la présence de la thermo-circulation conduit à un bilan thermique légèrement supérieur

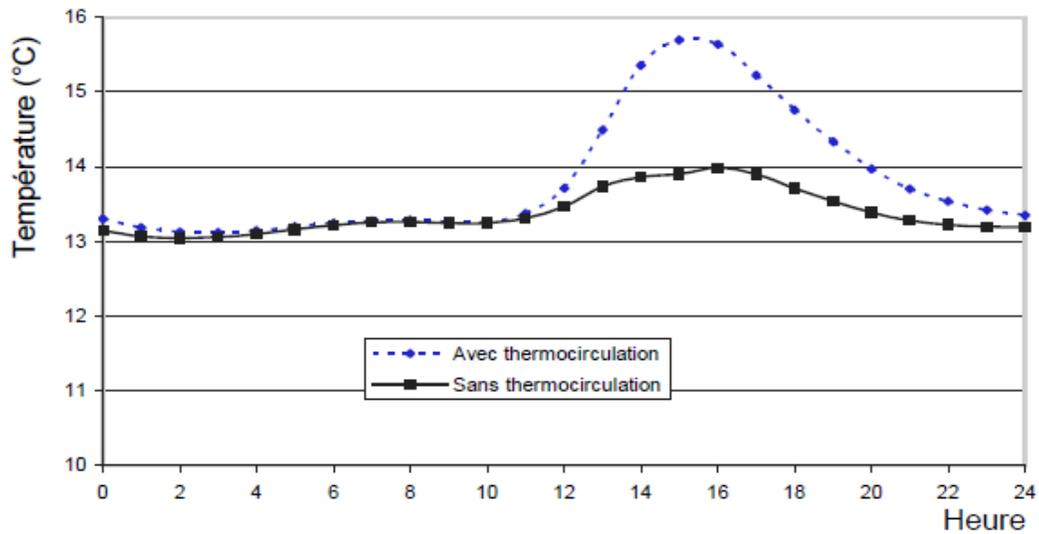


Figure 2. 10 : Influence de la thermocirculation sur la température interne du local

2.3.6 Performance du mur trombe (nord de l'ALGERIE)

Afin d'évaluer les performances d'un tel dispositif dans les conditions climatiques du nord de l'Algérie, une comparaison a été effectuée entre un local muni d'un mur Trombe de 40 cm d'épaisseur et un local classique sur des journées types d'hiver et d'été, il en résulte d'après la figure 5 que la mise en place d'un mur Trombe engendre un gain d'environ 6 °C.[37]

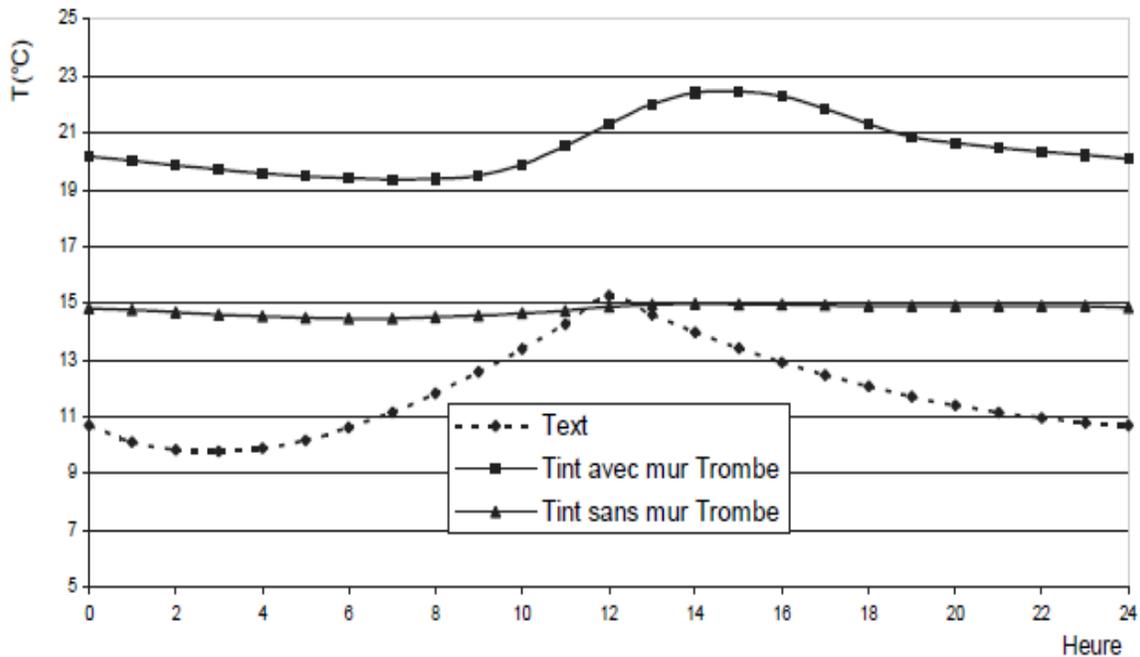


Figure 2. 11 : Evolution de la température du local en hiver [37]

2.3.6.1 Effet des dispositifs des protections solaire

Pour maintenir le local frais pendant les journées chaudes d'été il est nécessaire de prévoir une protection solaire, la figure 2.12 montre que la mise en place de store vénitien peut diminuer la température intérieure du local d'environ 3 °C.

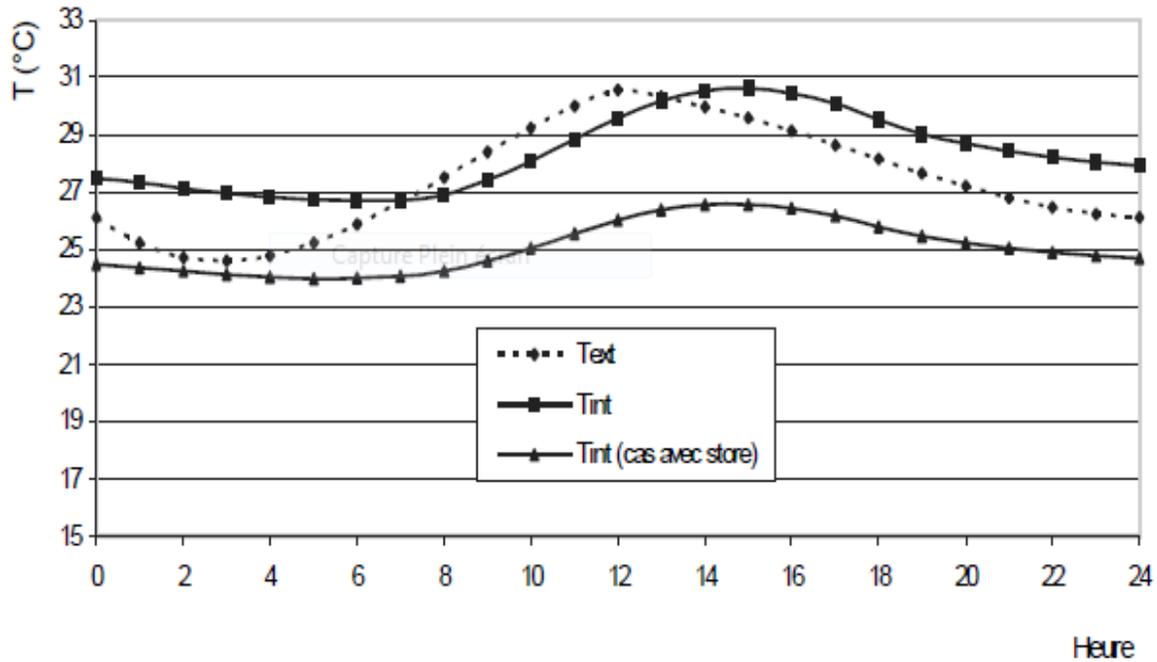


Figure 2. 12 : Evolution de température la du local en été [37]

2.4 La modélisation des transferts de chaleur dans une cavité ventilée naturellement

L'étude du flux entre deux plaques chauffées a conduit à deux nombreux modèles .Ces modèles sont basés sur des choix de représentations des phénomènes entrant en jeu, notamment dans les échanges radiatifs et les échanges convectifs. Pour ces premiers, il s'agit d'une part des échanges de rayonnement entre l'extérieur et le parement et d'autre part de ceux qui ont lieu au sein du système solaire passif étudié.

Les modèles décrivant la convection naturelle qui prend place au sein de la lame d'air sont conçus pour déterminer le coefficient de convection et le flux de renouvellement d'air. Ils peuvent être divisés en 3 familles : l'approche numérique, cela correspond à la résolution des équations de Navier-Stokes par les méthodes de CFD, et deux approches analytiques, l'une est centrée sur l'effet cheminée, et l'autre sur les pertes de charge de l'écoulement.

2.4.1 Echange radiatif

Dans ce paragraphe, le but est d'introduire des bilans d'énergie liés aux échanges radiatifs dans le système. Nous présentons ici l'occurrence de phénomènes et d'hypothèses correspondant aux choix de modélisations dans les littératures scientifiques.

2.4.1.1 Rayonnement solaire et distinction entre CLO et GLO

Tous les corps émettent un rayonnement électromagnétique, dans le processus de transfert de chaleur est appelé le rayonnement thermique. La longueur d'onde associée au rayonnement thermique. La longueur d'onde associée au rayonnement émis dépend de la température de la surface émettrice, et la loi de Planck permet de donner la longueur d'onde d'émission maximale en fonction de la température. La température de la surface extérieure du soleil est d'environ 5870 K, de sorte que son rayonnement électromagnétique se situe principalement dans le visible (entre 0.4 μm et 0.8 μm). Pour les températures de surfaces corporelles trouvées dans le système étudié de cette étude, le rayonnement pertinent se trouve dans l'infrarouge (10 μm).

Il convient à noter que le rayonnement solaire est filtré par l'atmosphère, et qu'il est majoritairement atteint par l'énergie solaire correspondante à la plage 0,25 à 2,5 μm de la surface terrestre.

Le bilan d'énergie radiative à effectuer sur un corps à la surface terrestre doit aussi inclure le rayonnement de l'environnement qui comprend :

- Le rayonnement de l'atmosphère, son émission propre et la part réfléchie du rayonnement terrestre, qui est appelé rayonnement du ciel.
- Le rayonnement des surfaces en regard du corps considéré. Il apparaît que l'on peut distinguer deux types de rayonnement, comme le fait la norme en ISO

9288 : 1989. « Isolation thermique- Transfert de chaleur par rayonnement-Grandeurs physiques et définition » :

- Le rayonnement en courtes longueurs d'onde (CLO) d'origine solaire direct et diffus (0,25 μm à 2,5 μm).
- Le rayonnement de grandes longueurs d'onde (GLO) émis par des sources terrestres (ENV) proches de la température ambiante (2.5 μm à 100 μm).

Ce choix se justifie par le fait que les éléments transparents comme le vitrage ont un comportement sélectif : ils se comportent comme des passes hauts, laissant passer les ondes courtes (de hautes fréquences) mais pas les longues (de basses fréquences). Ainsi leurs propriétés radiatives doivent être différenciées selon ces deux plages. La limite entre les deux est placée à $2.5 \mu\text{m}$.

La puissance rayonnée par un corps est donnée par la loi de Stefan-Boltzman. Ainsi une surface d'émissivité à la température T émet une densité de flux radiatifs égale à :

$$\varphi = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.8)$$

Avec :

φ : densité du flux (w/m^2)

ε : émissivité de la surface < 1

σ : constante de stefan-Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (w/m}^2\text{K}^{-4}\text{)}$

2.4.1.2 Phénomène de multi-réflexion entre les deux plaques

Pour le flux radiatif en CLO incident sur une façade le phénomène de multi réflexion intervient. La partie de rayonnement transmis par la protection solaire semi-transparente, peut ensuite être soit absorbée, soit réfléchiée par le mur.

Ensuite cette partie réfléchiée, peut à nouveau être transmise, réfléchiée ou absorbée par la face interne de la protection solaire, comme illustré sur la figure 1.8.

On se base sur l'étude de Rodriguez et al.(200) qui décrit les bilans radiatifs 1D pour un produit recouvert d'un film-semi transparent et soumis au rayonnement solaire.

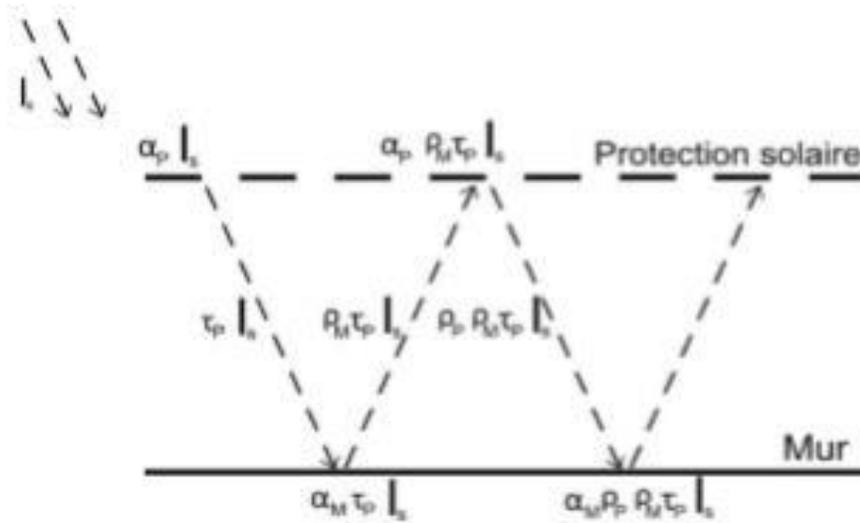


Figure 2. 13 : Schéma du phénomène de multi-réflexion du rayonnement CLO [38]

Ainsi, pour la sollicitation radiative extérieure reçue par la protection solaire sur sa face interne en CLO, après avoir écrit la forme développée et reconnu une série géométrique, la forme simplifiée s’écrit :

$$\varphi_{CLO,P_i} = \frac{\alpha_{P,CLO} * \tau_{M,CLO}}{1 - \rho_{P,CLO} * \rho_{M_i;CLO}} I_s \quad (2.9)$$

2.4.1.3 Echange radiatif entre deux surfaces

Les flux émis sont calculés à partir des températures de surface et des propriétés radiatives des matériaux en GLO. Les formes développées des échanges entre les deux surfaces sont prises en compte.

Pour le bilan d’énergie radiative entre deux surfaces à températures T1 et T2 d’émissivité et se faisant face à un écart constant, et dont la distance de l’une à l’autre est faible devant leur hauteur, le flux net perdu par la surface 1 s’écrit :

$$\Phi_{GLO} = \sigma \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1)} \quad (2.10)$$

Φ_{GLO} : flux radiatif incident solaire

Pour l'intégration du modèle numérique, l'expression des bilans radiatifs est linéarisé, alors :

$$\varphi_{GLO} = h_{rad} (T_1 - T_2) \quad (2.11)$$

φ_{GLO} : Densité de flux radiatif

Où :

$$h_{rad} = \sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) / \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \quad (2.12)$$

h_{rad} : coefficient d'échange radiatif entre les deux surfaces. Il dépend de la température de ces surfaces.

2.4.2 Les échanges convectifs

2.4.2.1 Caractérisation de la convection naturelle

Il existe deux types de transfert de chaleur par convection qui se produisent dans la cavité ouverte des systèmes solaires passifs. Premièrement, l'échange de transport convectif correspond à l'énergie transmise par l'air dans son flux vertical, il est donc associé au débit de renouvellement d'air. Ensuite, l'échange convectif entre la surface de la cavité et l'air qui sont caractérisés par un coefficient de convection. Ces données sont présentées sur la figure (Figure 2.15). On constate aussi, comme montré sur la figure, que la courbe de l'écoulement est de forme parabolique, mais pour simplifier, on considère que la vitesse moyenne est directement liée au débit de renouvellement d'air.

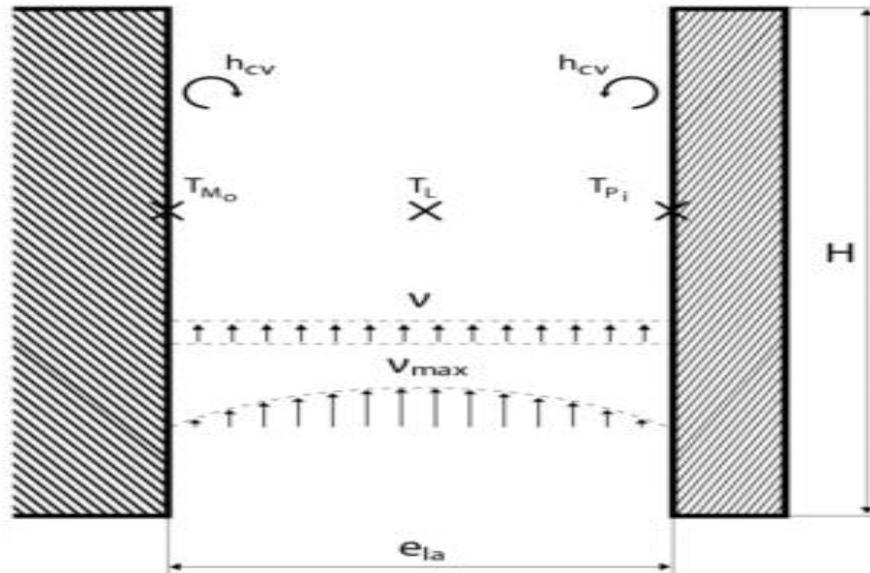


Figure 2. 14 : Illustration du profil d'écoulement vertical et de la vitesse moyenne dans une cavité chauffée [38]

Pour la convection naturelle entre deux plaques verticales chauffées asymétriquement, le débit dépend essentiellement de la forme de la cavité, de la chaleur totale fournie à l'air, et de sa distribution, Aung et al.(1972). Les nombres sans dimension caractéristiques sont ceux de Rayleigh, de Prandtl et le rapport de forme de cavité (rapport de l'épaisseur et la hauteur de la lame d'air). Ici, on peut considérer que le nombre d'air de Prandtl comme une constante égale à 0.71. Le nombre de Rayleigh caractérise la transmission au sein d'un fluide, c'est-à-dire le type d'écoulement. Inférieur à une première valeur limite, le transfert est fondamentalement conductif, au-delà de la convection, l'écoulement est laminaire et enfin, au-delà d'une autre valeur critique, il y a écoulement turbulent.

Le nombre de Rayleigh se calcule à partir du nombre de Grashof. Pour la convection naturelle, qui prend place entre deux plaques verticales, associé à un mouvement de renouvellement d'air sur toute la hauteur H , comme sur la figure (Figure 2.15), le nombre de Rayleigh est donné par :

$$Ra_H = Gr_H * Pr \quad (2.13)$$

Avec :

Ra_H : nombre de Rayleigh sans dimension

Gr_H : nombre de Grashof sans dimension

Pr : nombre Prandtl sans dimension

Les échanges convectifs à l'interface solide-air sont décrits par le nombre de Nusselt, qui pour l'écoulement entre deux plaques est défini par :

$$Nu = \frac{h L_c}{\lambda_{air}} (2.14)$$

Avec :

Nu : nombre de Nusselt ($W/m^2.K$)

h : coefficient du transfert thermique ($W/m^2.K$)

L_c : longueur caractéristique (m)

λ_{air} : conductivité thermique du fluide ($W/m.K$)

2.4.3 Approche numérique CFD

L'approche numérique incluse l'utilisation de Navier-Stokes sous certaines hypothèses simplifiées pour déterminer la vitesse d'écoulement du flux d'air entre deux plaques chauffées asymétriquement. Par conséquent, les équations de conservation de la masse, de la vitesse et de l'énergie sont ainsi utilisées.

