

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de master

Spécialité : énergies renouvelables

Option : habitation et bioclimatique

Etude numérique d'un mur de TROMBE

Présenté par : GHEMATI faiz .BENDEHINA ayoub aissa

Encadré par : Mr.LAFRI

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

Louange à Allah, qui nous a permis d'achever ce travail et nous a donné la capacité de l'accomplir.

J'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, à tous ceux qui nous ont donné de son temps et nous ont bénéficié de ses connaissances, ont participé avec nous, même avec un mot gentil.

Je remercie également tous ceux qui ont contribué à mon éducation, depuis mes parents généreux et ma famille jusqu'à mes professeurs, amis et collègues.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents

Me frère Marouane, ma petite sœur khadidja et ma famille

À mes professeurs superviseurs

Et mon professeur Semmar que je respecte

À mes chers amis

Yazid, Oussama, Adnan...

À mes amis

Mes chats

Symba, caramelo

À mes collègues à tous les niveaux

Pour tous ceux que nous savions, et qui était un grand soutien

pour nous

A toi, chercheur de connaissances

Je dédie ce travail à vous

Faiz

Dédicaces

*Ce travail est dédié à mon père et a mère qui m'a poussé vers
l'avant.*

*A mes frère et sœur ibtihal aya Idris Racha amani et Oussama qui
ont été mon soutien morale et physique.*

*A mes chère amis brahem et toute la famille Djemil, Sidali, Hmida,
Ilyes, Mohamed, Djalil, amine, Islah Ahmed, akram, aymen, Linda,
Dounia, Siham, mes amis dans la résidence soumaa 3 qui ont été à
mes cotes dans les moments difficiles*

A mon promoteur à qui je dois beaucoup.

Ayoub

ملخص

يظل جدار المجمع -التخزين أحد أكثر الأنظمة كفاءة للتدفئة السلبية للمساحة. يعتمد أداء هذا الجدار على عدة معايير وهي: طبيعتها، وسمكها، ووجودها أو عدم دورانها الحراري وفي هذا العمل تم إجراء وباستخدام برنامج، دراسة رقمية على جدار شمسي كلاسيكي ترومبي في منطقة في الجنوب ومنطقة في الشمال الجزائري ونقوم بمقارنة بين النتائج. واخترنا ثلاثة أنواع من مواد البناء الحجر والخرسانة والطوب لمدة 10 ساعات من اليوم في فصل الشتاء في نقاط مختلفة من النظام (داخل الغرفة، جدار المستشعر (خارج، ...) كما نختار الخرسانة لتختلف بين ثلاث قيم لسمك الجدار ونقوم بإجراء مقارنة

Résumé

Le mur capteur–stockeur reste l'un des systèmes les plus efficaces pour le chauffage passif des locaux. Les performances de ce mur dépendent de plusieurs paramètres, à savoir : sa nature, son épaisseur, présence ou non de thermo circulation. Dans ce travail, avec l'utilisation de logiciel MATLAB SIMULINK, on a fait une étude numérique menée sur un mur solaire TROMBE classique à deux régions nord et sud algérien un mur sombre orienté plein sud. On a choisi trois types de nature de le mur ; Béton Brique et de la pierre, où on a surveillé la variation des températures aux différents points du système (l'intérieure de la chambre, mur capteur (extérieur,...) pendant 10 heures de la journée dans l'hiver. Les résultats nous ont confirmés l'incidence de la thermo circulation ce qui augmente la température de la chambre, Aussi on choisit le béton pour varie entre trois valeurs d'épaisseur de mur et faire une comparaison.

Abstract

The collector – storage wall remains one of the most efficient systems for passive space heating. The performance of this wall depends on several parameters, namely: its nature, its thickness, presence or absence of thermal circulation. In this work, using MATLAB SIMULINK software, a digital study was done on a classic TROMBE solar wall in two regions north and south of Algeria a dark wall facing south. We chose three types of nature of the wall; Concrete Brick and stone, where we monitored the temperature variation at different points of the system (the interior of the room, sensor wall (exterior,...) for 10 hours of the day in winter. confirmed the incidence of thermo circulation which increases the temperature of the room, Also we choose the concrete to vary between three values of wall thickness and make a comparison.

Table des metiers

Introduction	2
CHAPITRE I :Généralité et Confort thermique	
1.1Généralité :.....	3
1.1.1 L'énergie thermique solaire	3
1.1.2 Généralité sur l'énergie solaire :	3
2.1. Confort dans un habitat :	5
2.1.1 Définition du confort.....	5
2.2.1 Définition.....	5
2.2.2 Température légal dans un habitat.....	6
2.2.3 Mode de transfert de chaleur	6
2.3.1 Différents facteurs agissant sur le confort thermique	9
2.3.1.1 L'orientation	9
2.3.1.2La ventilation naturelle	10
2.3.1.3 Dimension et ouvertures	10
2.3.1.4La forme et compacité.....	11
2.3.1.5La couleur.....	11
2.3.1.6Protection solaire et vent dominant	12
2.3.2Facteurs ayant une incidence sur le confort thermique	12
2.3.2.1Température de l'air.....	12
2.3.2.2Humidité de l'air	13
2.3.2.3Courants d'air	13
2.3.3. Le rapport entre l'enveloppe et le confort thermique	13

• Le confort d’hiver et d’été :.....	14
3.1 Les déperditions thermiques:.....	16
a-Déperditions surfaciques par transmission:.....	16
b- Déperditions linéiques :.....	17
c-Déperditions par renouvellement d’air :.....	17
3.1.1 Type d’isolation :	18
Isolation de l’intérieur :	19
Isolation de l’extérieur.....	19
3.2.1 Inertie thermique:.....	20
3.2.2Actions de l’inertie thermique.....	21
1.4Conclusion	22

CHAPITRE II :Stockage et Mur de Trombe et Etude Bibliographie

1.1.2.1 Systèmes de stockage passif	24
a. Stockage par ballon d’eau :.....	25
b. Stockage par lit de galets:	26
c. Stockage par mur capteur:.....	27
2.2Schéma de principe du mur trombe.....	30
2.2.1Qu’est-ce que c’est le mur trombe ?.....	70
2.2.2Définition.....	71
2.2.3Principe de fonctionnement.....	72
2.2.4La réponse du mur Trombe aux besoins de chauffage.....	74
2.2.5Mur trombe : Avantages et VII énéments	75
2.2.6 La présentation de différents types de mur solaire passif :.....	36
2.3Le fonctionnement d'un mur Trombe	40