Depuis le premier modèle numérique des années 1960, deux méthodes numériques ont été utilisées. La première par Aung et al.(1972) et Kraiser et al.(2004) sur l'approximation de Boussinesq en considérant tous les paramètres physiques constants, à l'exception de densité volumique. La réécriture des équations de Navier-Stokes posera alors un problème dont les solutions peuvent être calculées numériquement simplement.

La deuxième considère les équations de Navier-Stokes avec des paramètres non constants, tels que le font Kaiser et al.(2004) et Gan en (1998) et (2006). Cette méthode devient possible grâce au développement des outils de calcul informatique, et les techniques de résolution de la CFD.

Pour Aung et al.(1972) le terme moteur comme étant la différence de température de surface des plaques et la température de l'air extérieur, ou les flux de chaleur au niveau des plaques à l'interface entre le solide et l'air. Le nombre de Grashof est alors défini en conséquence. De la même façon, des études de CFD considèrent comme conditions à limite de la lame d'air soit des températures fixes comme le font Chami et Zoughaib (2010), soit des flux comme Gan (2011).

Ensuite, le nombre de Nusselt et le débit sont calculés pour différents nombres de Rayleigh et de rapports de forme. Des corrélations, pour le coefficient de convection et la vitesse d'air moyenne sont ensuite proposées. Aung et al.(1972) réalisent un certain nombre de calculs pour des nombres de Rayleigh et débits choisis. Ils constatent alors des relations asymptotiques entre nombre de Rayleigh et nombre de Reynolds, nombre de Rayleigh d'une part et nombre de Nusselt.

Zamora et Kaiser (2009) étudient l'écoulement (laminaire et turbulent) dans une cheminée solaire pour différents nombres de Rayleigh et différents rapports de forme, en utilisant un code numérique. Des corrélations donnant la valeur de rapport de forme qui maximise le nombre de Nusselt, pour de valeurs de nombre de Rayleigh comprises entre 105 et 1012 ont été établies. Plus le nombre de Rayleigh est levé, plus le rapport de forme doit être faible pour maximiser les échanges convectifs .Le débit maximal n'est pas atteint pour la valeur maximale du Nusselt, ce qui s'explique par le fait qu'en régime turbulent, des inversions d'écoulement prennent place, favorisant les échanges convectifs mais pas le renouvellement d'air.

Gan (2011) étudie les cheminées solaires et fournit des expressions générales permettant de calculer d'une part, le nombre de Nusselt en fonction du rapport de forme et du nombre de Rayleigh, et d'autre part le nombre de Reynolds en fonction du nombre de Rayleigh et du nombre de Nusslet, permettant ainsi d'obtenir le débit. Il décompose ces relations sur les intervalles sur lesquelles elles sont valables. Il faut noter que ces relations sont valables pour des

flux allant de 100 à 1000 W/m² .Aussi pour des déperditions variées des flux entre les deux surfaces de la cavité. Ces méthodes ont pour avantage une description d'ine de tout l'écoulement dans la lame d'air, elles permettent aussi d'analyser la nature de l'écoulement de manière locale et notamment sa possibilité d'hétérogénéité le long du canal .Mais ces résultats sont établis pour des configurations et des entrées spécifiques, limitant de ce fait leur exploitation pour la modélisation des échanges dans des configurations réelles de protections solaire.[38]

2.5 CONCLUSION

L'utilisation de l'énergie solaire dans le bâtiment doit être un des axes primordiaux de recherche en Algérie qui présente un potentiel d'énergie solaire assez considérable, et qui aussi doit impliquer l'exploitation de tous les éléments architecturaux d'une maison (murs, fenêtres, planchers, toits) pour tirer profit du rayonnement solaire. Dans l'étude qui a été présentée le mur Trombe paraît comme une solution intéressante pour l'économie de l'énergie.

A travers cette modeste contribution nous avons tout d'abord essayé d'étudier, les performances thermiques du mur trombe qui est utilisé dans les systèmes de chauffage et ventilation passifs des logements. Ensuite, nous avons abordé son fonctionnement pendant l'hiver comme l'été pour conclure que son fonctionnement est principalement diurne et il est plus efficace pendant la saison hivernale également.

On a fait une comparaison de deux approches théoriques évaluant le flux de chaleur échangé par thermo-circulation qui montre que l'approche considérant une variation en exponentielle de la température le long de la cheminée solaire se rapproche mieux avec le phénomène réel.

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 thermiques mur/air) sont des paramètres qui influent la convection thermique qu'elle soit naturelle, mixte ou forcée.

CHAPITRE 3 : simulation numérique de la circulation d'air dans un habitat

3.1 Introduction

Le mouvement turbulent de l'air, induit par la convection naturelle dans l'espace, traverse la hauteur d'un mur de Trombe et circule dans l'espace occupé. Pour formuler le phénomène physique, on utilise toujours des équations mathématiques.

La formule mathématique doit exprimer le comportement de ce phénomène dans le temps et dans l'espace. En mécanique des fluides, on suppose que le fluide est un milieu continu, ce qui permet l'utilisation des lois classiques de conservation.

Type de flux (laminaire vs turbulent):

3.1.1 Écoulement laminaire

En dynamique des fluides, un écoulement est dit laminaire lorsqu'il est régulier et caractérisé par des trajets lisses ou réguliers de particules du fluide (qu'il ne présente pas trop de variations spatiales ou temporelles), contrairement à un écoulement turbulent, caractérisé par le mouvement irrégulier des particules du fluide. Le fluide s'écoule en couches parallèles sans perturbation entre les couches. Par conséquent, l'écoulement laminaire est également appelé écoulement fluide ou visqueux.

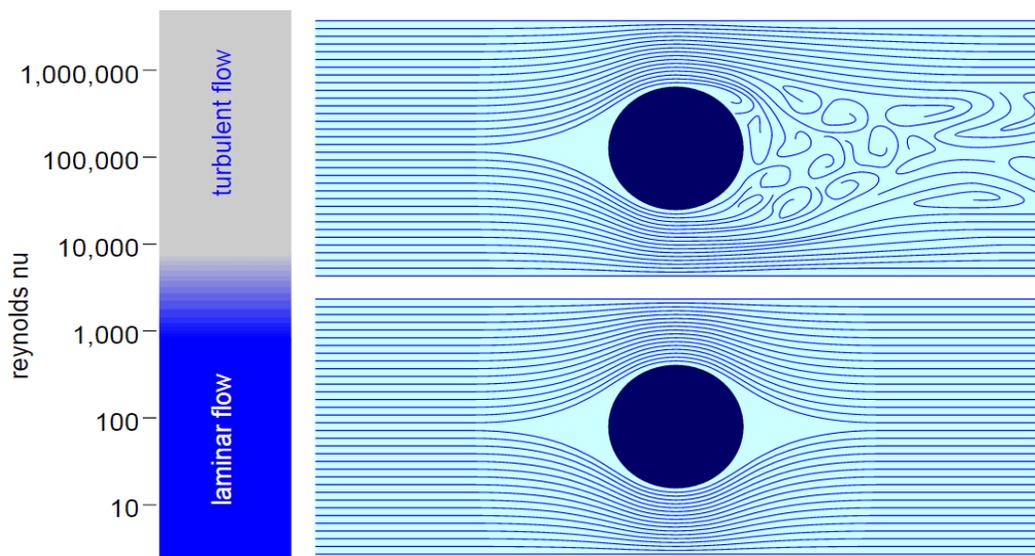


Figure 3. 1 : le nombre de Reynolds dans l'écoulement laminaire et turbulent

Le terme flux de courant est descriptif du flux car, dans un flux laminaire, des couches d'eau s'écoulant à différentes vitesses sans pratiquement se mélanger, les particules de fluide se déplacent dans des trajectoires ou des lignes de courant définies et observables.

Lorsqu'un fluide circule dans un canal fermé tel qu'un tuyau ou entre deux plaques planes, un flux de deux types (flux laminaire ou flux turbulent) peut se produire en fonction de la vitesse, de la viscosité du fluide et de la taille du tuyau (ou sur le nombre de Reynolds).

La viscosité stabilise et régularise les écoulements de façon générale. Un fluide présentant une viscosité importante s'écoulera de façon laminaire. Un écoulement est caractérisé par son nombre de Reynolds, qui permet de se faire une idée de sa stabilité : quand ce nombre est petit, l'écoulement est laminaire, quand il est grand, l'écoulement est en général instable et turbulent.

3.1.2 Ecoulement turbulent

En dynamique des fluides, un écoulement est dit turbulent lorsqu'il 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 une 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.

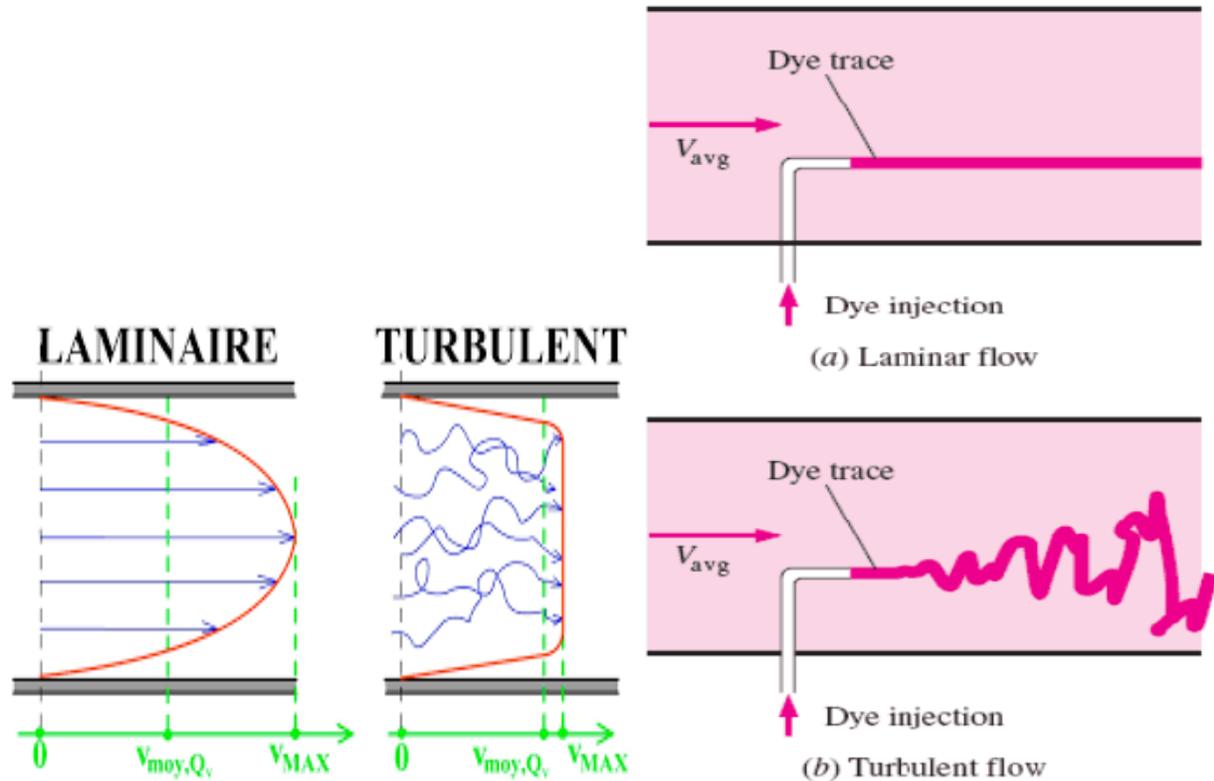


Figure 3. 2 : Profil de vitesse dans l'écoulement turbulent vs laminaire

Le principal outil disponible pour leur analyse est l'analyse CFD. Il est largement admis que les équations de Navier – Stokes (ou les équations simplifiées de Navier – Stokes à la moyenne de Reynolds) sont capables de présenter des solutions turbulentes, et ces équations sont à la base de pratiquement tous les codes CFD.

L'étude du passage d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent lorsque le nombre de Reynolds augmente, a pu être faite dans certains cas en se basant sur la théorie des systèmes dynamiques. Les instabilités sont directement associées au terme non linéaire inertiel de transport par convection de l'équation de Navier Stokes. La réponse instationnaire à une excitation stationnaire témoigne du caractère non linéaire des dynamiques des fluides.

- Si $Re < 1$, l'équation est linéaire car les phénomènes diffusifs dominent. Il s'agit de la forme adimensionnée de l'équation de Navier Stokes.

- Si $Re \gg 1$, l'équation est non linéaire car les phénomènes convectifs dominent. Les non linéarités produiront : des effets instationnaires pour un forçage stationnaire, des brisures de symétries par rapport aux conditions aux limites initiales, en autres termes, la turbulence. Ce changement brutal qui s'opère correspond au passage du mode de transport diffusif dominant au mode de transport convectif dominant.[39]

Le mouvement laminaire de l'air, induit par la convection naturelle dans l'espace, traverse la hauteur d'un mur de Trombe et circule dans l'espace occupé.

Pour formuler le phénomène physique, on utilise toujours des équations mathématiques. Une formulation mathématique doit obligatoirement exprimer le comportement de ce phénomène dans l'espace et dans le temps. En mécanique des fluides, on suppose que le fluide est un milieu continu, ce qui permet d'utiliser les lois classiques de conservation.

3.2 Définition du problème

Nous considérons les géométries des deux modèles de mur trombe, le premier modèle simple alors que le deuxième modèle cannelé.

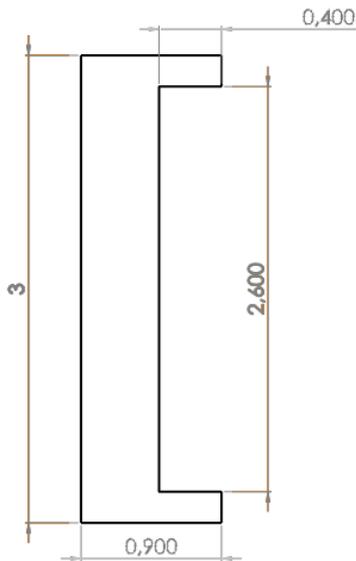


Figure 3. 3 : Mur trombe simple

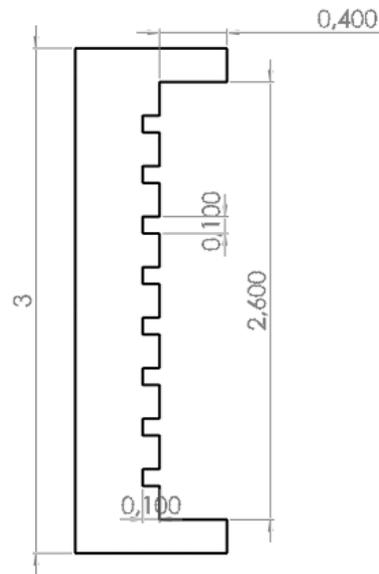


Figure 3. 4 : mur trombe cannelé

Hypothèses simplificatrices:

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

- Le fluide utilisé est un fluide newtonien, incompressible.
- L'écoulement du fluide au sein de la cavité est laminaire, transitoire et bidimensionnel.
- les propriétés thermo physiques du fluide sont constantes dans l'intervalle de température étudiée.
- On néglige l'hypothèse de Boussinesq.

3.3 Equations gouvernantes de l'écoulement

Les équations qui régissent l'écoulement de l'air à travers le mur de trombe

-Equation de continuité:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0(3.1)$$

-Equations de quantité de mouvement :

$$\rho \left[\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial (v_j v_i)}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i(3.2)$$

D'où : $i, j = 1, 2$

- Equation d'énergie :

$$\frac{\rho C_p \partial(T)}{\partial t} + \rho C_p v_j \frac{\partial(T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)(3.3)$$

Dans un repère cartésien (x,y) ses équation sont :

Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0(3.4)$$

Equation de la quantité de mouvement suivant l'axe x :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.5)$$

Equation de la quantité de mouvement suivant l'axe y :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_0) \quad (3.6)$$

Equation de l'énergie :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.7)$$

3.4 Conditions aux limites

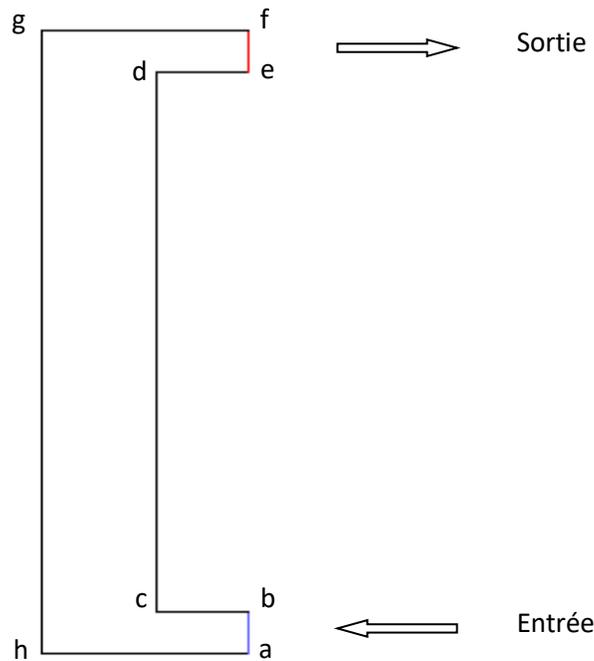


Figure 3. 5 : Conditions aux limites

A l'entrée

$v = 1\text{m/s}$, $T_e = 293\text{ K}$

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

- Paroi [bc] : adiabatique
- Paroi [cd] : Flux constant $\phi = 300\text{w/m}^2$
- Paroi [de] : adiabatique
- Paroi [gh] : Isotherme $T_i = 273\text{ K}$
- Paroi [fg] : adiabatique.
- Paroi [ha] : adiabatique.

A la sortie

$P = P_{\text{atm}}$

3.5 Simulation numérique

La simulation numérique en mécanique des fluides (CFD : Computational Fluid Dynamics) est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils incontournables de conception et elle est largement utilisée dans l'industrie. Le choix de l'utilisation de telle méthode numérique va dépendre essentiellement du type et de la complexité du problème à résoudre.

Les équations de convection naturelle qui régissent notre problème physique constituent un système d'équations différentielles avec des dérivées partielles non linéaires et couplées. Ces équations ne peuvent pas être résolues analytiquement, on utilisera donc des méthodes numériques pour les résoudre.

Dans ce chapitre, afin de résoudre ces équations avec leurs conditions aux limites associées, nous envisageons une solution à l'aide d'un code de simulation numérique de deux logiciels commerciaux très utilisés dans l'industrie : un mailleur (GAMBIT) et un solveur (FLUENT) qui résolvent ces équations régissant les mouvements d'un fluide. Ces

dernièrestraduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes), ainsi que la conservation de l'énergie.

3.5.1 La méthode des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal P. Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel noté (e,w), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e,w,s,n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e,w,n,t,b). Chaque nœud principal P est limité par des nœuds voisins (E,W) dans le cas monodimensionnel,(E,W,S ,N) dans le cas bidimensionnel et (E,W,S,N,T ,B) dans le cas tridimensionnel. L'équation différentielle est intégrée dans chaque volume élémentaire finis. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire l'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance, etc) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude dont le résultat de discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales. Cette méthode est fréquemment utilisée dans la solution numérique des problèmes d'écoulement et transferts des fluides.[40]

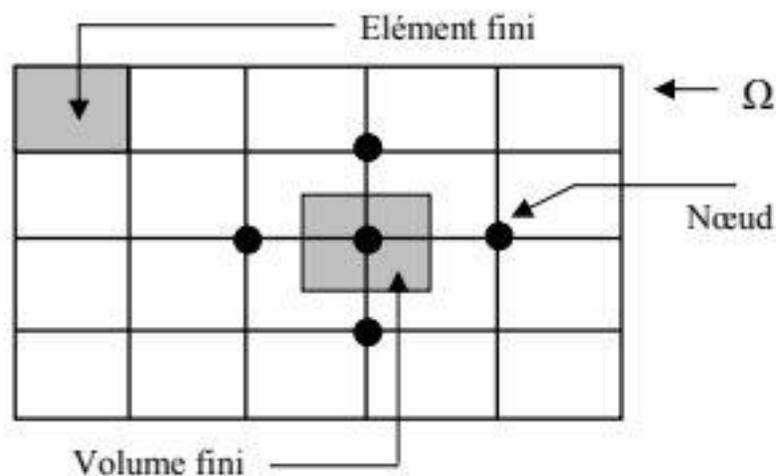


Figure 3. 6 : Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel

Le nœud principal "P" est entouré par quatre nœuds voisins celui du Nord "N", celui du Sud "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).

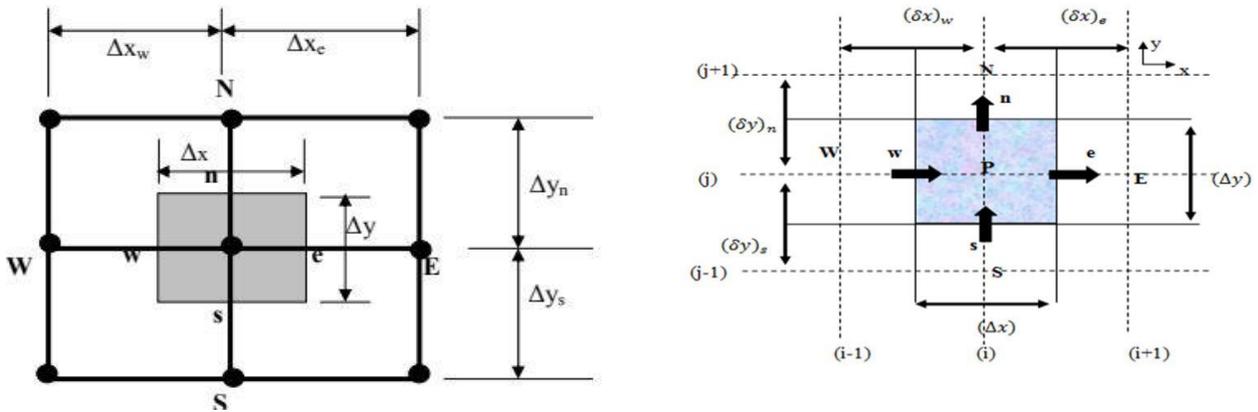


Figure 3. 7 : Description bidimensionnel d'un volume fini

3.6 Présentation de Gambit et Fluent

3.6.1 Initiation au logiciel GAMBIT

GAMBIT est un mailleur 2D/3D;pré-processeur 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).

3.6.1.1 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

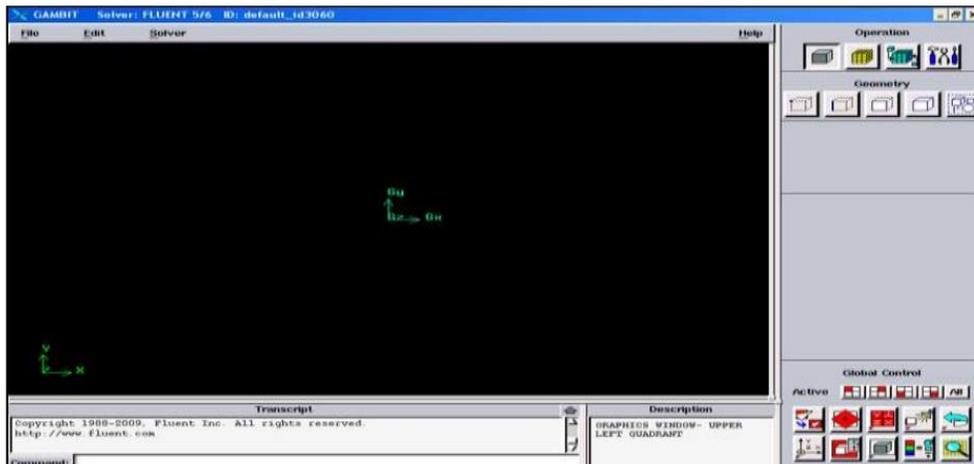


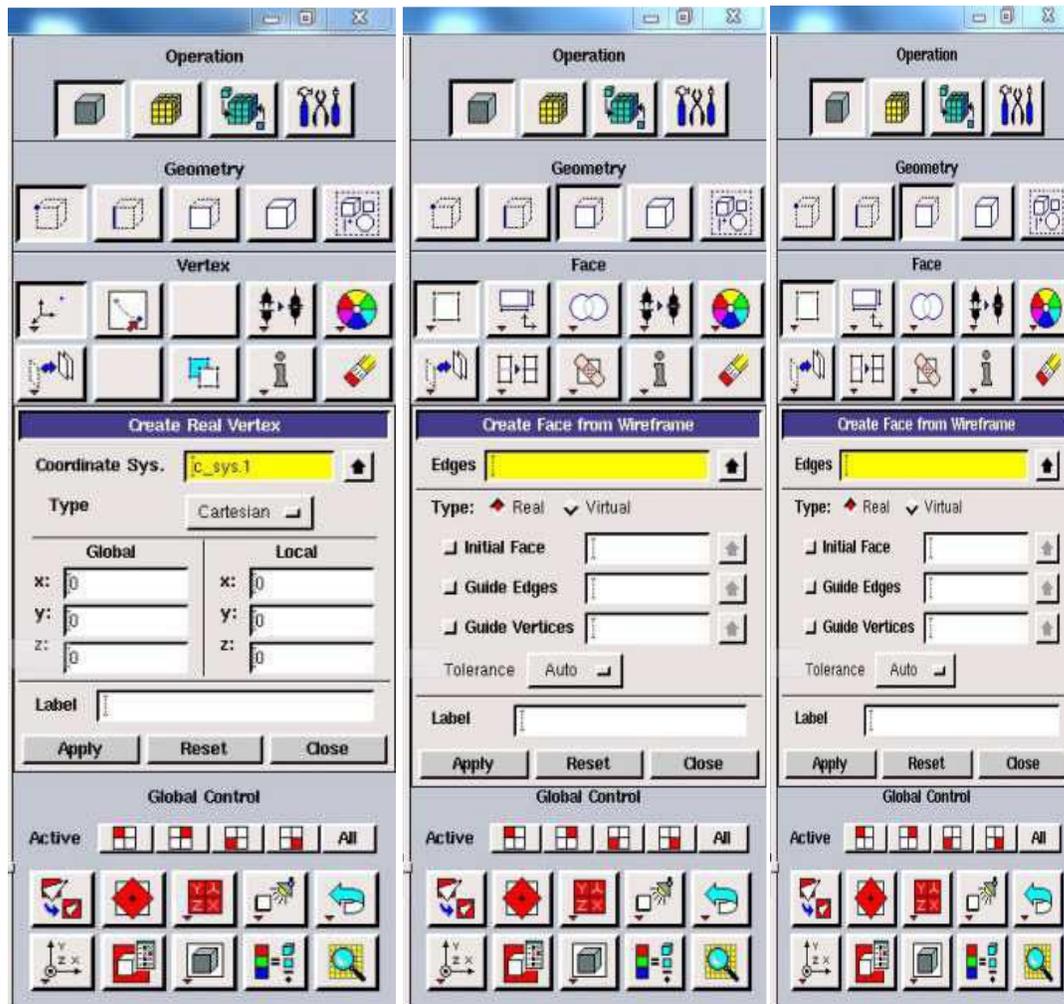
Figure 3. 8 : Lancement du Gambit

3.6.1.2 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 créées.



Création des points

Création des lignes

Création des surfaces

Figure 3. 9 : 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.

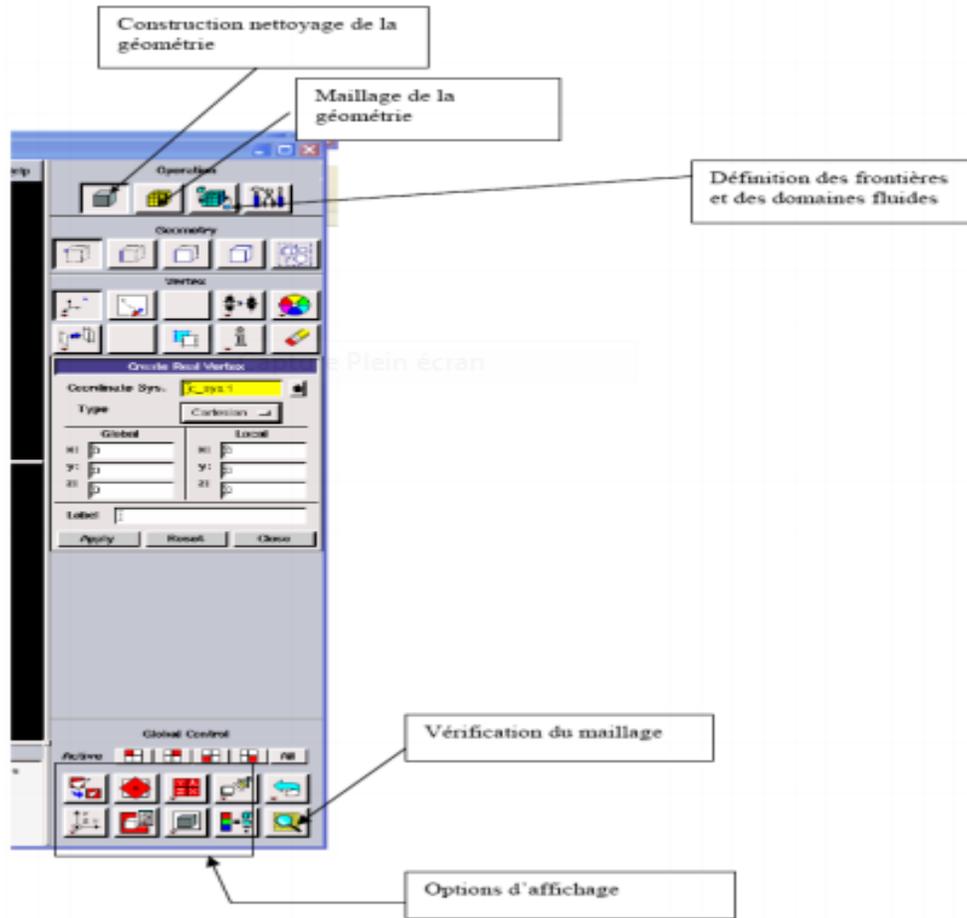


Figure 3. 10 : les opérations pour construire une géométrie

3.6.1.3 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).

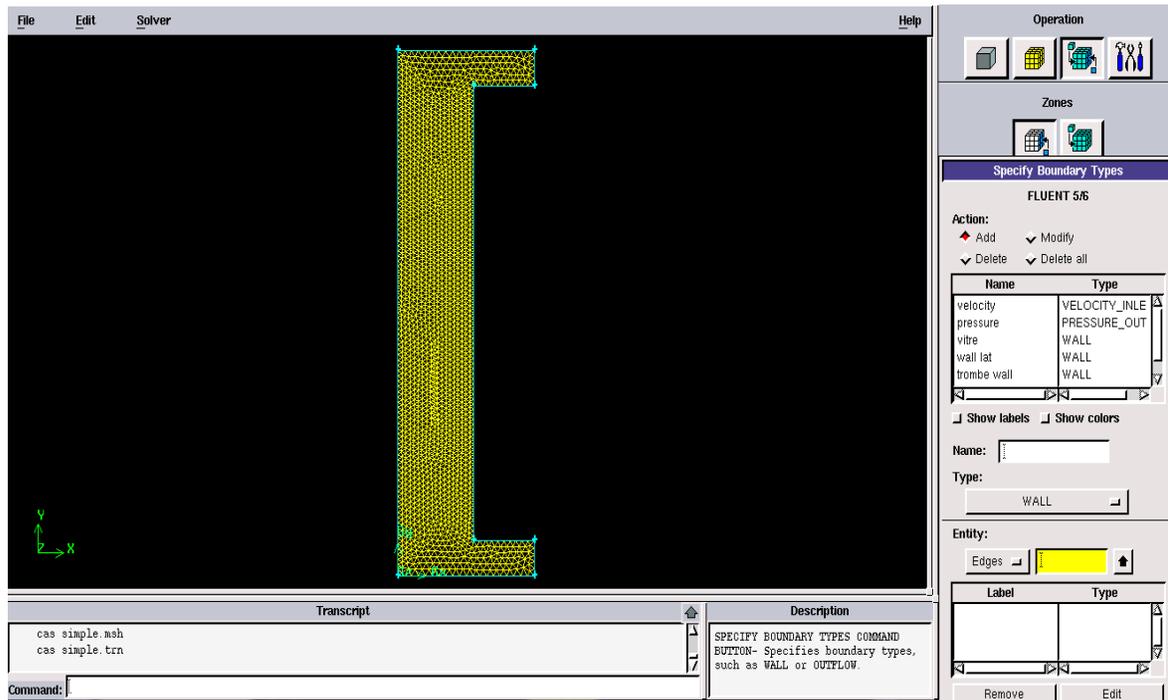


Figure 3. 11 : Maillage de la géométrie Définition des frontières du mur trombe simple

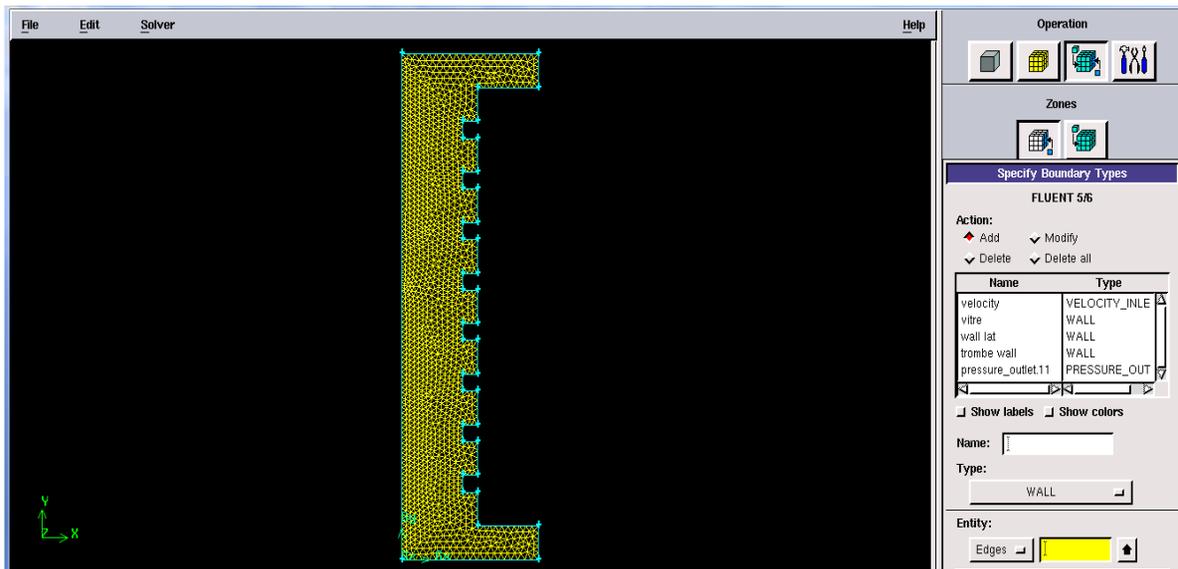


Figure 3. 12 : Maillage de la géométrie Définition des frontières du mur trombe cannelé

3.6.1.4 Exportation du maillage

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

File → Export → Mesh

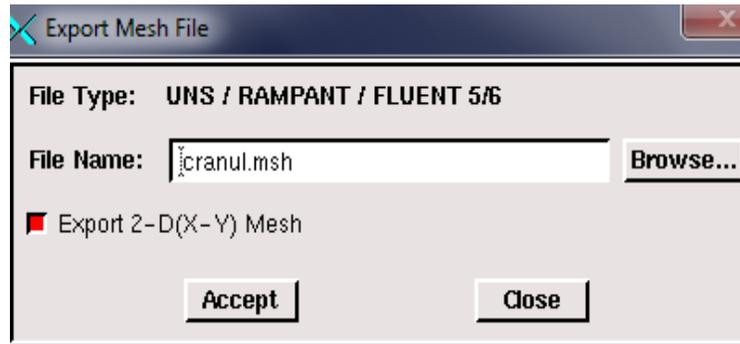


Figure 3. 13 : Exportation du maillage

3.6.2 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.).

3.6.2.1 Importation de la géométrie

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

File → Read → Case...



Figure 3. 14 : Importation de la géométrie

3.6.2.2 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. 15 : Vérification du maillage sous Fluent

3.6.2.3 Vérification de l'échelle

Grid→Scale

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

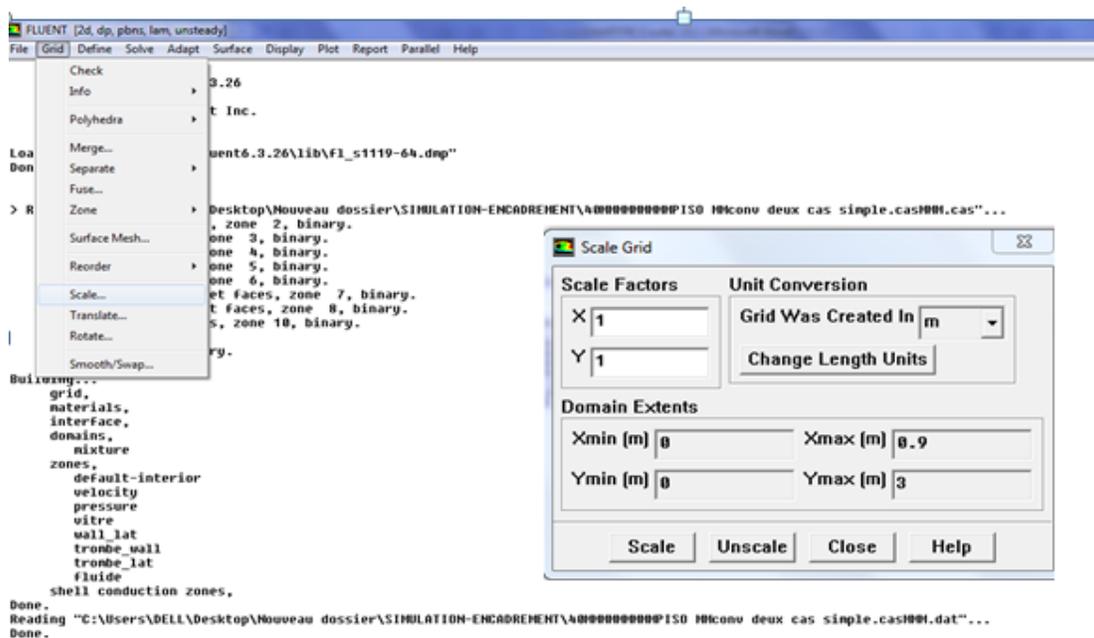


Figure 3. 16 : Vérification des unités

3.6.2.4 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.