2.3.1	Fonctionnement de la paroi thermique en hiver	41
2.3.2	Fonctionnement de la paroi thermique en été	82
2.3.3	Calcul de l'inertie thermique	83
2.3.3.1	Circulation de la chaleur	84
2.3.4	Masse thermique du mur trombe	84
2.3.5	Thermocirculation	85
2.3.6	Performance du mur trombe (nord de l'ALGERIE).....	89
2.3.6.1	Effet des dispositifs des protections solaire	90
	Conclusion.....	51
3.2	Etude bibliographique:	52
 CHAPITRE III :Etude Numérique Et Simulation Resultats Et Discussion		
3.1	Introduction	58
3.2	Système propose:.....	59
3.3	Résultats et discussions :.....	63
3.3.1	Mur extérieur	63
3.3.1.1	Discussion pour les trois résultats	67
3.3.2	Mur intérieur.....	67
3.3.2.1	Discussion	69
3.4	La comparaison entre le nord et le sud de l'Algérie.....	70
3.4.1	Discussion	70
	Conclusion Générale	71

Liste des tableaux

Chapitre 01

Tableau 1.1 Facteur d'absorption en fonction de la couleur.

Chapitre 02

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

Tableau 2. 2 : Flux par thermo-circulation.

Chapitre 03

Tableau 3.1 : Flux solaire hivernal (mois de janvier) de la ville d'Adrar

Tableau 3.2 : Propriétés physiques des matériaux choisis pour la simulation

Tableau 3.3 : variation de flux et de température dans trois épaisseurs différents

.

List des figures

Chapitre 01

- Figure 1.1 Différents modes de transfert de chaleur
- Figure 1.2 La relation entre l'enveloppe et les paramètres du confort thermique (L'agence internationale de l'énergie).
- Figure 1.3 Principe d'évolution des températures de surfaces intérieure et extérieure d'une paroi à forte inertie.
- Figure 1.4 L'inertie dans une maison passive.

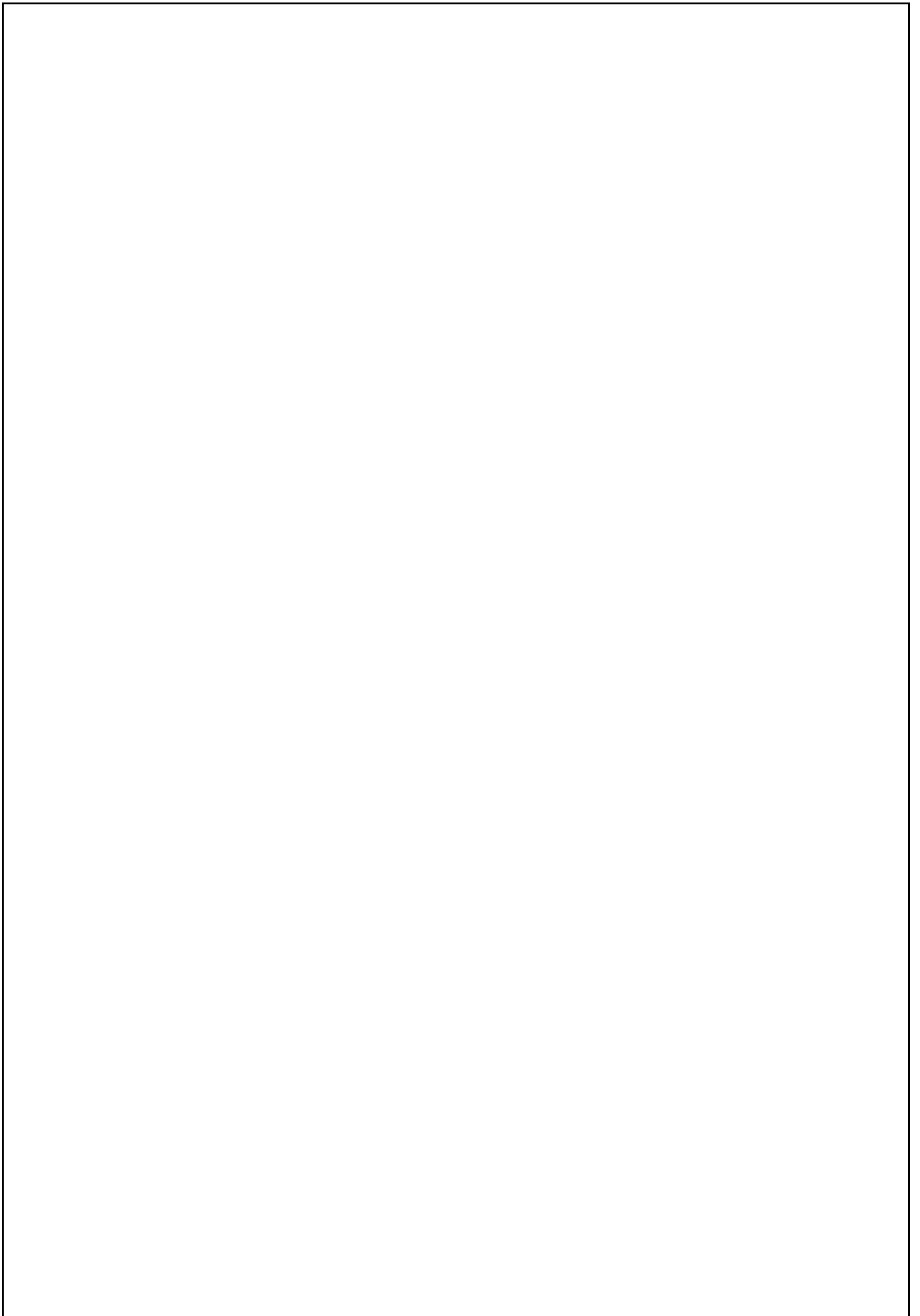
Chapitre 02

- Figure 2.1 Schéma d'une installation de chauffage solaire à eau.
- Figure 2.2 Schéma d'une installation de chauffage à air.
- Figure 2.3 Schéma d'un lit de galets avec le sens d'écoulement de l'air en stockage et déstockage.
- Figure 2.4 schéma simplifié d'un chauffage solaire passif à air utilisant un mur comme stockage thermique (mur capteur).
- Figure 2.5 Mur Trombe du parc national Zion, Utah Etats Unis, étudié par Torcellini et Pless (2004).
- Figure 2.6 Principe du fonctionnement du mur trombe.
- Figure 2.7 La spécificité du mur Trombe.
- Figure 2.8 Le mur solaire composite.
- Figure 2.9 le mur trombe standard
- Figure 2.10 mur trombe avec une capture capteur
- Figure 2.11 Le mur couche d'isolant sur le dos
-
- Figure 2.12 Fonctionnement d'un mur thermique en hiver.
- Figure 2.13 Fonctionnement hiver : l'air extérieur est réchauffé par le mur Trombe.
- Figure 2.14 Fonctionnement d'un mur thermique pendant l'été
-
- Figure 2.15 Fonctionnement été : l'air X ur est aspiré par le capteur
- Figure 2.16 Schéma électrique du mur
- Figure 2.17 Evolution de la température interne du local avec deux méthodes pour l'évaluation du flux échangé par thermo circulation