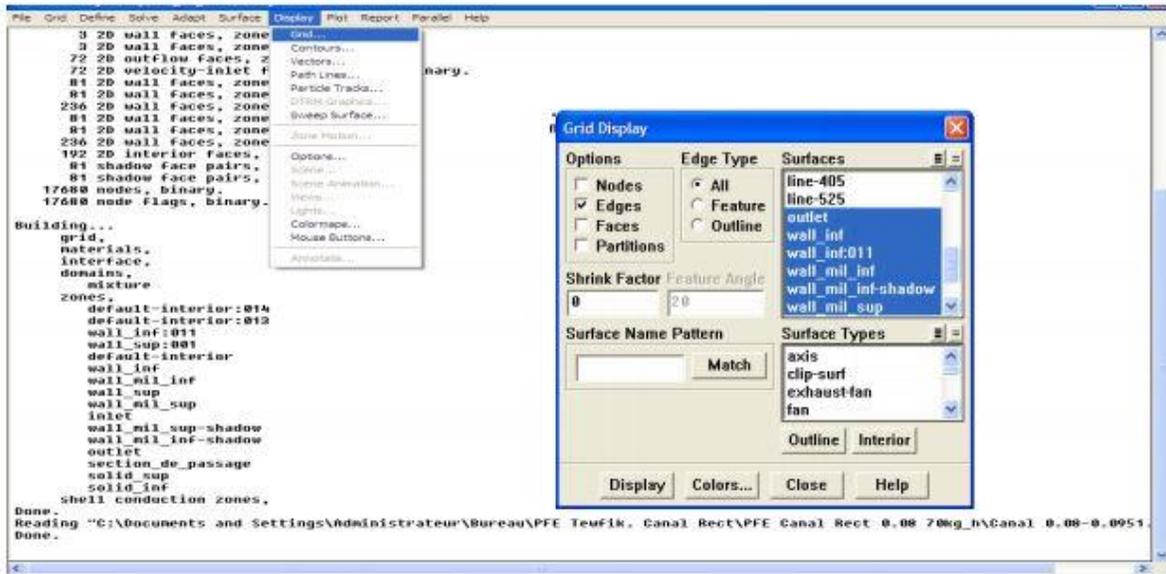


Figure 3. 17 : Affichage de la grille et vérification des conditions

3.6.2.5 Choix du solveur

Define → Models → Solver

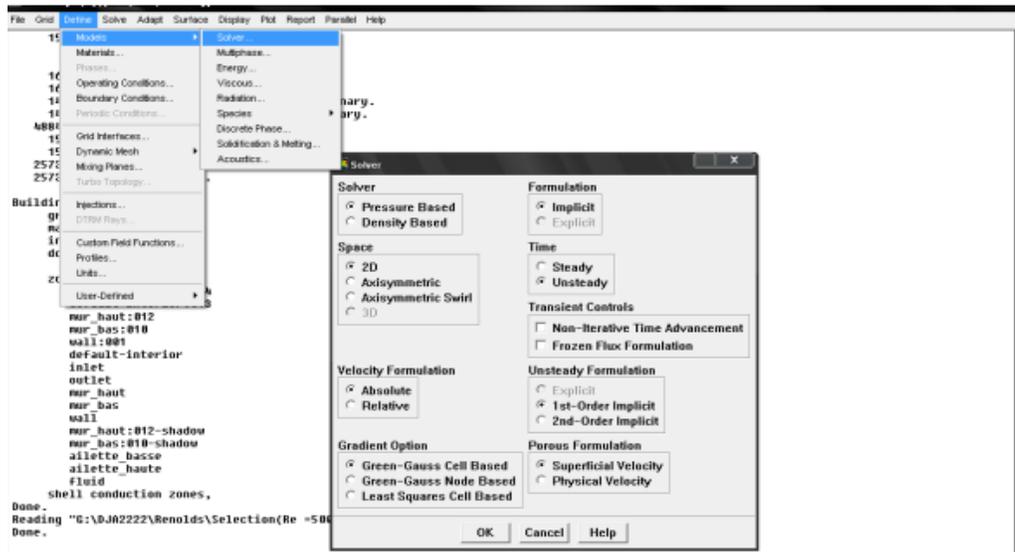


Figure 3. 18 : Choix du solveur sous fluent

- SegregatedSolver : est le plus approprié pour les écoulements incompressibles (Ventilateurs, pompes...)

- CoupledSolvers, les solveurs « coupledimplicit » 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.

3.6.2.6 L'équation de l'énergie

Define → Models → Energy

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

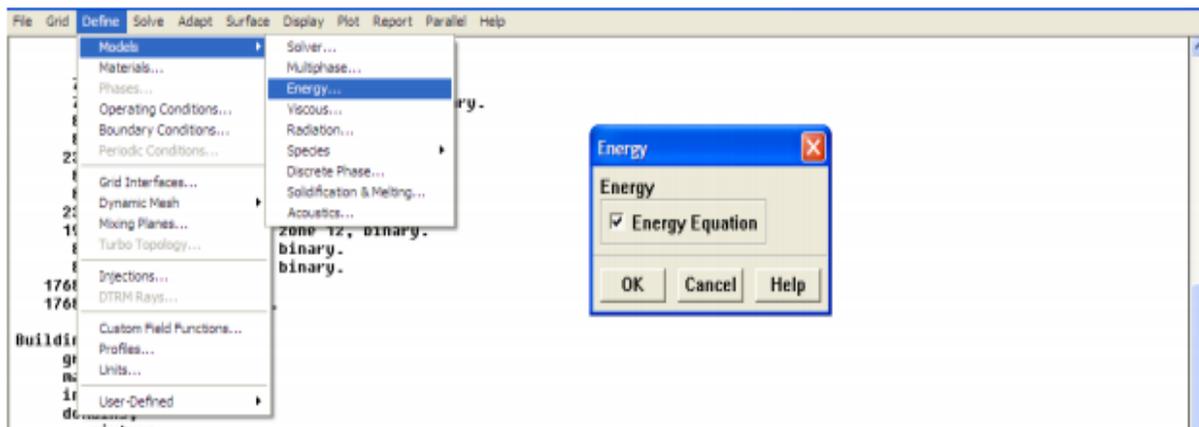


Figure 3. 19 : Equation de l'énergie

3.6.2.7 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 :

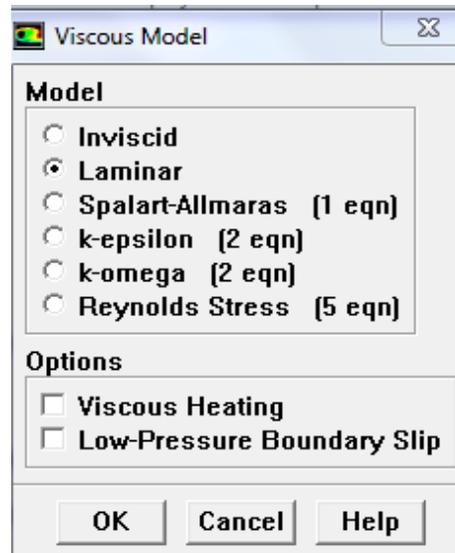


Figure 3. 20 : Choix du modèle d'écoulement

3.6.2.8 Définition des caractéristiques du fluide

Define → Materials

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

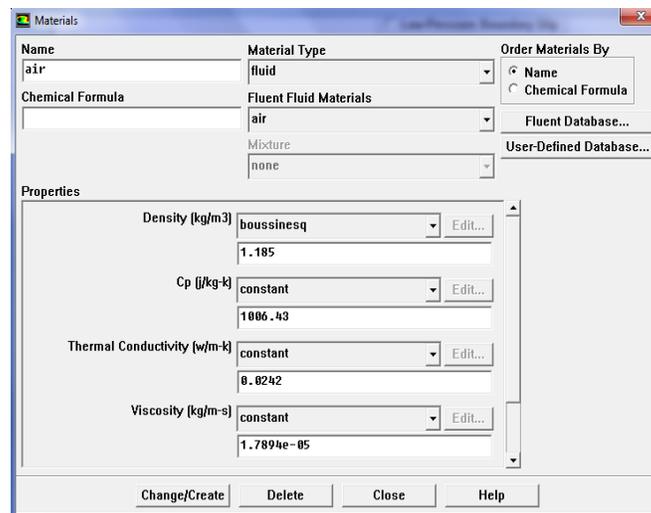


Figure 3. 21 : Définition des caractéristiques du fluide

3.6.2.9 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 ».

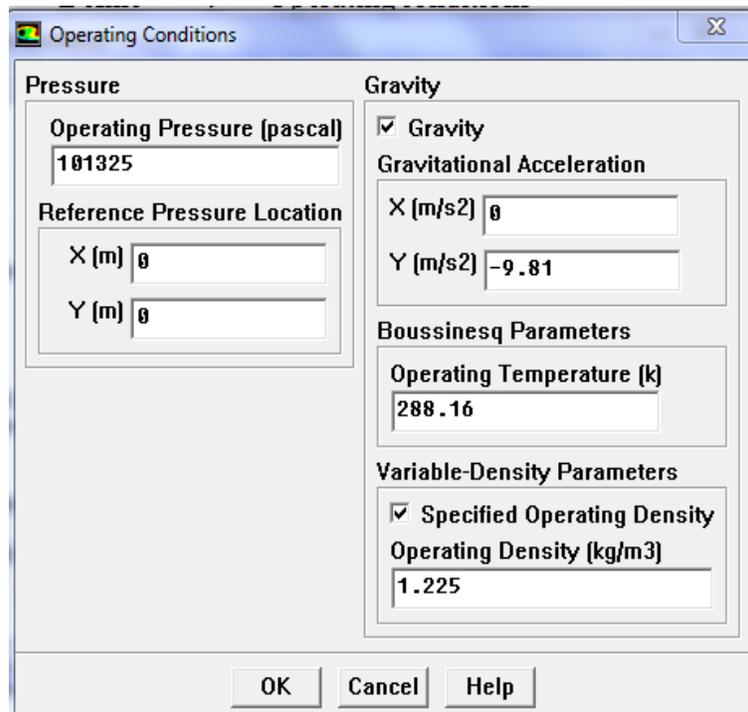


Figure 3. 22 : Choix de la pression de référence

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

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

P_{op} (Operating pressure) : Pression de référence

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

3.6.2.10 Condition aux limites

Define → Boundary Conditions

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

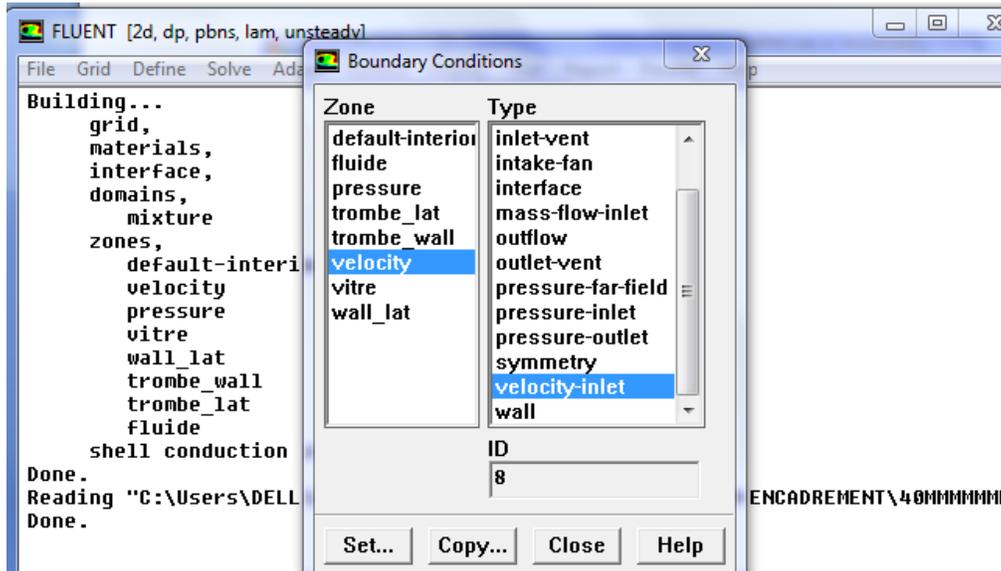


Figure 3. 23 : Valeurs des conditions aux limites

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

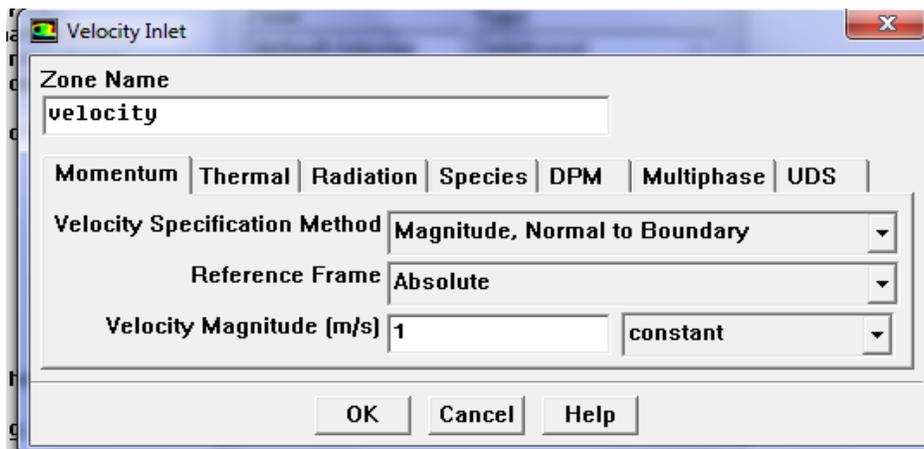


Figure 3. 24 : Vitesse d'entrée

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

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

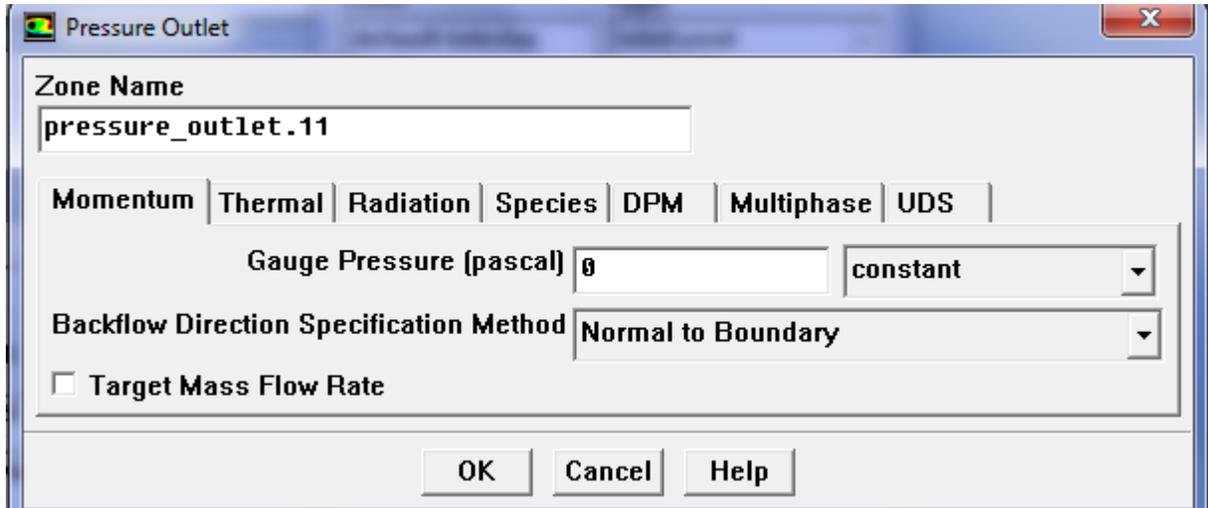


Figure 3. 25 : Pression de sortie

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

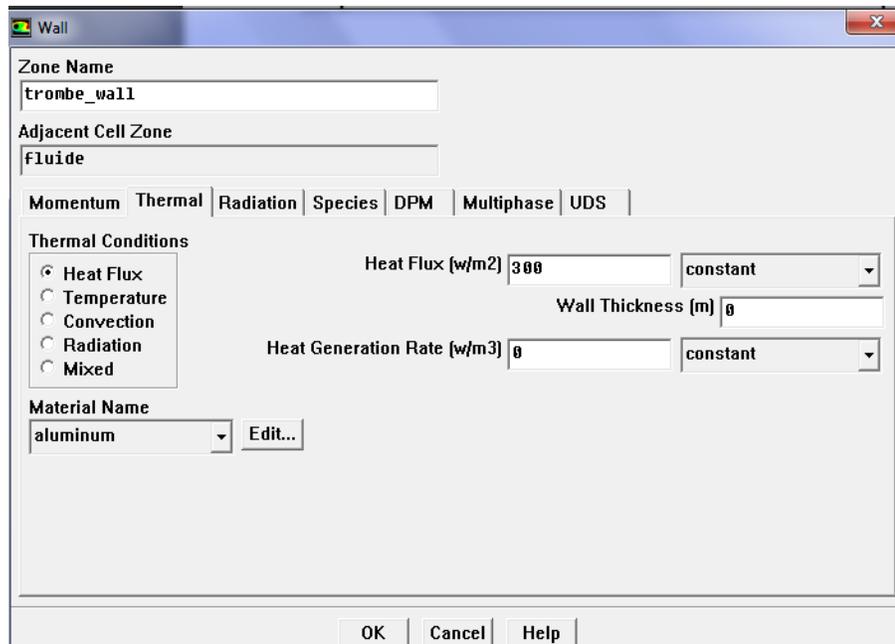


Figure 3. 26 : Parois du mur trombe

3.6.2.11 Choix d'ordre des équations et l'algorithme

Solve → Controls → Solution

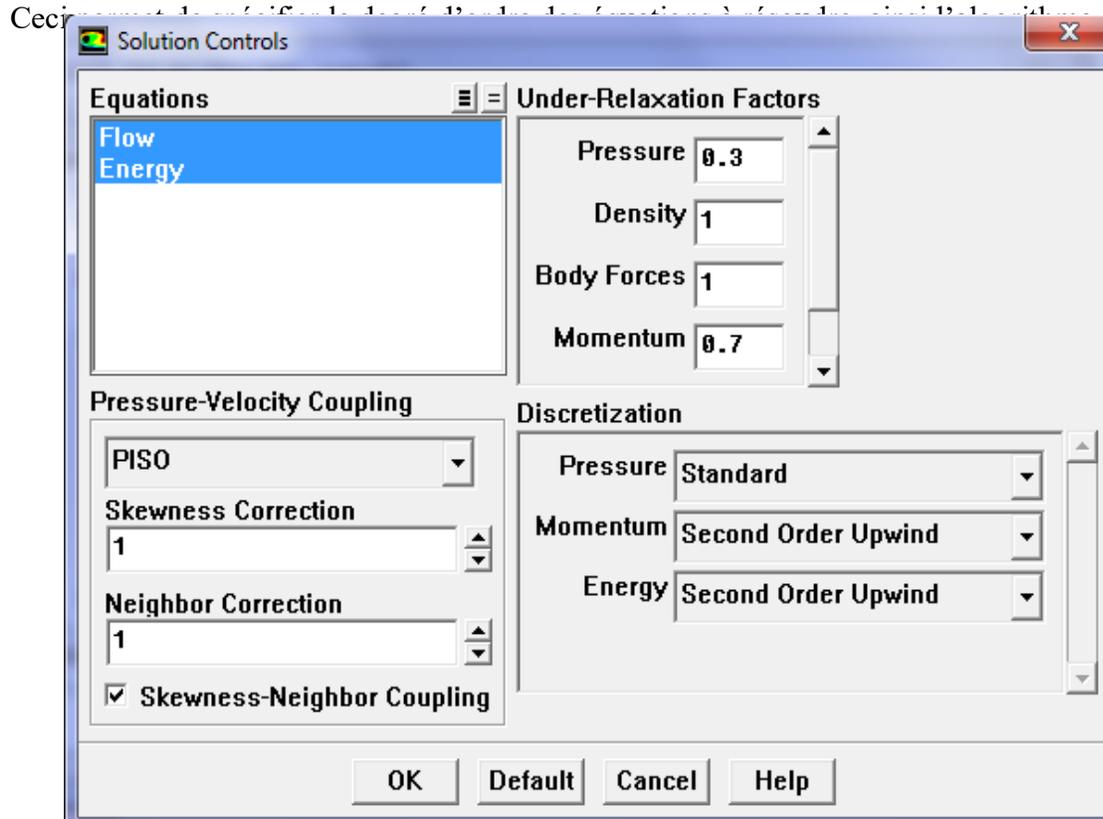


Figure 3. 27 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme

3.6.2.12 Lancement du calcul

Solve → Iterate

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

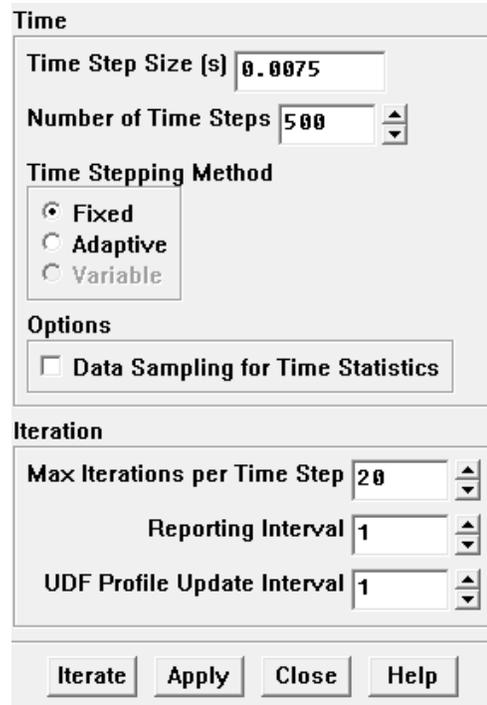


Figure 3. 28 : Choix du nombre des itérations

3.7 Conclusion

Dans ce présent chapitre, on a essayé de définir avec un peu plus de détail notre simulation numérique sous FLUENT. D'abord, on a présenté une procédure qui illustre en général les étapes principales de résolution. Puis, on a défini la géométrie du problème avec la construction du maillage sous GAMBIT. Les conditions aux limites sont présentées pour chaque cas étudié.

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.

CHAPITRE 4 : résultats et interprétations

4.1 Résultats et interprétations

Dans ce chapitre, nous avons fait une simulation numérique de la convection naturelle en régime laminaire d'un écoulement d'air chauffé par un mur Trombe en utilisant l'un des codes CFD 'Fluent' (Version : 6.3).

L'étude numérique bidimensionnelle de l'écoulement laminaire transitoire a été menée pour les deux modèles de mur de trombe, le premier modèle est simple alors que le deuxième est cannelé. Le temps total de la simulation est de 4 mn (240s).

Les résultats numériques de la simulation ont été validés par les travaux antérieurs sur les murs trombe [41,42].

4.1.1 Maillage

La figure suivante montre l'illustration du maillage pour les deux modèles de murs pour le temps $t= 45s$ de la simulation, l'utilisation d'un maillage triangulaire pour les deux modèles considérés.

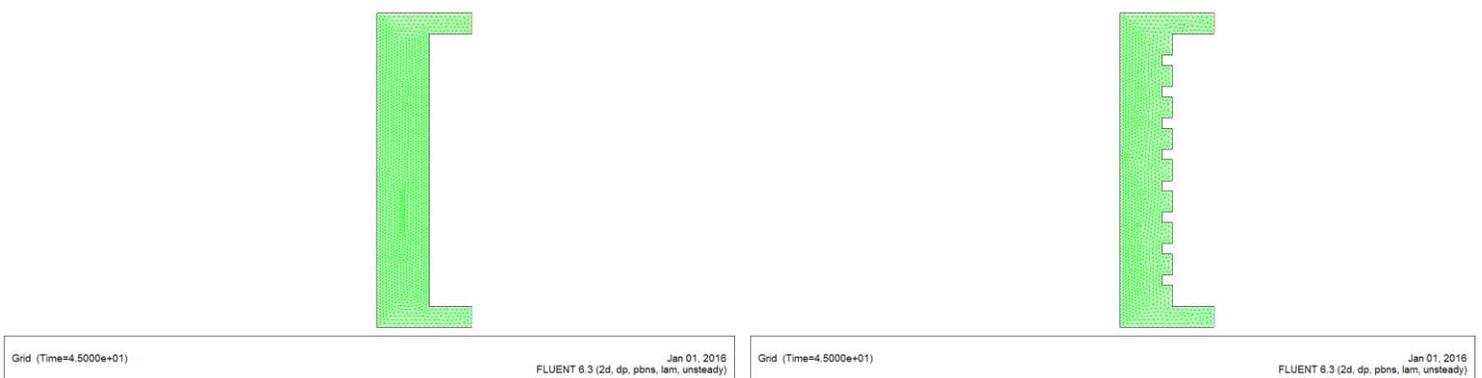


Figure 4. 1 : Maillage des géométries

4.1.2 Vitesse et température

La figure 4.2, montre l'évolution du contour de la vitesse et du contour de la température jusqu'au temps $t=45s$ et les profils de la figure 4.3 et figure 4.4 jusqu'au temps $t=45$, montrent la distribution de la vitesse et de la température a la sortie des modèles de murs de trombe. Les cannelures du deuxième modèle provoque un ralentissement de l'écoulement par rapport au premier modèle ce qui a permis un chauffage plus important de l'air.

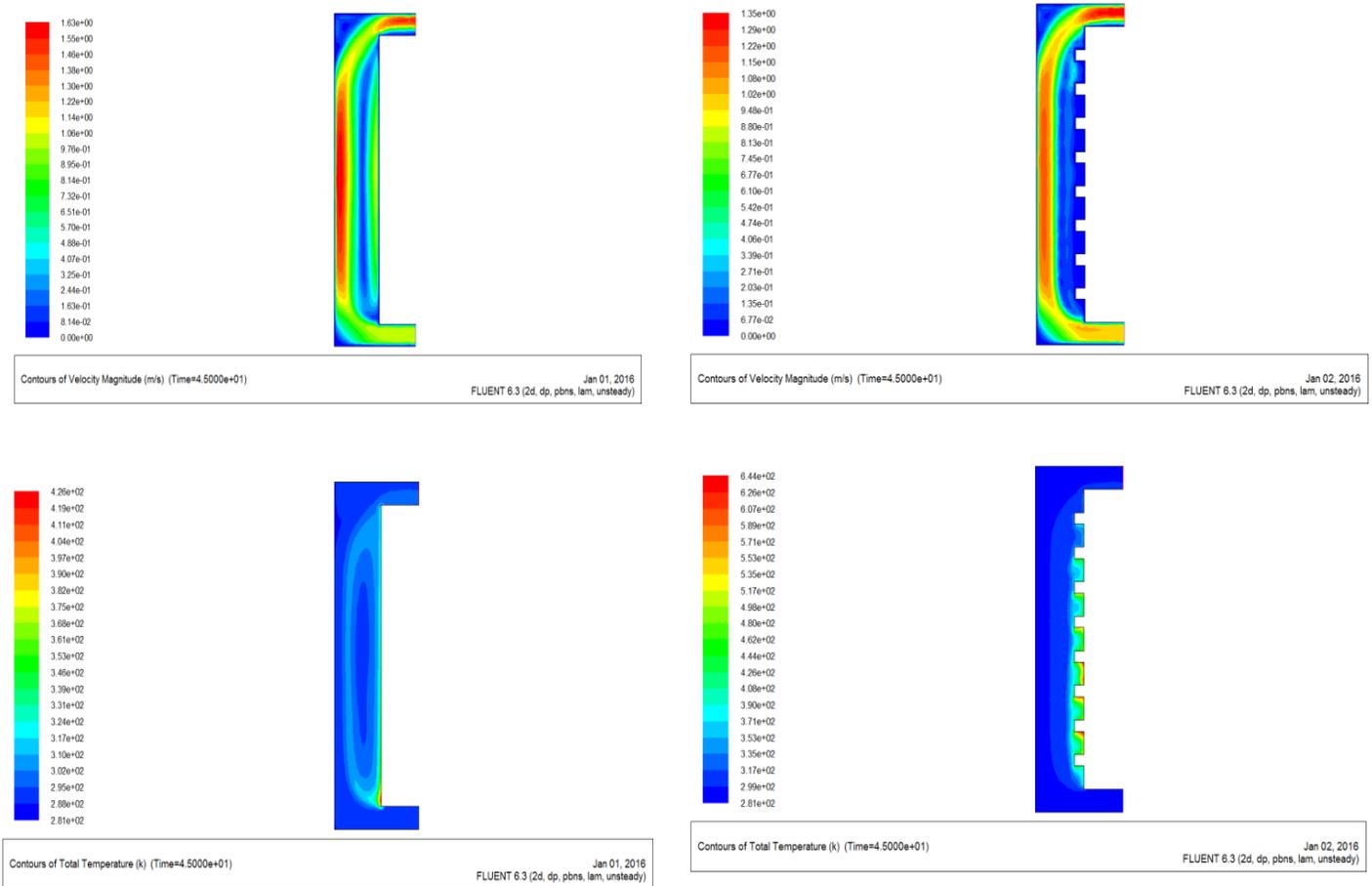


Figure 4. 2 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=45$ s

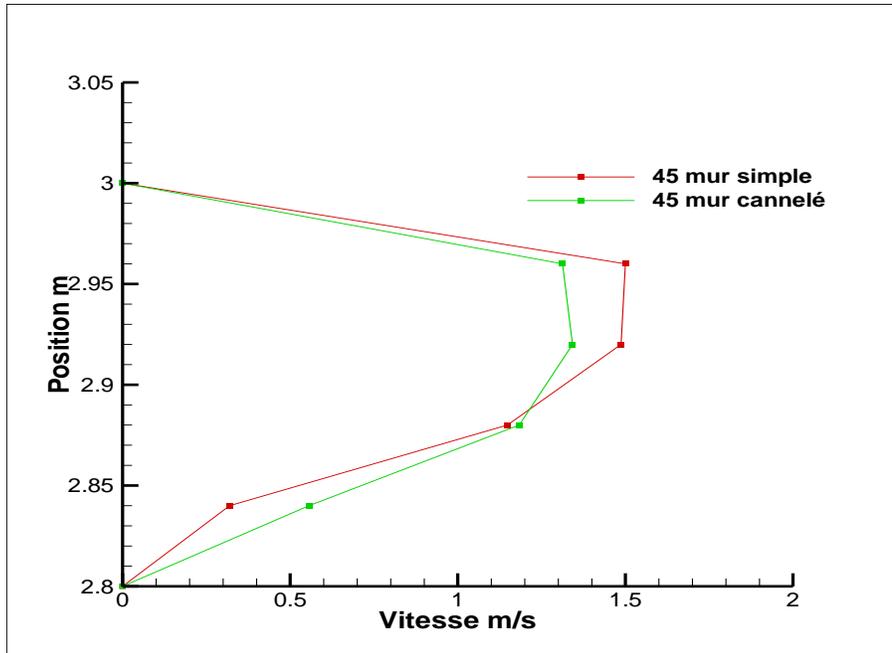


Figure 4. 3 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=45s

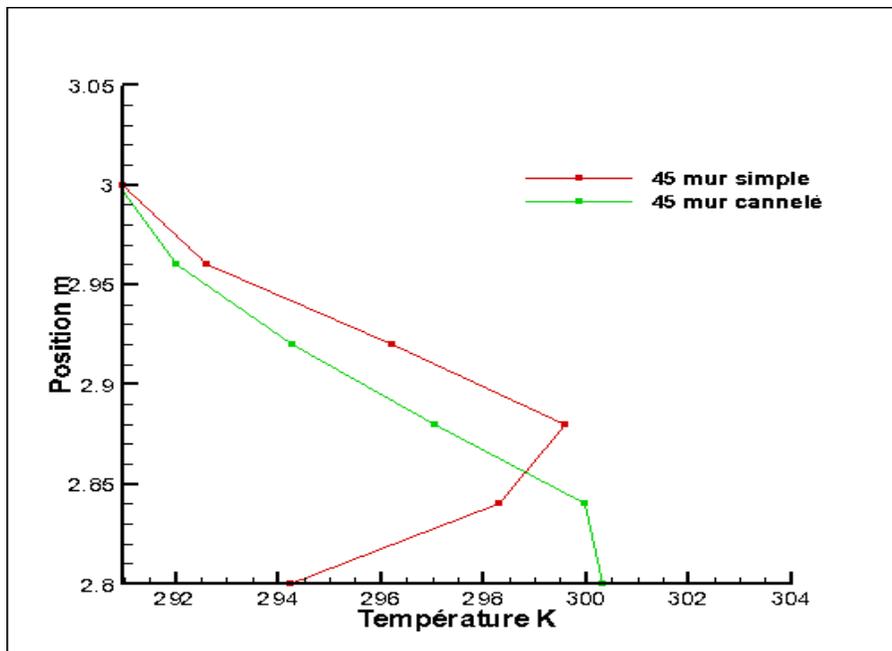


Figure 4. 4 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=45s

4.1.3 Le temps

Pour les autres figures (Fig 4.5, Fig 4.6 , Fig 4.7, Fig 4.8, Fig 4.9, Fig 4.10, Fig 4.11, Fig 4.12, Fig 4.13, Fig 4.14, Fig 4.15, Fig 4.16, Fig 4.17, Fig 4.18, Fig 4.19, Fig 4.20, Fig 4.21, Fig 4.22, Fig 4.23, Fig 4.24, Fig 4.25)l'augmentation du temps de la simulation a conduit a chaque fois a une augmentation du chauffage de l'air (Le flux de chaleur constant au cour du temps) avec une distribution du champ des vitesse plus stable plus encore a la sortie des deux modèles de murs de trombe (considération de l'écoulement laminaire).Le temps de $t=240s$ est le temps maximum de la simulation pour un maximum d'échange de chaleur pendant le temps écoulé de cette simulation.