- Figure 2.18 Influence de la thermo circulation sur la température interne du local
Figure 2.19 Evolution de la température du local en hiver
Figure 2.20 Evolution de température la du local en été

Chapitre 03

- Figure 3. 1 Modèle géométrique du local étudié
Figure 3. 2 Modèle physique étudié
Figure 3. 3 Code de simulation
Figure 3. 4 Code de simulation pour mur extérieur
Figure 3. 5 L'évaluation de température et le flux solaire dans le cas du béton
Figure 3. 6 L'évaluation de température et le flux solaire dans le cas de la brique
Figure 3. 7 L'évaluation de température et le flux solaire dans le cas de la pierre
- Figure 3. 8 La température calculée
Figure 3. 9 L'évaluation de température par rapport l'épaisseur de mur, en fonction de temps.
Figure 3.10 L'évaluation de température extérieure de mur et le flux solaire à blida



Nomenclature

<p> h_v : coefficient volumique (W/m³.k). ρ_{ff} : masse volumique de l'air (kg/m³). V : débit volumique de l'air (m³/s). S : section droite du stockage (m²). D_g : diamètre moyen des galets (m). T_s : température du mur(°C). T_i : température de l'air intérieur(°C). T_a : température extérieure (°C). T_0 : température de l'eau du réseau (°C). T_{fe} : température à l'entrée des capteurs. T_{st} : température de l'eau du stockage. φ : Humidité relative. Q_{air} : la puissance perdue par renouvellement de l'air (W). C_{pa} : chaleur massique de l'air (j/kg.k). T_{rmi} : Température radiante moyenne. T_{ip} : Température intérieure de chaque paroi d'un local, de (°C). S_i : surface de chaque paroi d'un local(m²). T_{rm} : Température radiante moyenne des parois (°C). V_a : Vitesse de l'air (m/s). λ : Le coefficient de conductivité thermique (w/m.k). R : La résistance thermique (m²°C/W). K : conductivité thermique (W/ m²°C). ρ : Masse volumique en (Kg/m³) ; </p>	<p> h_i, h_e : coefficients d'échanges superficiels interne et externe en (W/m²°C). K_i : coefficient de transmission surfacique en (W/m²°C). K_l : coefficient d'échange de transmission linéique de la liaison (W/m°C). L : Longueur intérieure de la liaison en (m) q_e, q_i, q_v : respectivement débit entrant, par infiltration et débit par ventilation [m³/h]. M : coefficient de perméabilité des ouvrants (portes et fenêtres) en [m³/hm²pa^{2/3}]. f : coefficient de perméabilité des ouvrants des fentes en [m³/hm²pa^{2/3}]. A_m : surface des ouvrants [m²]. l_f : longueurs des fentes[m] ; e_m : coefficient d'exposition au vent et au tirage thermique [pa^{2/3}]. e_i : coefficient d'exposition au seul tirage thermique du local non chauffé[pa^{2/3}]. a : Diffusivité en (m²/s). b : L'effusivité thermique ((W/°Cm²)^{1/2}). m : le débit d'air qui s'écoule dans la serre C : Chaleur spécifique en (kJ/kg). </p>
---	---

INTRODUCTION

Introduction

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].

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.

En général, les systèmes de chauffage proposés sont compliqués et coûteux de fait de la préoccupation de leurs réalisateurs de les rendre complètement autonomes, c'est-à-dire de chauffer les maisons sans recours à une source auxiliaire d'énergie d'appoint durant les périodes d'insuffisance solaire [4].

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 naturel 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.

!Notre travail de recherche consiste à étudier les performances thermiques du mur TROMBE pour le site de Blida telle que la présence ou non de thermo circulation, la circulation naturelle et la circulation forcée de l'air dans le canal solaire du système, on a étudié aussi la variation des températures aux différents points du système (l'intérieure de mur de trombe, mur extérieur).

Par la suite, nous traiterons différents aspects de ce sujet, en commençant par :

- ✓ Chapitre I : Généralité et Confort thermique.
- ✓ Chapitre II : Stockage et Mur de Trombe et Etude Bibliographie.
- ✓ Chapitre III : Etude numérique et simulation, Résultats et Discussions.
- ✓ Conclusion.

CHAPITRE I :

CONFORT

THERMIQUE ET GÉNÉRALITÉ E

1.1 Généralité :

1.1.1 L'énergie thermique solaire

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.).

L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le Soleil par rayonnement et ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire et notamment l'énergie solaire photovoltaïque qui utilise l'effet photoélectrique afin de transformer les photons émis par le soleil en électricité.

Le capteur solaire est l'instrument utilisé pour transformer le rayonnement solaire en chaleur. Les principes physiques fondamentaux sur lesquels se basent cette production d'énergie sont notamment l'absorption, et la conduction thermique. Dans le cas particulier des systèmes à concentration (centrale solaire thermodynamique, four solaire, etc.), la réflexion joue aussi un rôle important.

Le solaire thermique se développe, malgré un net ralentissement depuis 2009 ; la Chine représente à elle seule 71 % de la puissance installée des capteurs, mais en puissance par habitant elle est dépassée par sept pays, dont l'Autriche, la Grèce et l'Australie.