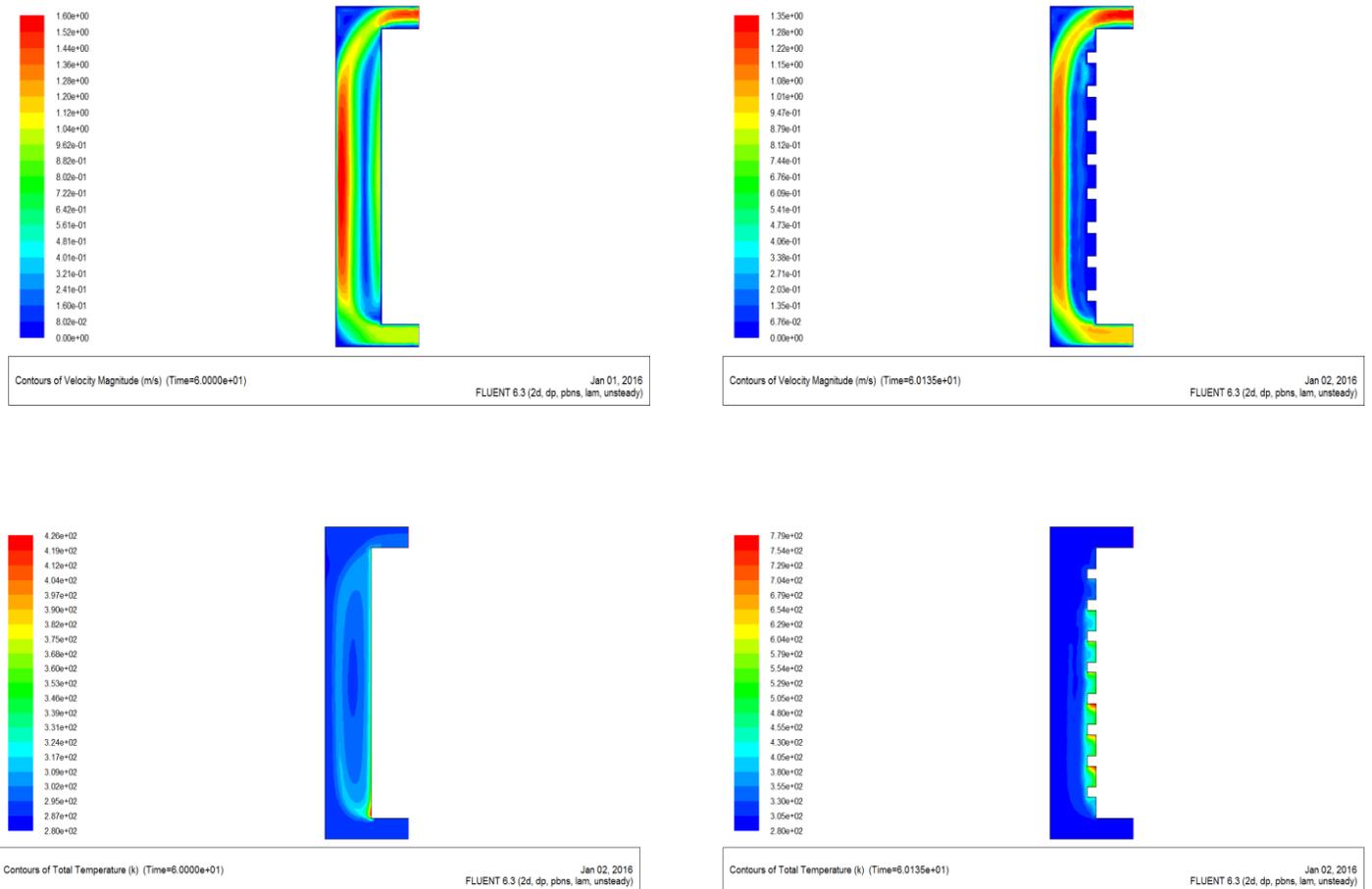


Figure 4. 5 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=60 s$

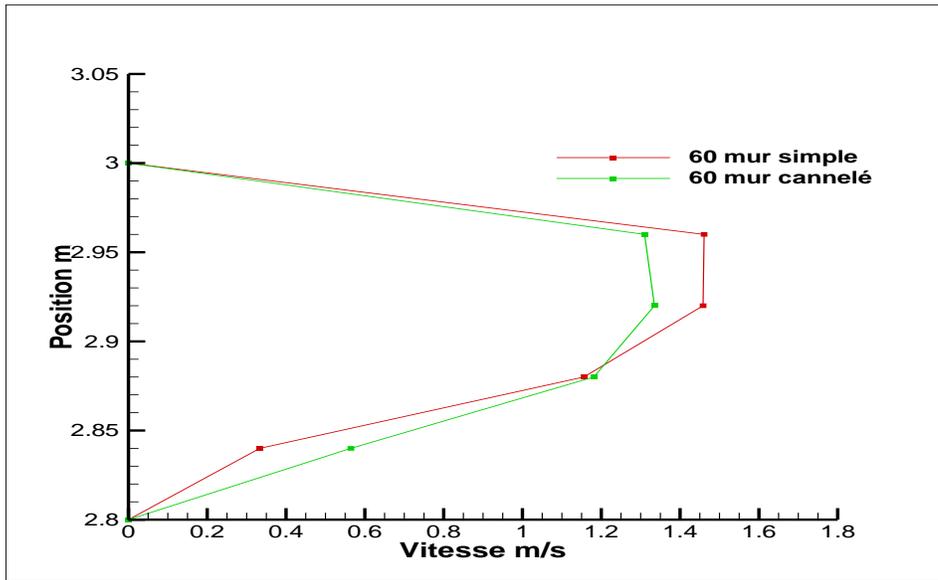


Figure 4. 6 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=60s

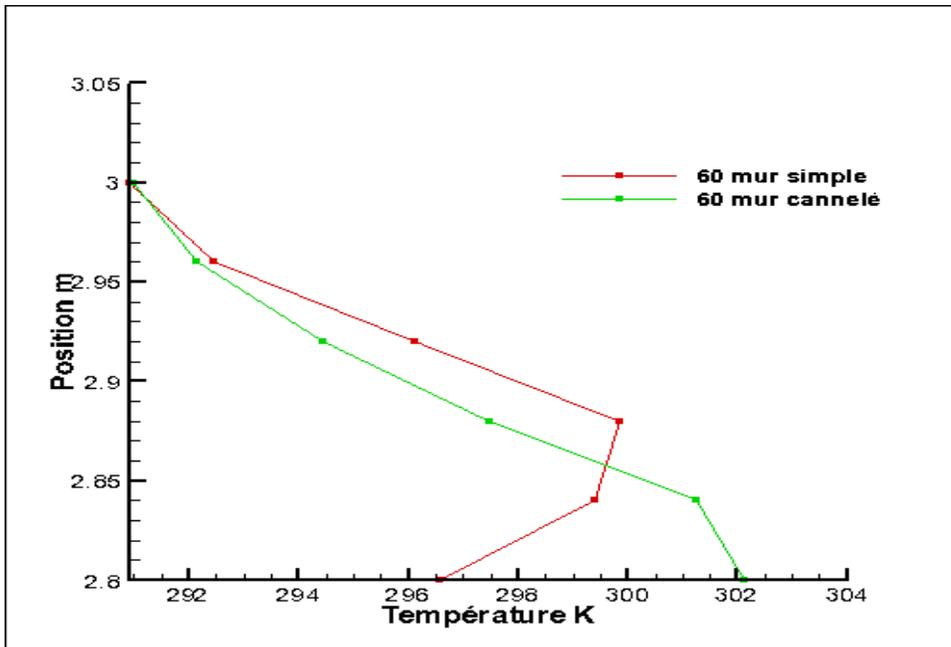


Figure 4. 7 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=60s

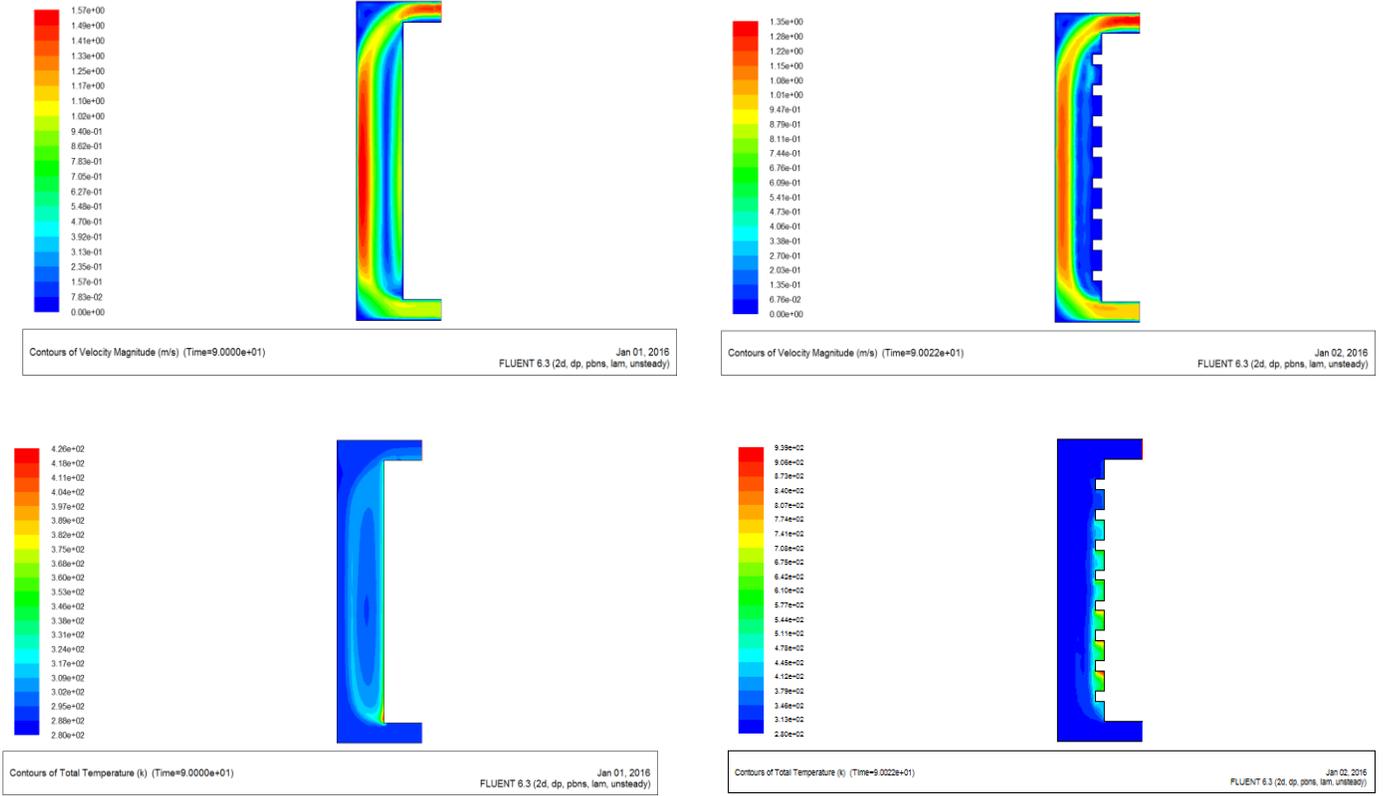


Figure 4. 8 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=90$ s

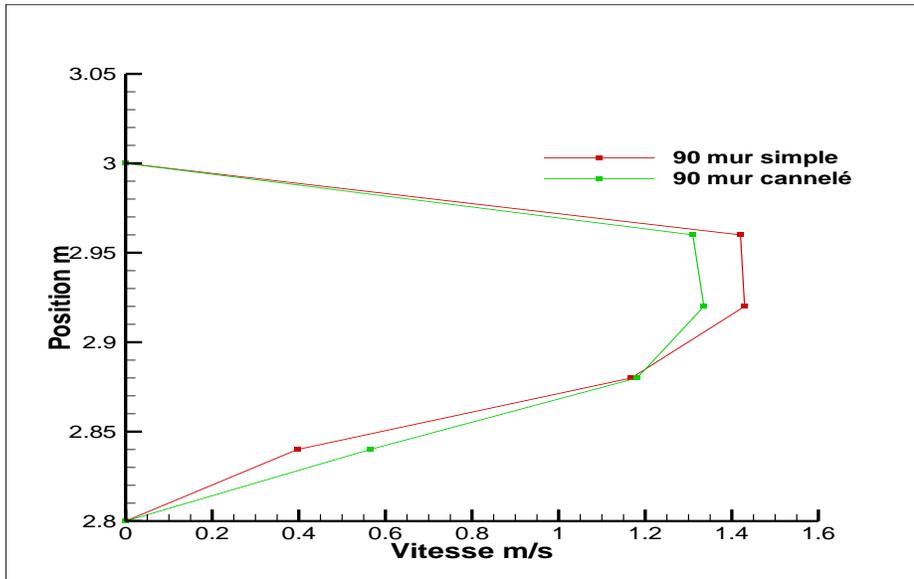


Figure 4. 9 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=90$ s

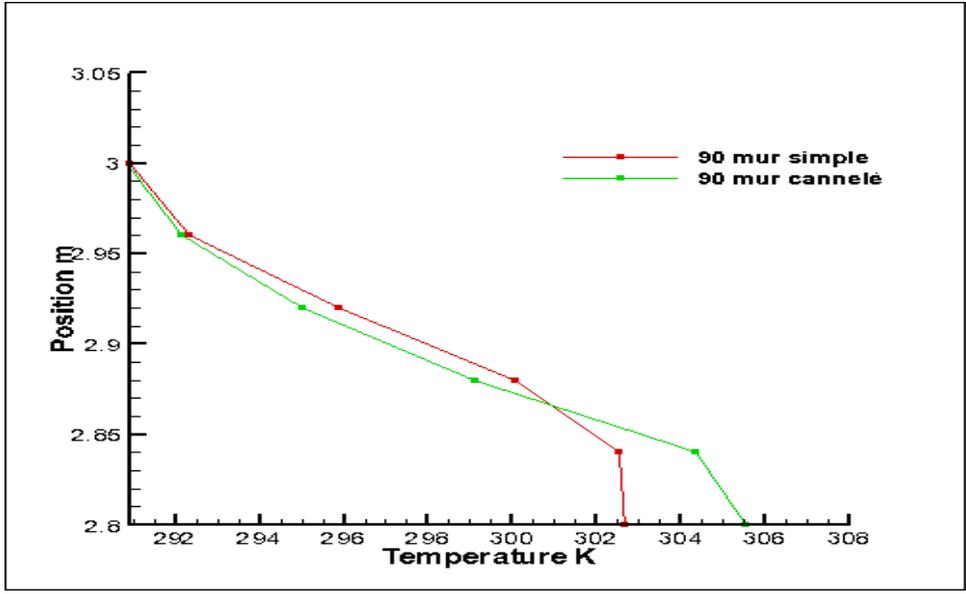


Figure 4. 10 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=90s

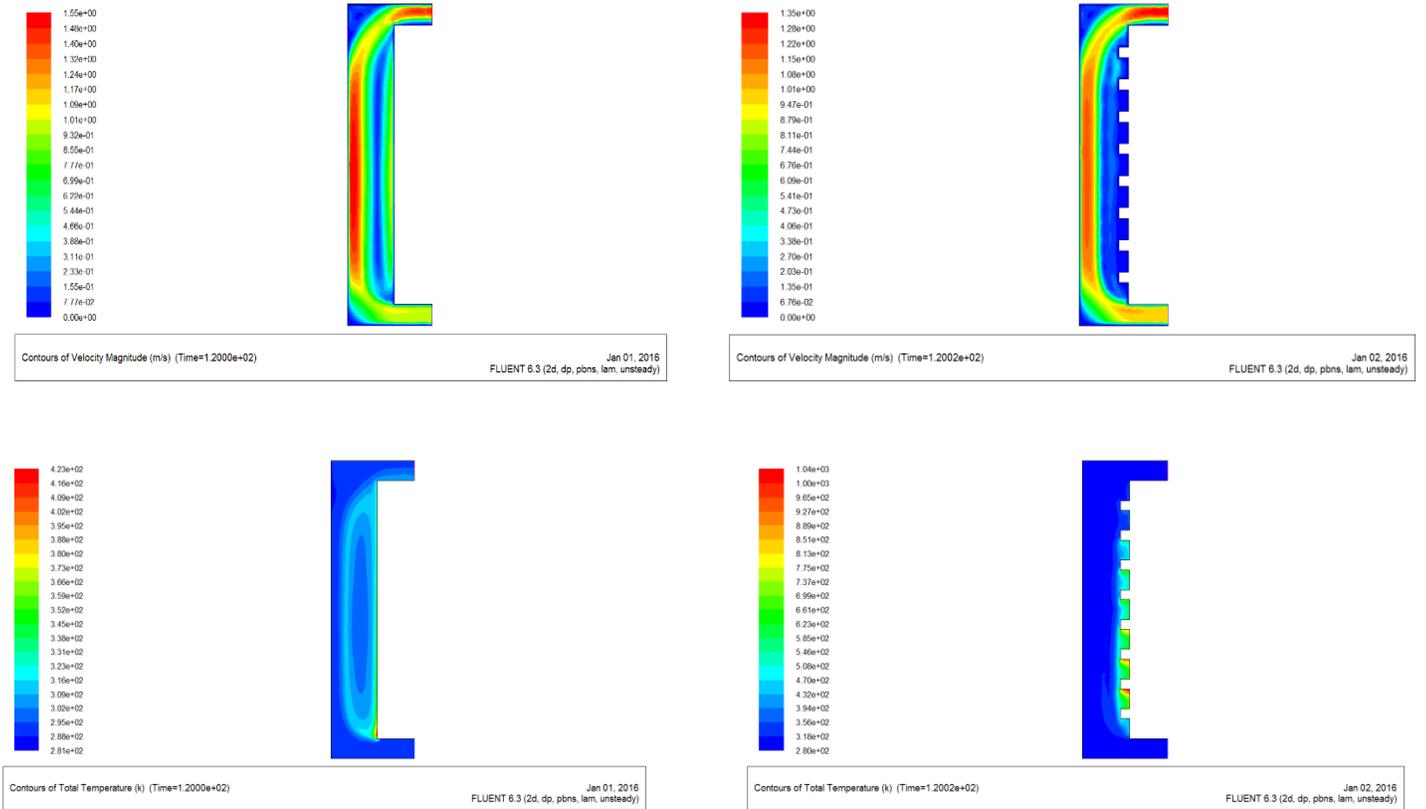


Figure 4. 11 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps t=120 s

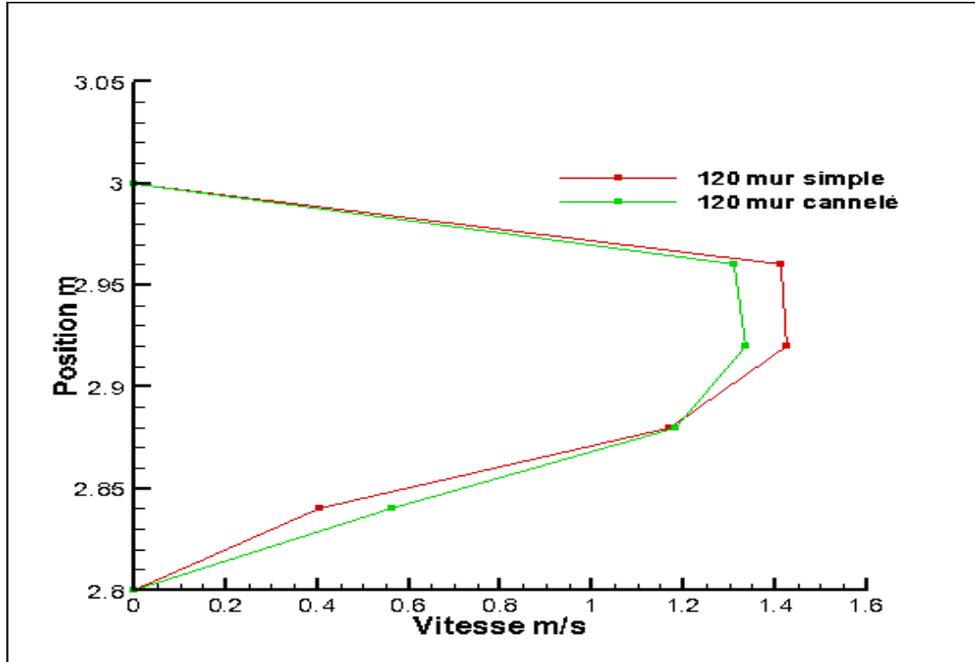


Figure 4. 12 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=120s

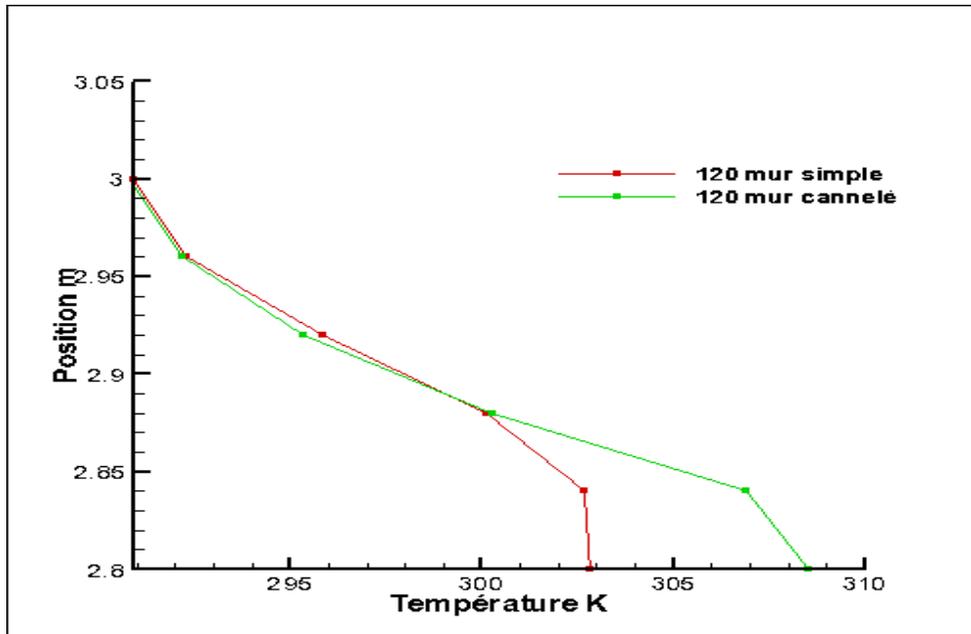


Figure 4. 13 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=120s

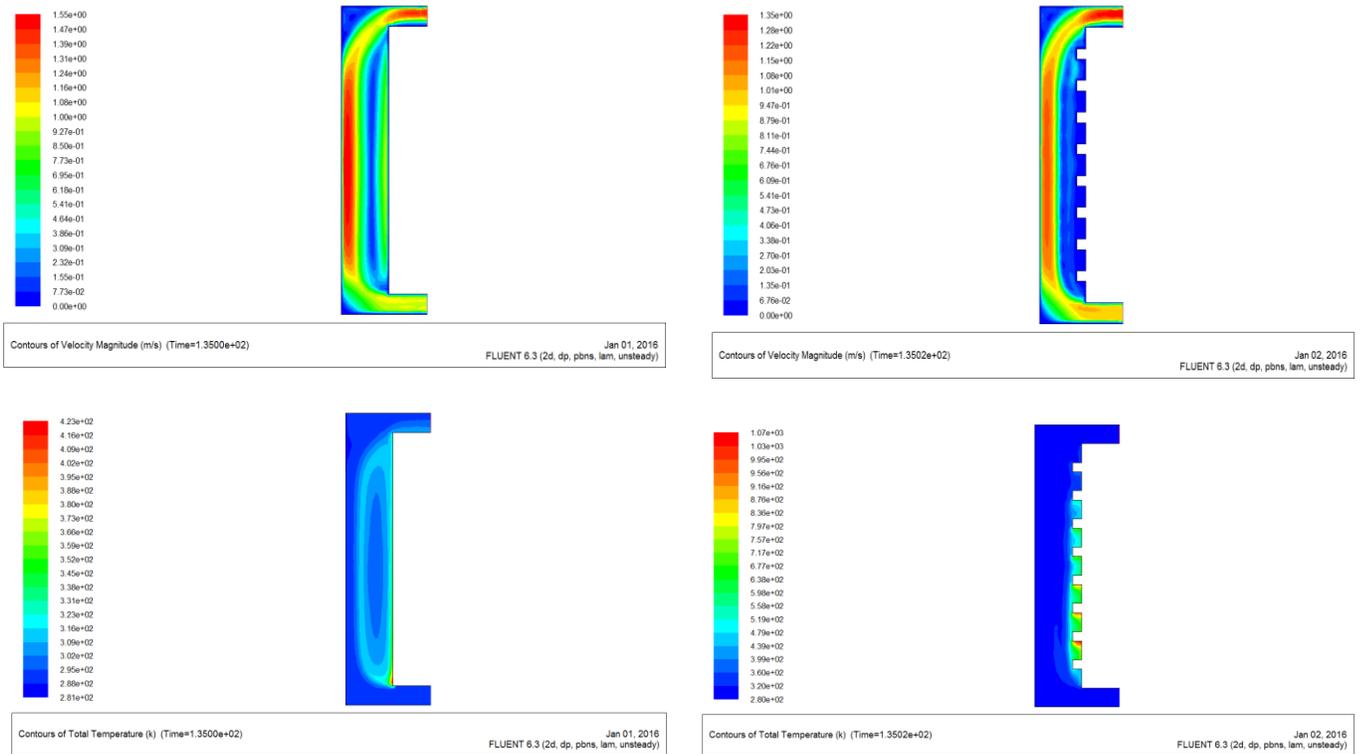


Figure 4. 14 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=135$ s

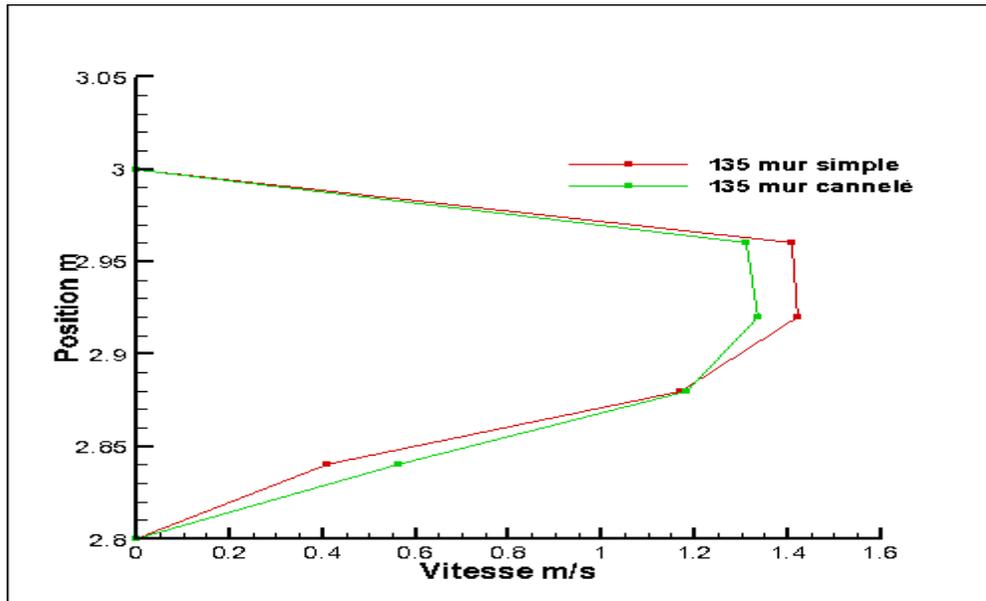


Figure 4. 15 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=135$ s

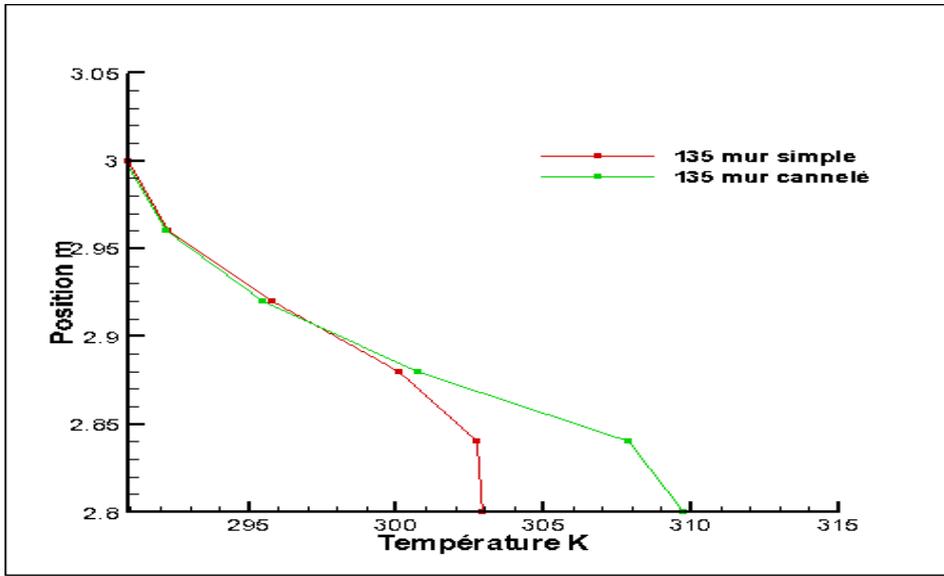


Figure 4. 16 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=135s

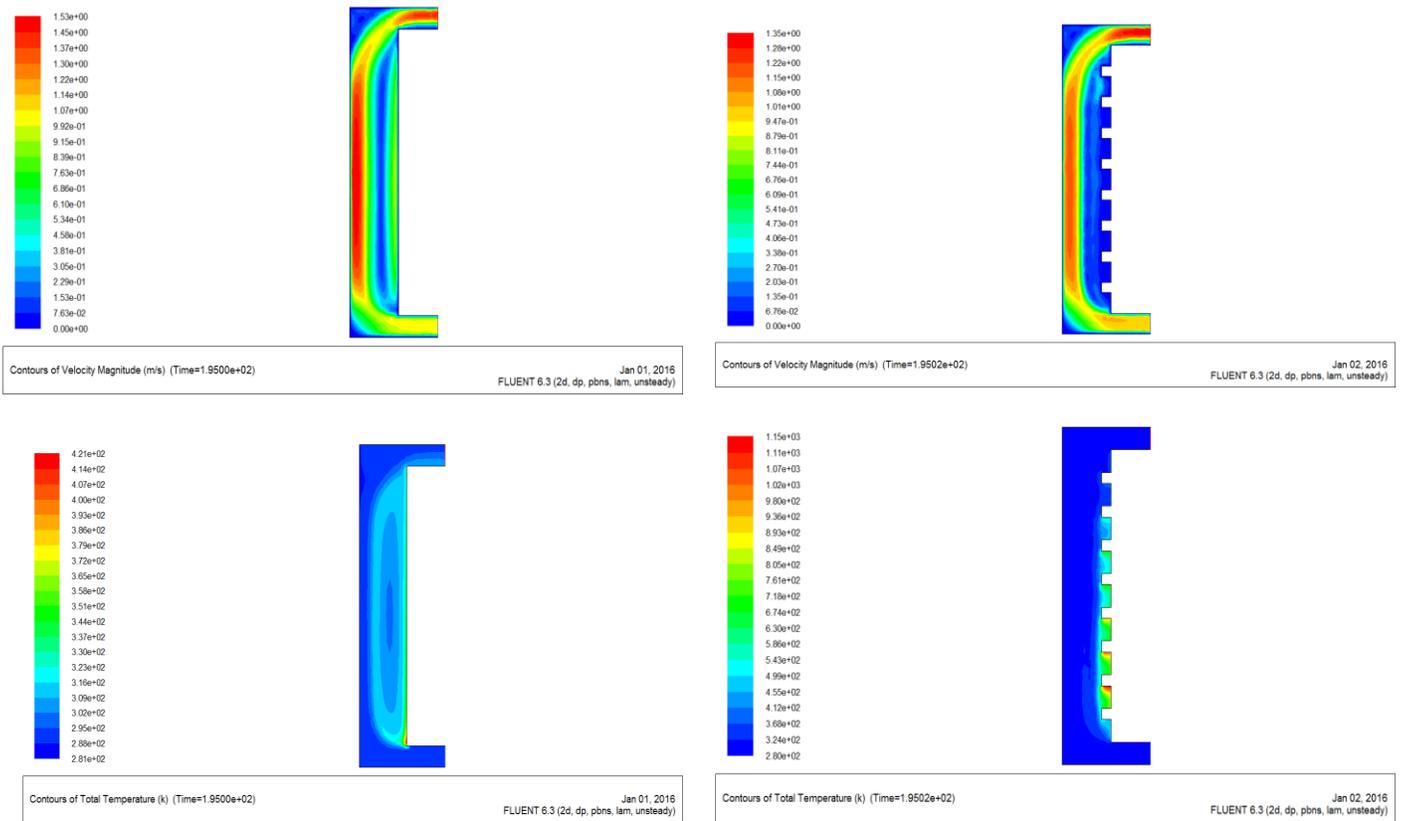


Figure 4. 17 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps t=195 s

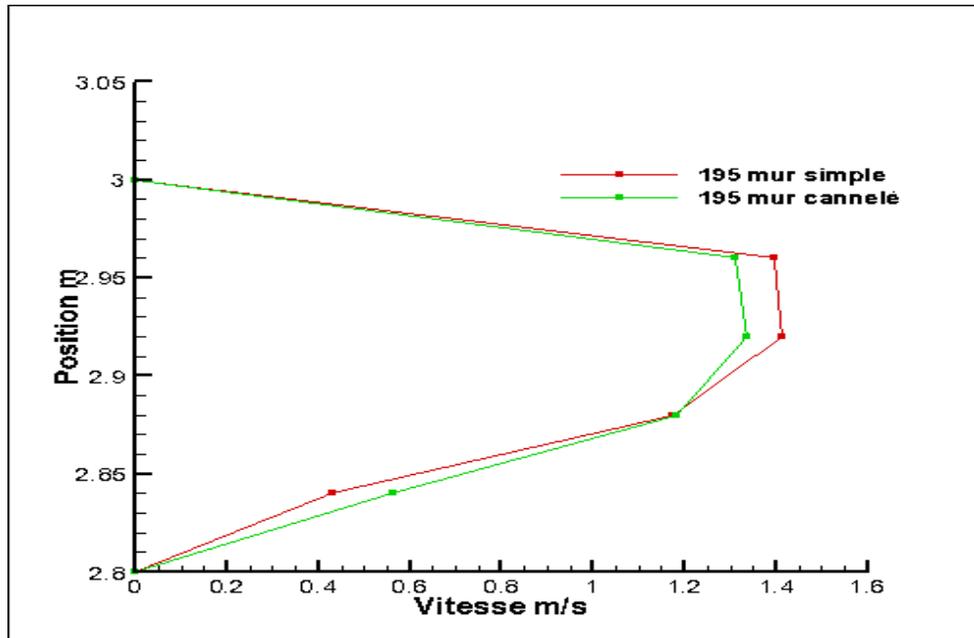


Figure 4. 18 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=195s

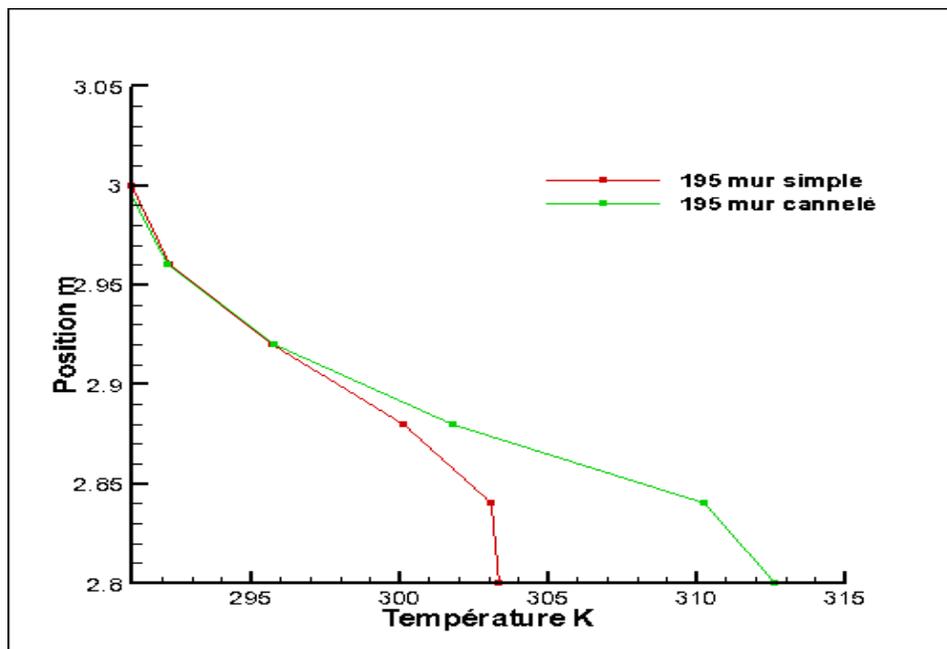


Figure 4. 19 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=195s

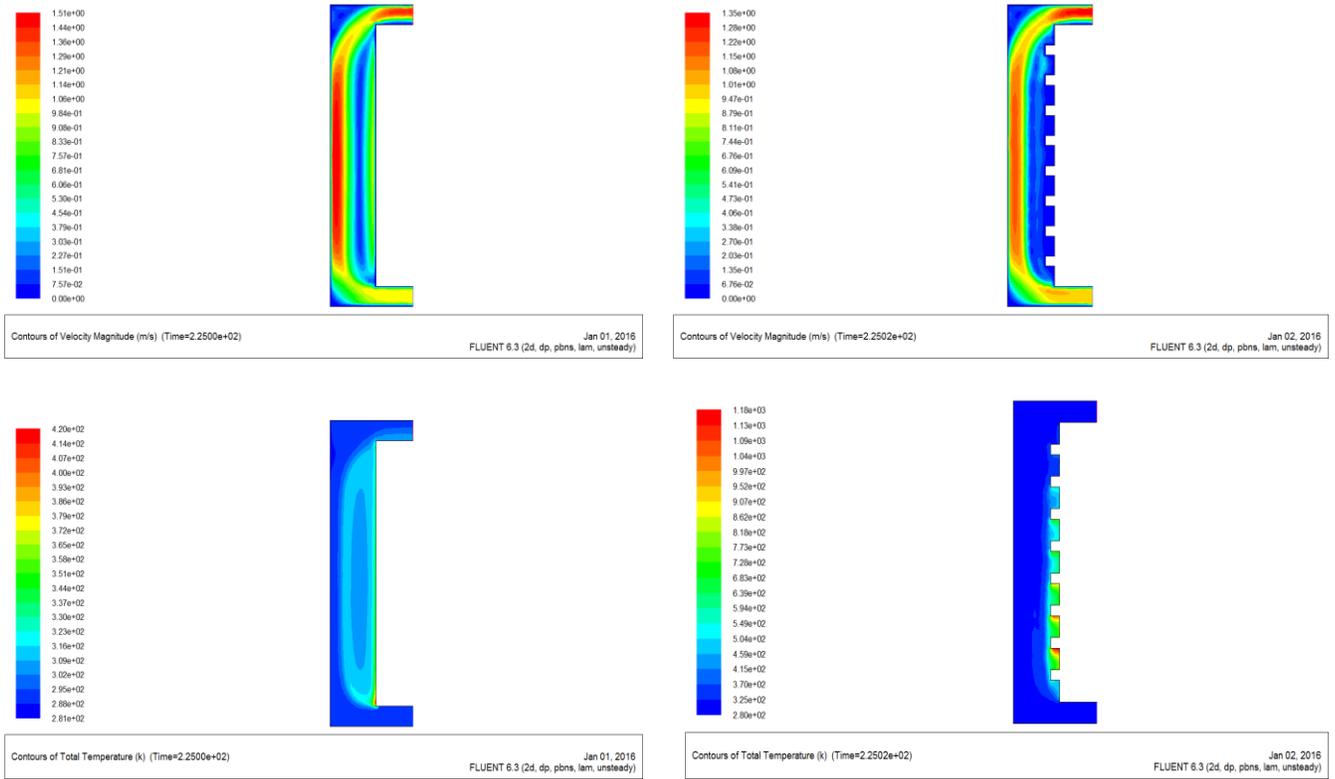


Figure 4. 20 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps $t=225$ s

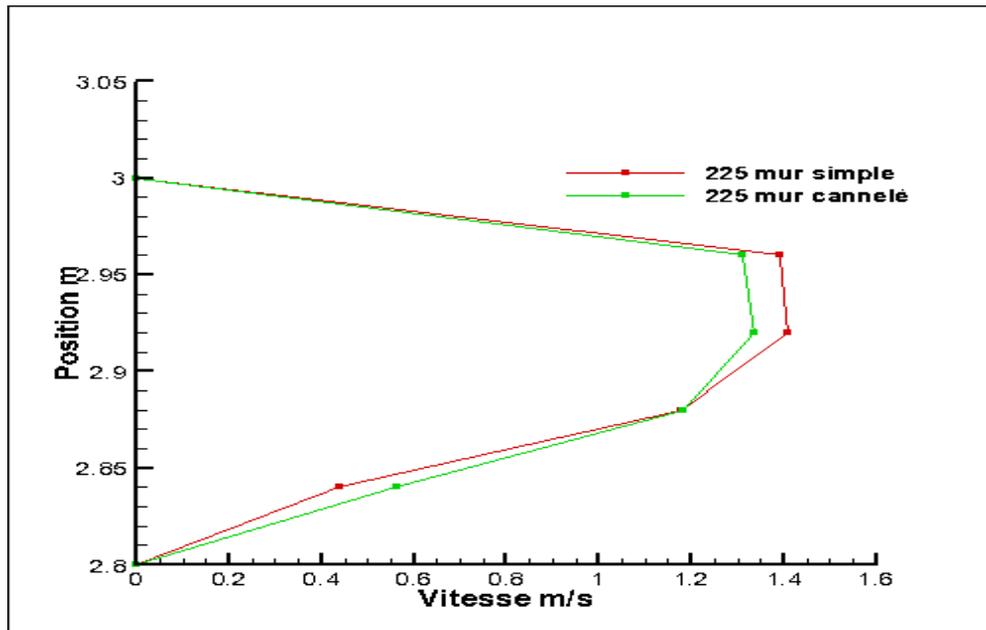


Figure 4. 21 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à $t=225$ s

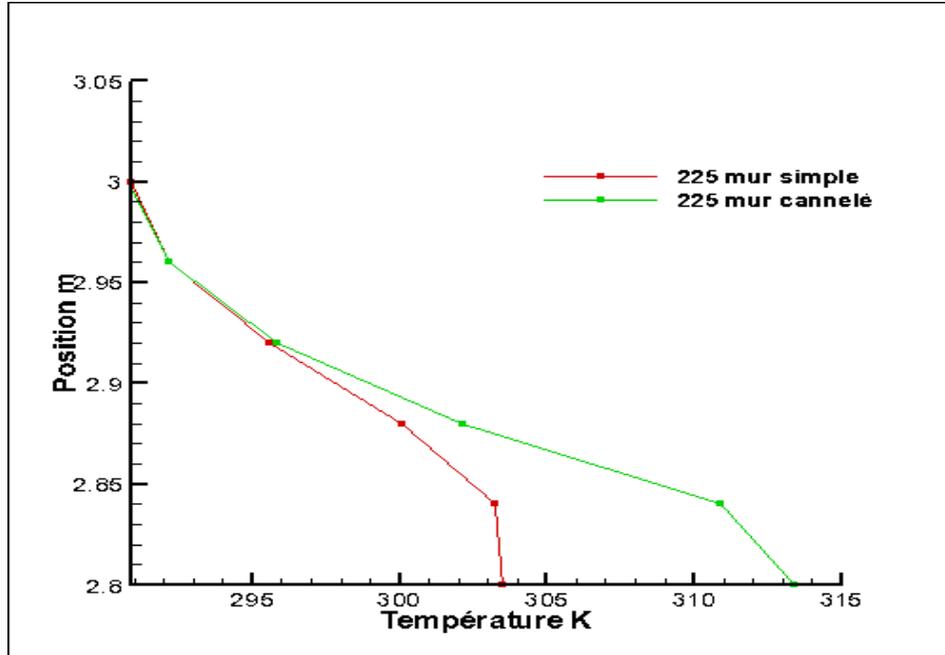


Figure 4. 22 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=225s

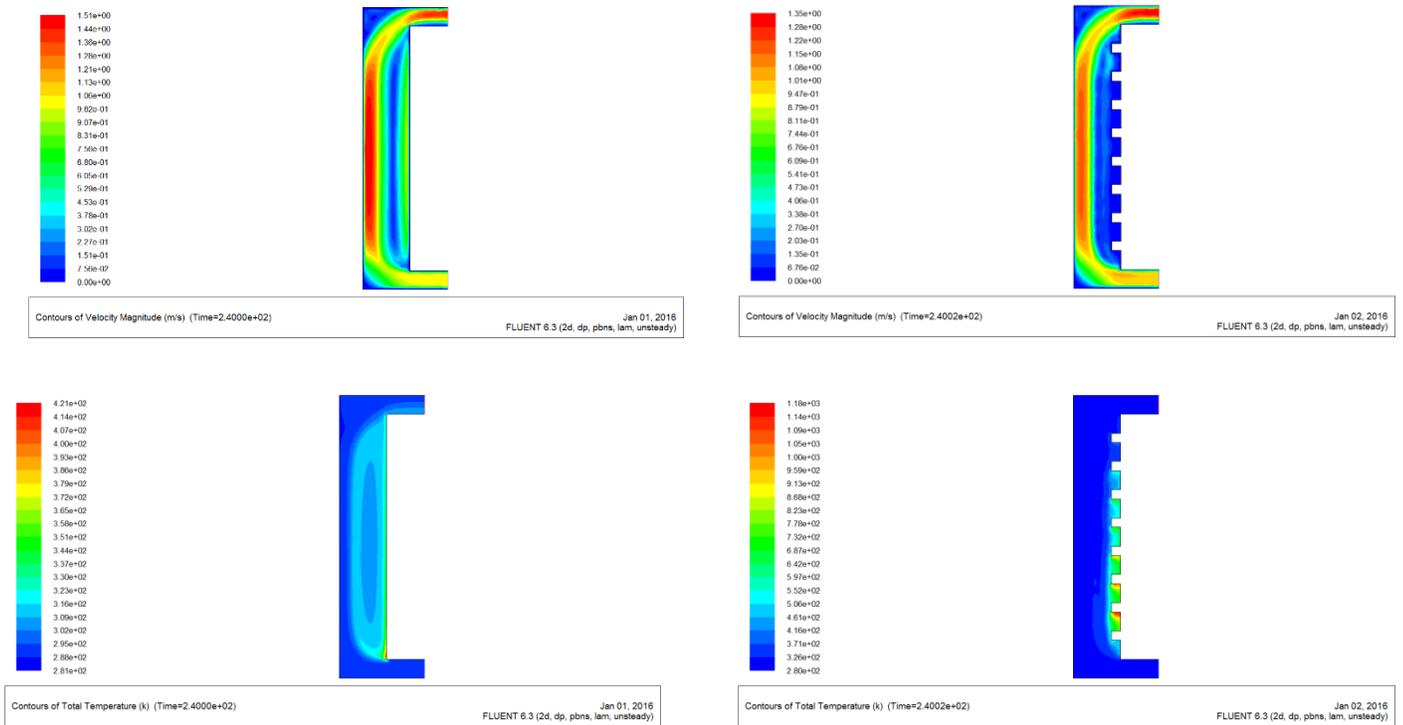


Figure 4. 23 : Contour de la vitesse et de la température pour un temps t=240 s

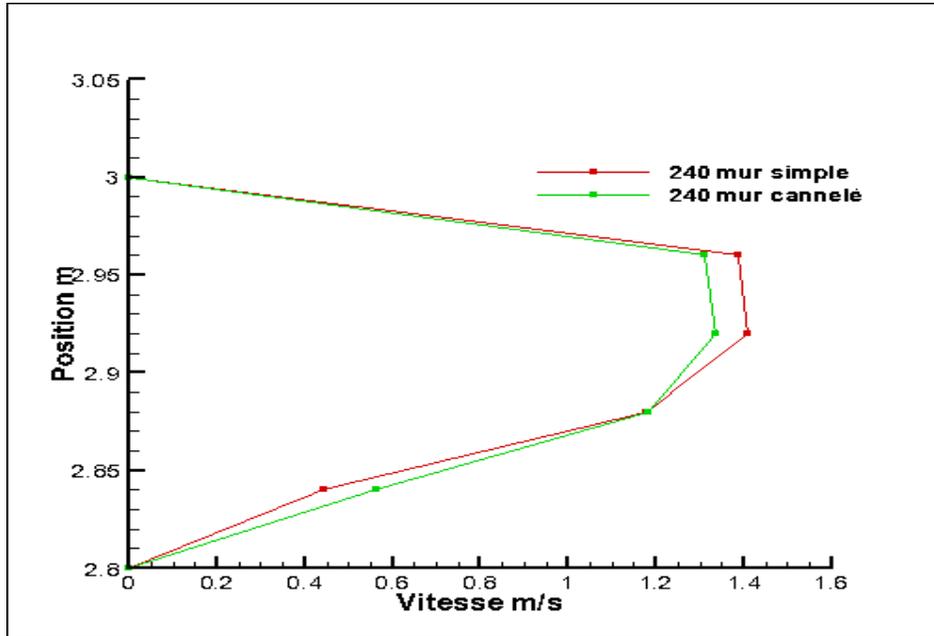


Figure 4. 24 : Distribution de la vitesse à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=240s

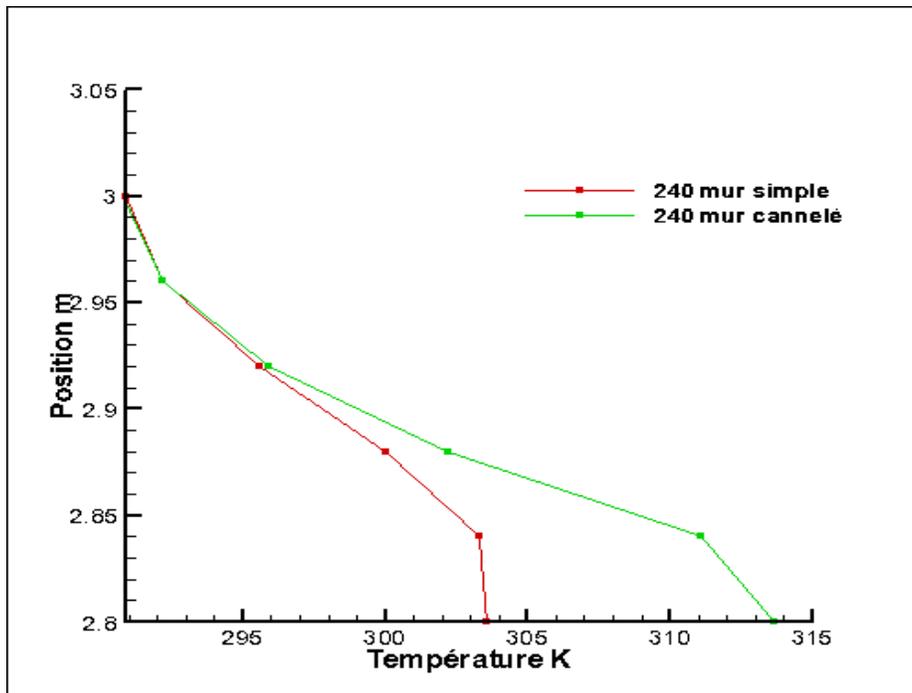


Figure 4. 25 : Distribution de la température à la sortie des deux modèles de mur trombe à t=240s

4.1.4 Le flux

Les figures suivantes montrent l'évolution de la température à la sortie du mur trombe pour différentes densités de flux de chaleur imposé sur le mur pour $t= 45$ secondes $\varphi=300\text{W/m}^2$, $\varphi=400\text{W/m}^2$, $\varphi=500\text{W/m}^2$.

Chaque fois qu'on augmente la valeur de la densité du flux de chaleur, la température à la sortie du mur trombe augmente pour les deux modèles. L'échange de chaleur le plus important est pour le mur trombe cannelé à $\varphi= 500\text{W/m}^2$.

La température à la sortie des deux modèles de mur trombe est proportionnelle à la densité de flux de chaleur sur le mur.

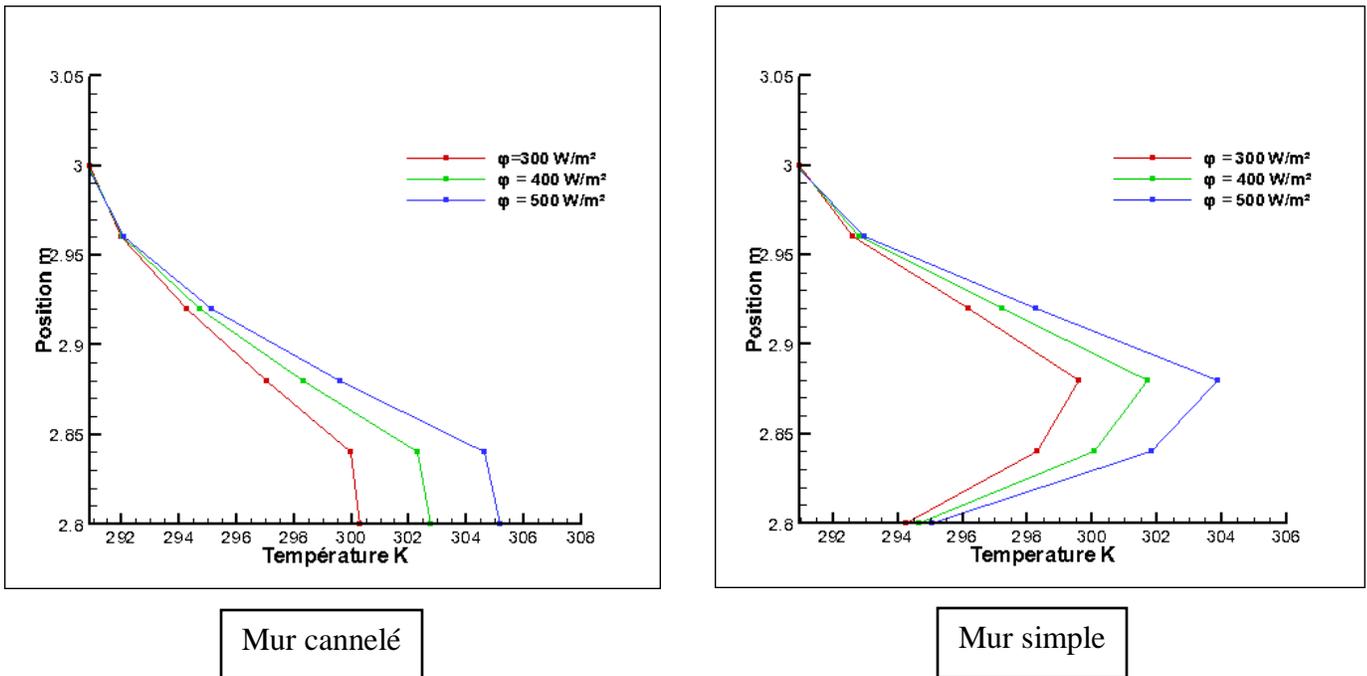


Figure 4. 26 : Profils de la température pour différents flux de chaleur du mur trombe à la sortie du mur pendant le temps $t=45$ s

CONCLUSION GENERALE

Le mur Trombe, également appelé mur Trombe-Michel est particulièrement adapté aux constructions bioclimatiques dont le but est de limiter les besoins en chauffage et d'utiliser de manière optimale les ressources énergétiques propres.

Pour assurer un bon confort thermique avec une énergie propre (énergie solaire), on a fait une simulation numérique pour deux modèles: mur trombe simple qui est déjà étudié dans la littérature et un mur trombe cannelé qui présente une nouvelle configuration des murs Trombe. Ce deuxième modèle de mur de trombe nous a permis d'avoir un échange thermique important par rapport au mur simple.

La dynamique des fluides computationnelle (CFD) a été utilisée pour la simulation du flux d'air dans les deux modèles de mur trombe.

La comparaison des résultats des deux modèles est basée sur la comparaison de la température et de la vitesse à la sortie du mur et pour les temps suivantes: $t=45s$, $t=60s$, $t=90s$, $t=120s$, $t=135s$, $t=195s$, $t=225s$, $t=240s$.

L'étude du chauffage de la lame d'air au sein du mur Trombe en fonction du temps nous a permis d'observer l'évolution de la température et de la vitesse en fonction du temps pour chaque modèle. Cela est réalisé en prenant en considération que l'écoulement est stable en passant d'un temps à un autre (écoulement stationnaire).

Une amélioration significative de la température à la sortie du mur est constatée pour le modèle du mur Trombe cannelé par rapport au mur Trombe simple. Pour un temps de 240s, la température moyenne passe de $T=303.692\text{ K}$ pour le mur simple à $T=343.766\text{ K}$ pour le mur cannelé d'un pourcentage de 13.19 %.

L'influence de l'intensité du flux de chaleur reçu par les deux modèles de mur Trombe sur la température à la sortie est significatif: Plus le flux de chaleur augmente plus la température à la sortie des murs augmente. Pour un flux de 300W/m^2 et un temps $t=45s$, la température moyenne passe de $T=298.907\text{K}$ à $T=314.112\text{K}$ d'un pourcentage de 5.08%. Pour un flux de

400W/m² et un temps $t=45s$, la température moyenne passe de $T=301.021\text{ K}$ à $T=321.287\text{ K}$ d'un pourcentage de 6.73%. Pour un flux de 500W/m² et un temps $t=45s$, la température passe de $T=303.135\text{ K}$ à $T=328.468\text{ K}$ d'un pourcentage de 8.36 %.

Le mur est l'élément le plus crucial dans un mur Trombe destiné pour le stockage thermique. Notre modèle cannelé, que nous avons développé, nous a permis une bonne amélioration de l'échange thermique par rapport au mur Trombe simple. L'utilisation de cannelure a permis d'augmenter la surface d'échange entre l'air et le mur, ce qui a permis une amélioration de la température à la sortie du mur Trombe.

Une étude expérimentale sur notre modèle numérique est fortement recommandée pour les futurs travaux. D'autres paramètres peuvent être étudiés tels que la variation des dimensions des cannelures, fabriquer les cannelures par des matériaux très conductrices de la chaleur (cuivre, aluminium, etc..) pour assurer un échange de chaleur optimale.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] A. B. Stambouli, “Promotion of renewable energies in Algeria: Strategies and perspectives,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 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] Bulletin des Énergies Renouvelables - N° 22 2012 Centre de Développement des Énergies Renouvelables -Ministère de l’Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique).
- [6] Salomon, S et Bedel, S .La maison des méga watts, Le guide malin de l'énergie chez. Terre vivante.2004.
- [7] Schneider Electric. Le livre blanc de l’Efficacité énergétique. février 2011.
- [8] Memoiretechnique du bâtiment, confort technique, CERTU – 2003
- [9] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE Standard 55 – 2004
- [10] DTR C3.2/4 'Document Technique Réglementaire, Règlementation Thermique Algérienne du Bâtiment', CNERIB, 2016.