1.1.2 Généralité sur l'énergie solaire :

L'énergie solaire qui nous parvient sur terre est le résultat de diverses séries de réactions nucléaires complexes qu'on appelle aussi la fusion. Elles se déroulent à l'intérieur d'un gigantesque réacteur atomique fonctionnant depuis plusieurs milliards d'années et connu sous le nom de soleil. A des températures de 15 millions de degrés, 564 millions de tonnes d'hydrogène par seconde se transforment en 560 millions de tonnes d'Hélium. Cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à

l'énergie libérée sous forme de rayonnement électromagnétique. Les 150 millions de km de distance qui nous séparent du soleil (et c'est ce qui différencie ce réacteur qu'est le soleil des réacteurs terrestres) réduisent cette énergie de 4300 kWh/m² par une température de plus de 5000°C à la surface du soleil (la photosphère) à 1.36kWh/m². Le reste est réfléchi par les nuages, les aérosols atmosphériques, la calotte glaciale des deux pôles, la masse des continents : cette réflexion est appelée Albédo. Selon les résultats des mesures de satellites, l'albédo représente environ 30% de constante solaire. Une partie de ce reste d'énergie est absorbée par l'atmosphère : ce qui conditionne la régulation des climats terrestres ; une autre partie, enfin, peut être absorbée à la surface de la terre. C'est la source d'énergie dans les procédés biologiques de la photosynthèse. Ces trois formes d'énergie créent un équilibre sensible et vulnérable dans notre système écologique. Toute modification de l'une de ces trois formes d'énergie aura des conséquences incalculables sur la vie biologique de la planète. La surface de la terre reçoit un rationnement solaire correspondant à 750×10^{15} kWh par an soit environ 8000 fois la consommation énergétique mondiale actuelle. L'énergie solaire arrive à la surface de la terre par rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire qu'elle nous parvient par oscillation électronique, intégrée dans des champs magnétiques. Cette énergie électromagnétique est basée sur deux principaux critères : la fréquence et la longueur d'onde. La fréquence indique la répétition de chacune des formes d'énergie qui composent le spectre solaire. On peut comparer ce phénomène à la tonalité du son d'une guitare. En faisant vibrer les cordes, on constate qu'il y a une anti corrélation entre le nombre des vibrations et le temps entre les répétitions d ses vibrations. Ce qui signifie que lorsque le nombre des vibrations augmente, le temps entre deux oscillations diminue et vice versa. Plus la fréquence des oscillations électromagnétiques sont élevée et plus le niveau énergétique n'est élevé. Les rayons X ou les rayons gamma dont la fréquence est très haute pénètrent dans beaucoup de matériaux, tissus humains compris ; par contre, les ondes de basse fréquence comme celles de la radio, sont réfléchies par presque toutes les surfaces des matériaux [5].

2.1. Confort dans un habitat :

2.1.1 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.

2.1.2 Le confort thermique dans un habitat :

2.2.1 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 a + 20 ou 22°. La température maximale idéale est de 28°, c'est à dire proche de celle de la température de surface du corps humain (selon les sources, entre 28 à 33°), au-delà commence la zone d'inconfort. Le confort thermique est défini comme « un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique » [6]. La norme ASHRAE 55 définit le confort thermique comme « la condition d'esprit qui exprime la satisfaction en présence d'un environnement thermique donné » [7]. Le confort thermique concerne principalement la température intérieure des pièces, sa répartition harmonieuse dans l'espace et la qualité de l'air ambiant.

2.2.2 Température légal dans un habitat

Le ministère du Logement, de l'Urbanisme et de la Ville a publié la réglementation thermique algérienne des bâtiments. L'application de cette régulation thermique doit conduire à une isolation thermique des nouveaux bâtiments, dans le but de réduire la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation. Cette politique peut passer la loi n ° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la gestion de l'énergie et son règlement d'application, notamment l'arrêté n ° 2000-90 du 24 avril 2000 relatif à la réglementation thermique des bâtiments neufs [8]. 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.

2.2.3 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 à la convection.

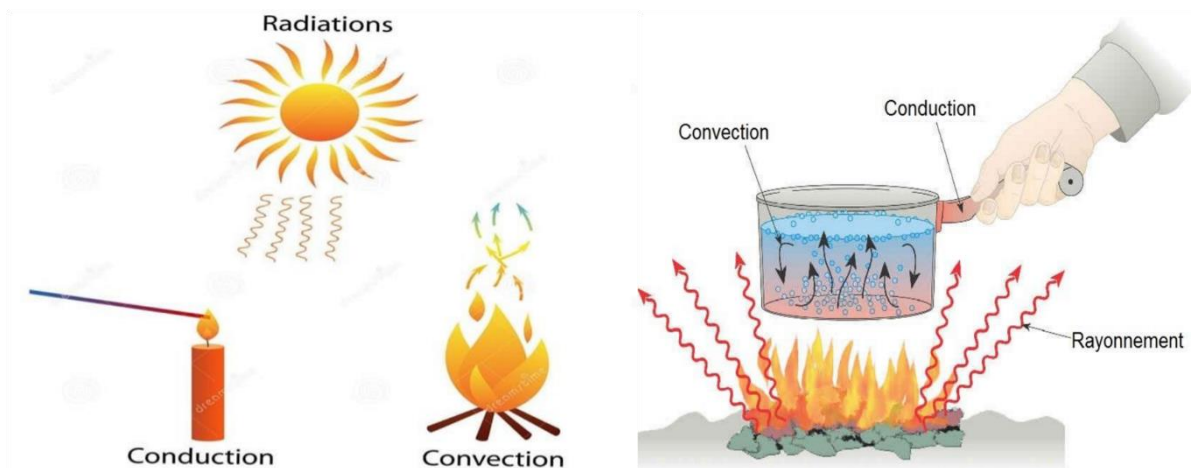


Figure 1. 1 : Différents modes de transfert de chaleur

• **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 [9].

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

$$Q'' = \lambda \nabla T \quad \text{Où :}$$

∇ : 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 :

$$E(T) = \sigma T^4$$

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

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

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 [10].

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 :

$$\Phi = h S (T_{su} - T_\infty) \text{ [11]} \text{Où :}$$

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 corset le fluide s'exprime en **K**.

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

2.3.1 Différents facteurs agissant sur le confort thermique

2.3.1.1 L'orientation

B. Givoni[12] 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.

2.3.1.2 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 [13].

2.3.1.3 Dimension et ouvertures

Les parois transparentes (vitrages) de l'enveloppe d'une habitation participent activement dans les échanges thermiques entre les environnements intérieurs et extérieurs des bâtiments (apports et déperditions thermiques). Toutefois, une attention particulière aux dimensions de ces ouvertures est recommandée selon l'orientation et la conception. En effet :

- Les vitres verticales orientées plein sud ont le double avantage d'être très bien exposées au soleil d'hiver, et facile à protéger du soleil d'été.
- Pour les fenêtres orientées Est ou Ouest, il est souhaitable de leur donner des dimensions moyennes uniquement avec un plan d'énergie solaire, car en hiver elles reçoivent très peu d'énergie solaire. En été, cependant, elles sont largement exposées (le matin pour les fenêtres orientales, l'après-midi pour les fenêtres occidentales). Parce que la température extérieure est plus élevée l'après-midi, les ouvertures à l'ouest provoquent une surchauffe, qui est plus difficile à éliminer.
- L'ouverture en verre orientée au nord est celle qui a le moins d'absorption solaire, car le vent le plus froid vient généralement du nord, vous devez donc réduire l'ouverture. Cependant, en raison de la consommation excessive d'éclairage artificiel, vous devez éviter de trop réduire ces ouvertures.

2.3.1.4 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) [14]), 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.

2.3.1.5 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) [15], le coefficient d'absorption sera donné en fonction de sa catégorie.

Tableau 1. 1 : Facteur d'absorption en fonction de la couleur [15]

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

2.3.1.6 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, persiennes, 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 rafraichissement.

Toutefois, les façades Est et Ouest sont celles qui doivent être plus protégées, car selon (P. Fernandez) l'inclinaison des rayons solaires est important sur ces façades ce qui accroît leur facilité de traverser les ouvertures vitrées et réchauffe ainsi les façades. Notant que ces façades bénéficient du soleil levant et couchant en toute saison [16].

2.3.2 Facteurs ayant une incidence sur le confort thermique

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

2.3.2.1 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.

2.3.2.2 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.

2.3.2.3 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 balaient pas tout l'espace.

2.3.3. 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 [17,18].

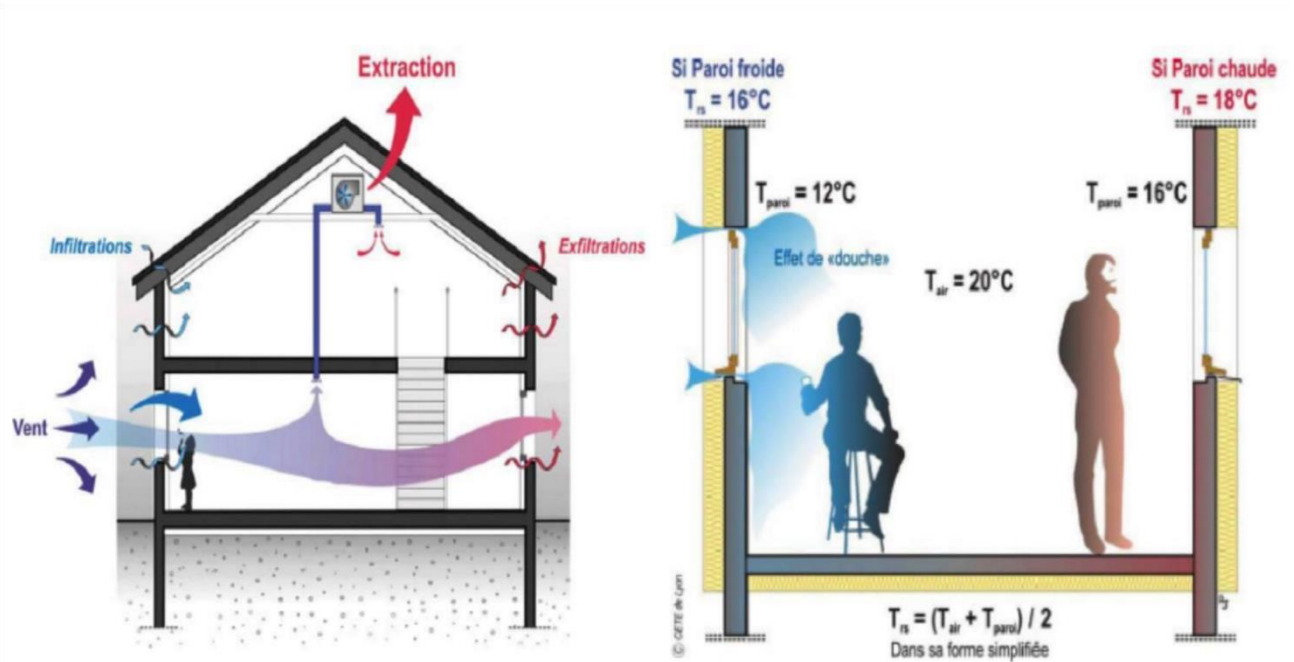


Figure 1. 2 : La relation entre l'enveloppe et les paramètres du confort thermique (L'agence internationale de l'énergie)

• **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 40°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- 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 différent 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. [20]

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.

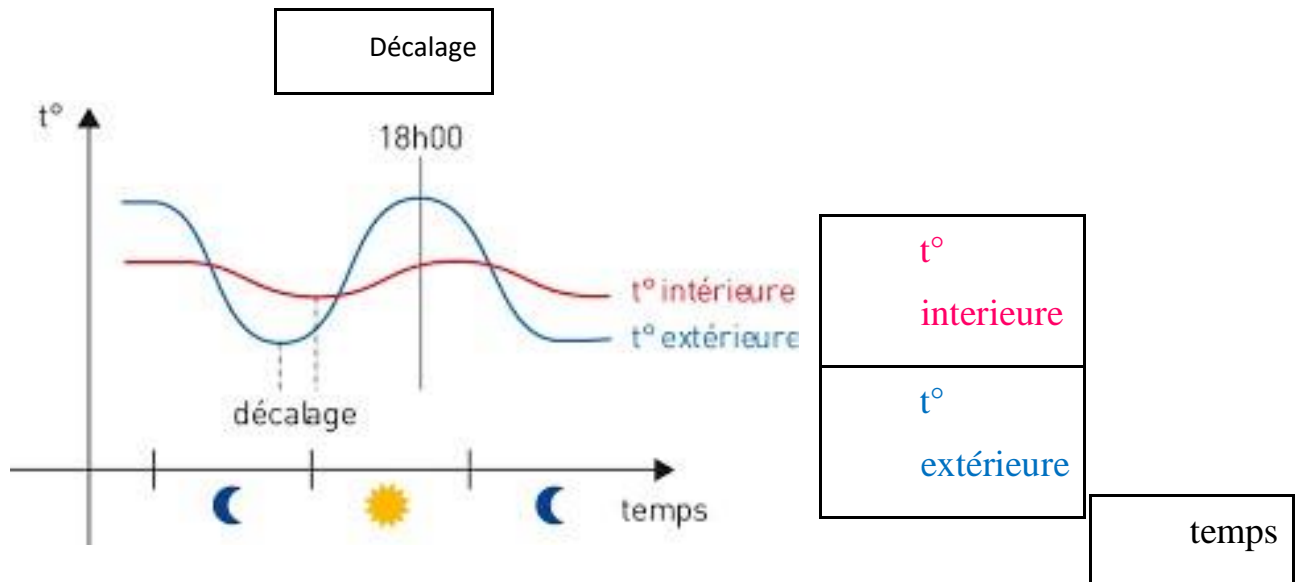


Figure 1. 9 : Principe d'évolution des températures de surfaces intérieure et extérieure d'une paroi À forte inertie [21]