- [11] J.L.Barras « Cours de Physique ». Collège du Sud, Bulle. Avril 2001.
- [12] Joseph Fourier,*Théorie analytique de la chaleur*, 1822 .Édouard Leroy, « *Sur l'intégration des équations de la chaleur* », *ASENS*, 3^e série, t. 14, 1897, p. 379-465
- [13] Appellation recommandée par la Commission internationale de l'éclairage (anciennement émittance énergétique)
- [14] C. Long & N. Sayma. « Heat Transfer ». Chris Long, NaserSayma&Ventus Publishing APS ISBN 978- 87-7681-432-8. 2009.
- [15] P. A. C. Raats, « SteadyGravitational Convection Induced by a Line Source of Salt in a Soil », *Soil Science Society of America Journal*, n° 33, 1969, p. 483-487
- [16] B. GIVONI l’homme, l’architecture et le climat Edition : Le Moniteur Paris 1978 p.45.

- [17] D.WRIGHT, « Manuel d'architecture naturelle », Traduction française et adaptation de P. Bazan, Edition Parenthèses. Paris, p 219, 2005.
- [18] V. OLGYAY, «Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism », Princeton, University Press, N.J., U.S.A., page.185, 1963.
- [19] Izard, J. L., &Guyot, A.. Archi Bio, Ed. Parenthèses, p52, 1979.
- [20] P. Fernandez.,. Genius Loci : paysage, ambiance, architecture. Edition Pierre Mardaga. Liège, p.5.,1981.
- [21] Liébard,A.etHerde,A « Traitéd'architecture et d'urbanisme bioclimatiques ».Ed .Le Moniteur .Paris (p.30a, 2005).
- [22] Khaled IMESSAD, « caractérisation des sensations thermiques et de la réponse physiologique chez l'être humain, contribution a l'étude des indices de confort », Université de Blida,p 25, 2011.
- [23] http://fr.slideshare.net/naila_athamnia/chapitre3-conf-th>
- [24] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10250>.
- [25] Liébard, A. et De Herde, A. « Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique ; concevoir, édifier et aménager avec le développement durable », Edition le moniteur, Paris. 2005.
- [26] T. Salmon et S. Bedel « La maison des [méga] Watts, Le guide malin de l'énergie chez soi ». Ed. Terre Vivante. Mens. 25 p, 2004.
- [27] <https://www.paperblog.fr/5906643/reduire-l-effet-de-paroi-froide/>
- [28] <https://coproprietes.senova.fr/conseils-techniques/ameliorer-confort-copropriete-sans-travaux/attachment/confort-temperature-ressentie/>
- [29] Développer une architecture bioclimatique méditerranéenne. (fichier PDF)
- [30] Akbari, H., &Borgers, T. R. (1979). Free convective laminar flow within the Trombe wallchannel. Solar Energy, 22(2), 165–174.
- [31] Courgey, S., & Oliva, J.-P. (2006,2007). La Conception Bioclimatique .Mens,France:Terre Vivante
- [32] Conception bioclimatique des bâtiments K. Tsipras(Page 214).
- [33] Bioclimatic design of buildings K. Tsipiras (page 213).
- [34] D.M. Utzinger, 'Analysis of Building Components Related to Direct Solar Heating of Building', M.S. Thesis, University of Winconsin, Madison, 1979.

- [35] A. Zerrouki, 'Expérimentation d'un Capteur Solaire à Air avec Absorbeur en Forme de Persiennes pour une Utilisation en Architecture'. Thèse de Magister, Centre d'Etudes Nucléaires et Solaires, 1986.
- [36] A. Akbarzadeh, W.W.S. Charters and D.A. Lessbi, '*Thermocirculation Characteristics of a Trombe Wall Passive Test Cell*', Solar Energy, Vol. 28, N°6, 1982.
- [37] Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 195-198 Evaluation des Performances d'un Mur Trombe.
- [38] Alamdari F. Hammond G., (1963) Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms, Build. Serv. Rex Technol., 4 106-112.
- [39] www.thermal-engineering.org
- [40] Thèse doctorat : Oulhaci Zohour Safia. simulation numérique des écoulements autour d'une éolienne.
- [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.