3.1 Les déperditions thermiques :

a-Déperditions surfaciques par transmission :

L'ensemble de ces déperditions se font par conduction à l'intérieure des parois ou vitrages, par convection et rayonnement sur les surfaces internes et externes aux parois. La formule reliant ces pertes est donnée comme suit :

$$Q = \Sigma KST$$

Où :

K_i : coefficient de transmission surfacique en ($W/m^2°C$) ;

: Surface intérieure de la paroi en (m^2) ;

$= (T_i - T_a)$: Différence de température entre l'intérieure et l'extérieure ($°C$) ;

b- Déperditions linéiques :

La relation nous permettant de calculer les déperditions linéiques est comme suit :

$$Q_l = \sum kLT$$

Où :

K_l : coefficient d'échange de transmission linéique de la liaison en ($W/m°C$) L : Longueur intérieure de la liaison en (m).

c-Déperditions par renouvellement d'air :

On distingue deux cas de pertes par renouvellement d'air : celles dues au débit d'infiltration et à celui de ventilation spécifique. Tous les deux doivent être prisent en compte. Ainsi les déperditions par renouvellement d'air s'expriment comme suit [22] :

$$Q_r = \sum 0.34 q_e T_i$$

Ou

$$q_e = q_i + q_v$$

Et, pour les infiltrations du côté des locaux non chauffés :

$$q_i = \sum m A_m e_m + \sum f \cdot l_f \cdot e_i \quad M$$

Avec,

q_e, q_i, q_v : respectivement débit entrant, par infiltration et débit par ventilation [m^3/h] .

M : coefficient de perméabilité des ouvrants (portes et fenêtres) en [$m^3/hm^2pa^{2/3}$]. f : Coefficient de perméabilité des ouvrants des fentes en [$m^3/hm^2pa^{2/3}$]

A_m : surface des ouvrants [m^2] l_f : longueurs des fentes[m]

e_m : coefficient d'exposition au vent et au tirage thermique [$pa^{2/3}$] ; e_i : coefficient d'exposition au seul tirage thermique [$pa^{2/3}$] du local non chauffé.

* les valeurs (m , f et e) sont données par des tableaux normalisés suivant les règles Th-G [23].

3.1.1 Type d'isolation :

Il existe trois façons d'isoler une habitation, Isolation en double cloison, isolation de l'intérieur et isolation de l'extérieure. Dans une habitation existante, le choix est évidemment porté sur l'isolation de l'intérieur ou de l'extérieur

Isolation de l'intérieur :

Elle présente l'avantage d'être maîtrisée par tous les intervenants du bâtiment, mais elle est loin d'être la plus courante. Les isolants intérieurs plus ils sont performants, plus l'influence relative des ponts thermiques s'accroît. Rappelons aussi qu'une isolation intérieure, même performante, présente toujours une faible inertie thermique.

Isolation de l'extérieur

L'isolation de l'extérieur est la plus intéressante, puisqu'elle présente des avantages multiples et importants [24] :

L'isolation extérieure permet de renforcer la protection des murs contre les dégradations du temps et les intempéries.

Elle permet de supprimer la majorité des ponts thermiques, tels que : abouts de plancher ou de refends, encadrements de baie (avec certaines précautions), etc.

Elle protège les gros œuvres contre certaines contraintes thermiques et limite les risques de condensation dans la maçonnerie à l'intérieur du volume chauffé. Ceci améliore considérablement le confort thermique de l'habitation qu'elle que soit la saison.

Elle permet de placer les murs porteurs (lourds) du côté intérieur et donc de renforcer l'inertie thermique du logement, source de confort pour les occupants, car les murs lourds régulent la chaleur et l'humidité. En hiver et demi-saison, ces murs intérieurs éclairés par le soleil accumuleront ces rayonnements pour les diffuser en soirée. En été, si vous ventilez bien la maison durant les heures fraîches de la nuit, ces murs lourds restitueront cette fraîcheur dans la journée.

L'isolation par l'extérieur est beaucoup plus facile à réaliser par soi-même que l'isolation par l'intérieur, car, les panneaux isolants pour l'extérieur sont légers et il suffit de les poser bien bord à bord. Il est préférable de choisir des matériaux isolants pouvant être directement crépis. Toutefois, la pose d'un crépi sur un isolant extérieur est plus technique que sur un mur maçonné.

Elle a aussi l'avantage de ne pas modifier les surfaces habitables.

Entre une maison faiblement isolée et une maison très bien isolée, le coût du chauffage peut être divisé par 3 ou par 4. Sachant que le coût d'une isolation est généralement amorti entre trois et cinq ans [25]. 1

3.2.1 Inertie thermique :

Dans les matériaux de construction couramment utilisés, l'inertie thermique d'un bâtiment se juge en première approximation par la masse interne du matériau mis en œuvre. Toutefois le rôle et les principaux paramètres sont énoncés comme suit :

En été, plus l'inertie thermique de l'habitation augmente, plus la température maximale atteinte est faible et plus les variations de température jour/nuit sont faibles. L'inertie thermique permet donc de lisser les flux thermiques et les températures extrêmes. L'utilisation de matériaux lourds, contribue à donner au bâtiment une forte inertie. Elle évite les surchauffes et aide à la stabilisation de la température [26].

En hiver, l'inertie thermique joue également un rôle important, principalement dans le cas de chauffage intermittent. Le refroidissement est plus lent dans un local dont les parois sont lourdes.

Les coupures de chauffage, visant à faire des économies d'énergie, sont d'autant moins intéressantes que la structure est plus inerte, car plus lourde [26].

3.2.2 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 [27]

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.

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 37°C, 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 II :

STOCKAGE ET MUR DE TROMBE ET ETUDE BIBLIOGRAPHIE

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.

1.1.2.1 Systèmes de stockage passif

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

Quand la seule énergie utilisée est celle du soleil, on parle du système passif [37].

Pour le chauffage d'habitation, le fluide caloporteur est soit l'air, soit l'eau se passe facilement d'énergie auxiliaire pour le mouvoir. L'air est chauffé par les capteurs puis envoyé directement dans les pièces d'habitation. Le stockage de l'énergie se fait alors par léchage d'un matériau solide (mur en béton, lit de pierres,...). Il peut cependant être intéressant de recevoir à des ventilateurs pour créer une circulation forcée ; les puissances mises en jeu sont toujours faibles, de l'ordre de celles nécessaires au fonctionnement d'une VMC (ventilation Mécanique Contrôlée). L'utilisation de l'eau nécessite à un échangeur. Son avantage réside dans le volume de stockage nécessaire, beaucoup plus faible qu'avec l'air¹. Dans ce cas on trouvera sur le circuit, une ou plusieurs pompes (calculateurs), des électrovannes, etc.

Dans les paragraphes suivants on s'intéresse plus particulièrement aux différents types de stockage [37] :

-ballon d'eau

-lit de pierres -mur porteur.

a. Stockage par ballon d'eau :

Le schéma de principe d'une telle installation est donné à la figure 1.1. Les capteurs solaires chauffent l'eau du stockage par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Cette disposition permet de traiter l'eau qui circule dans les capteurs. Un appoint est souvent nécessaire sous nos latitudes [37].

Quant à l'échangeur stockage-habitation il doit avoir une surface la plus grande possible afin de minimiser l'écart de température entre l'eau à T_{st} provenant du ballon de stockage et l'air à T_i de la maison. Chauffer à basse température améliore le confort. D'autre part le rendement des capteurs est d'autant meilleur que l'écart de température ($T_{fe}-T_a$) entre la température de l'eau à l'entrée des capteurs et celle de l'air extérieur est faible. Or en première approximation $T_{fe} \approx T_{st}$ il faut donc avoir T_{st} la plus basse possible.

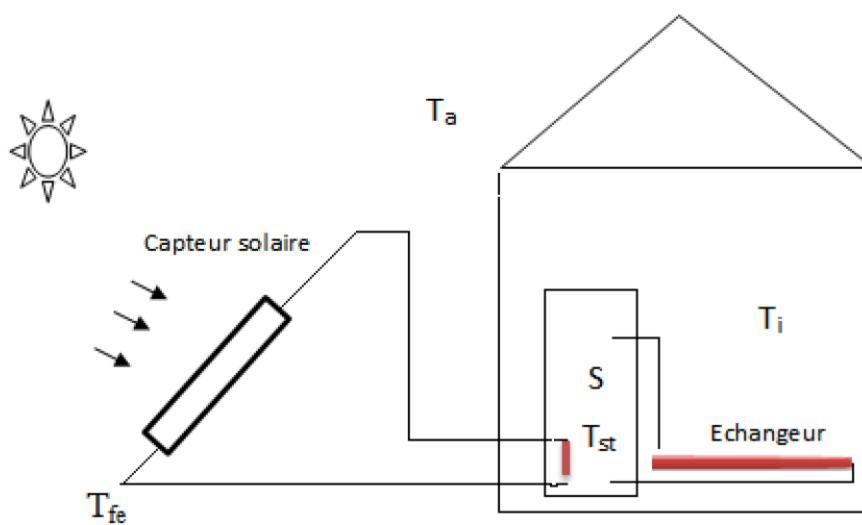


Figure 2.1 : Schéma d'une installation de chauffage solaire à eau.

La gestion de l'énergie doit favoriser le solaire. L'appel à une énergie d'appoint devant être minimisé. Le stockage sert de tampon journalier et permet de fournir la nuit le surplus d'énergie solaire stockée, le cas échéant, durant la journée. Accroître le volume de l'eau du stockage permet de diminuer la température maximale T_{smax} atteinte par l'eau durant une journée très ensoleillée et donc, comme on vient de le voir, d'améliorer le rendement des capteurs. La température T_{st} de l'eau du stockage doit cependant être supérieure ou égale à une température minimale T_{smin} qui permet de transmettre convenablement la chaleur de l'échangeur à l'air de la maison à

Ti. Mais augmenter le volume prend de la place et coûte plus cher. Par contre, le diminuer peut entraîner une température de stockage trop grande. Pour conserver un bon rendement des capteurs solaires, cette température ne doit pas dépasser une valeur T_{smax} (70° par exemple). Dans certains cas, on peut être amené à rejeter une partie de l'énergie solaire qui ne peut être stockée.

b. Stockage par lit de galets :

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

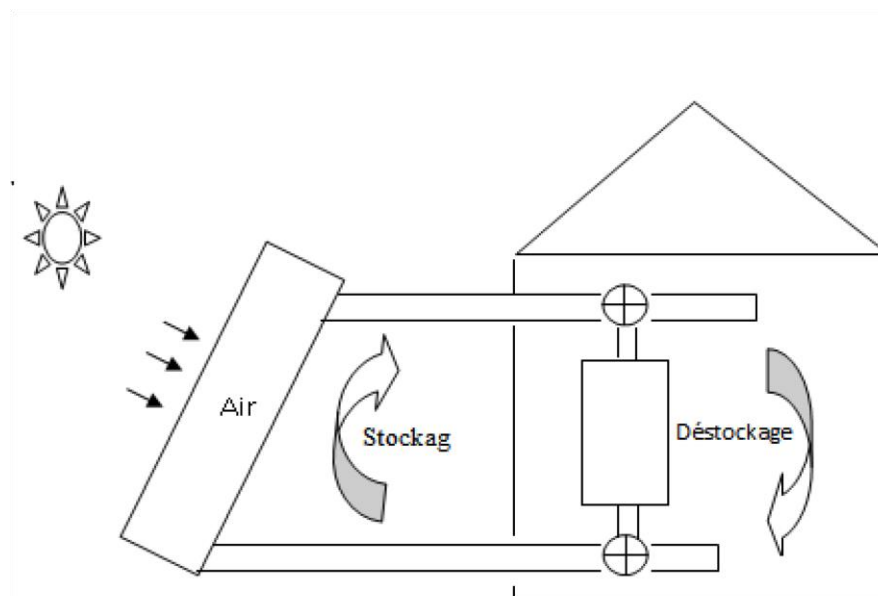


Figure 2.2 : Schéma d'une Installation de chauffage à air

.Pendant une journée ensoleillée, on chauffe la maison grâce à l'énergie apportée par les capteurs solaires. Si celle-ci est supérieure aux besoins du moment, le

surplus est stocké. Durant la nuit l'énergie est déstockée pour maintenir la température intérieure à une valeur acceptable

Un système utilisé est le stockage par lit de galets. On fait circuler, dans un empilement de galets, de l'air préalablement chauffé dans des capteurs solaires. Il s'en suit une augmentation de la température des pierres et une diminution de celle de l'air qui retourne aux capteurs. Pour réchauffer l'habitation, il suffit de faire circuler l'air de la maison en sens contraire dans le lit de

Pierres pour récupérer l'énergie emmagasinée. Les surfaces d'échange étant élevées, les écarts de température fluide/galets sont faibles.

Les précautions à prendre dans la réalisation d'un tel système sont les suivantes [37] :

Les galets ne doivent pas être trop petits afin que la

Perméabilité du milieu n'entraîne pas des pertes de

Importantes mais ils ne doivent pas plus température intérieure. Pour cela on utilise des galets dont le diamètre moyen est de l'ordre de 3 cm.

Le volume de stockage, qui devra être bien isolé, sera calculé pour que les températures atteintes ne soient pas trop fortes. En général une masse de 300 kg par m² de capteurs convient. La longueur L ne doit pas être trop importante à cause des pertes de charge. Les grandeurs habituelles vont de 1 à 3 m.

Quant au débit d'air qui circule dans les capteurs, un déstockage.

Valeur de 40 m³/h et par m² sur est raisonnable.

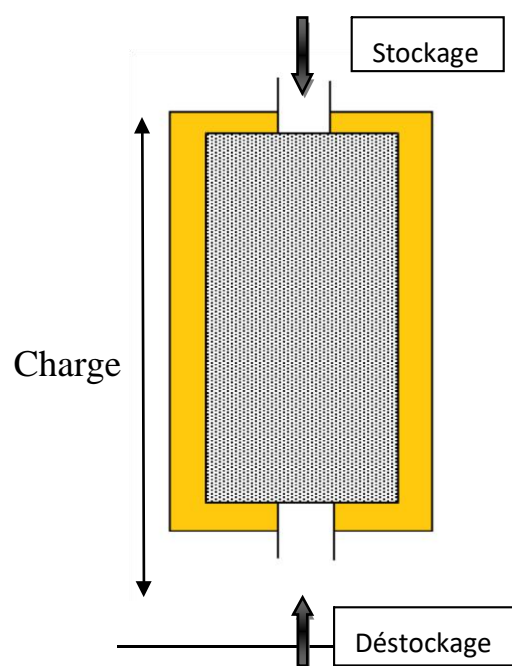


Figure 3.3 : Schéma d'un lit de galets avec le sens d'écoulement de l'air en Stockage et en Déstockage

On peut envisager de réduire ce débit lors du déstockage.

Il faut éviter que l'air chaud envoyé au stockage ne soit trop chargé en humidité. Durant le déstockage, il y a une diminution de la température des galets. Si cette dernière atteint la température du point de rosée de l'air, il y aura condensation de la vapeur d'eau et risque de prolifération de microorganismes préjudiciables à la salubrité de l'air injecté dans la maison. Le coefficient d'échange de chaleur entre les galets et l'air peut être caractérisé par un coefficient volumique, noté h_v (en $W/m^3.k$), dont une expression expérimentale a pu être donnée par Lof et Hawley en 1948 :

$$h_v = 650 \left(\frac{\rho_f V}{S D_g} \right)^{0.7}$$

Avec : ρ_f masse volumique de l'air (kg/m^3)

V débit volumique de l'air (m^3/s)

S section droite du stockage (m^2)

D_g diamètre moyen des galets (m)

c. Stockage par mur capteur :

Une autre possibilité de stockage de l'énergie solaire est d'utiliser la structure même de l'habitation, comme par exemple un mur en béton (figure. .1.4). un double vitrage orienté au sud crée un effet de serre. Le mur joue le rôle d'une cheminée. L'air de la maison y est aspiré ; il s'y réchauffe puis retourne dans la maison en partie haute du mur. Le mur s'échauffe durant le jour et restitue la nuit la chaleur emmagasinée. Les pertes nocturnes peuvent être minimisées en déroulant devant la vitre un volet. [37]

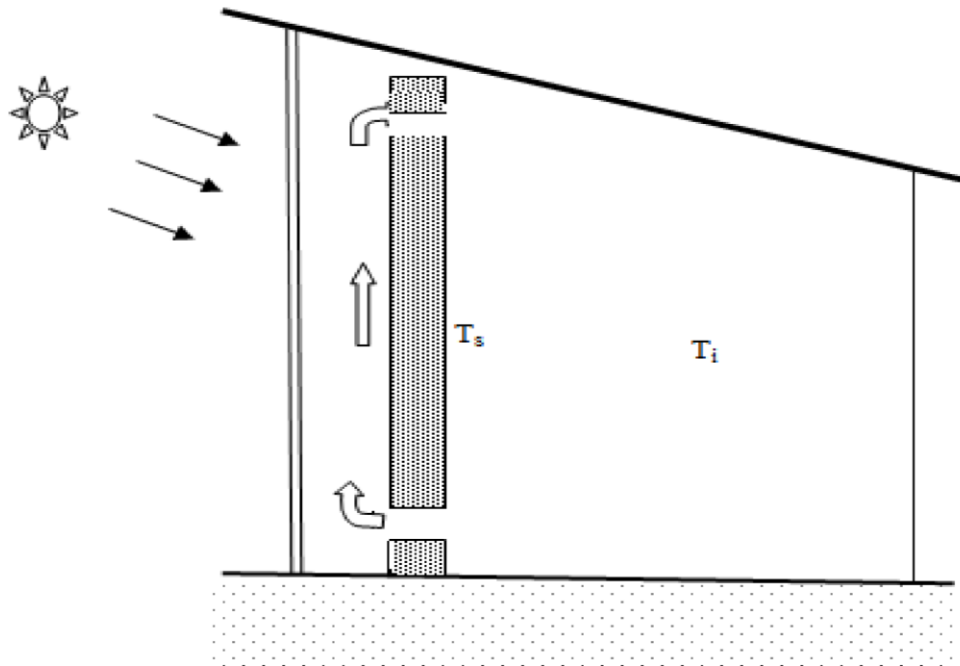


Figure 2.4 : schéma simplifié d'un chauffage solaire passif à air utilisant un mur comme stockage thermique (mur capteur).

Température du mur

T_i température de l'air intérieur

T_a température extérieure

Ce principe a été développé par Félix Trombe et Jacques Michel. Plusieurs maisons ont été construites, entre 1967 et 1974, sur le site du CNRS (centre national de la recherche scientifique) à Front-Romeu (Pyrénées Orientales). Ci-dessous sont représentées deux vues de logements utilisant cette technique. [37]

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. 5 : Mur Trombe du parc national Zion, Utah Etats Unis, étudié par Torcellini et Pless

(2004)[29]

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 béton³¹ et 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.

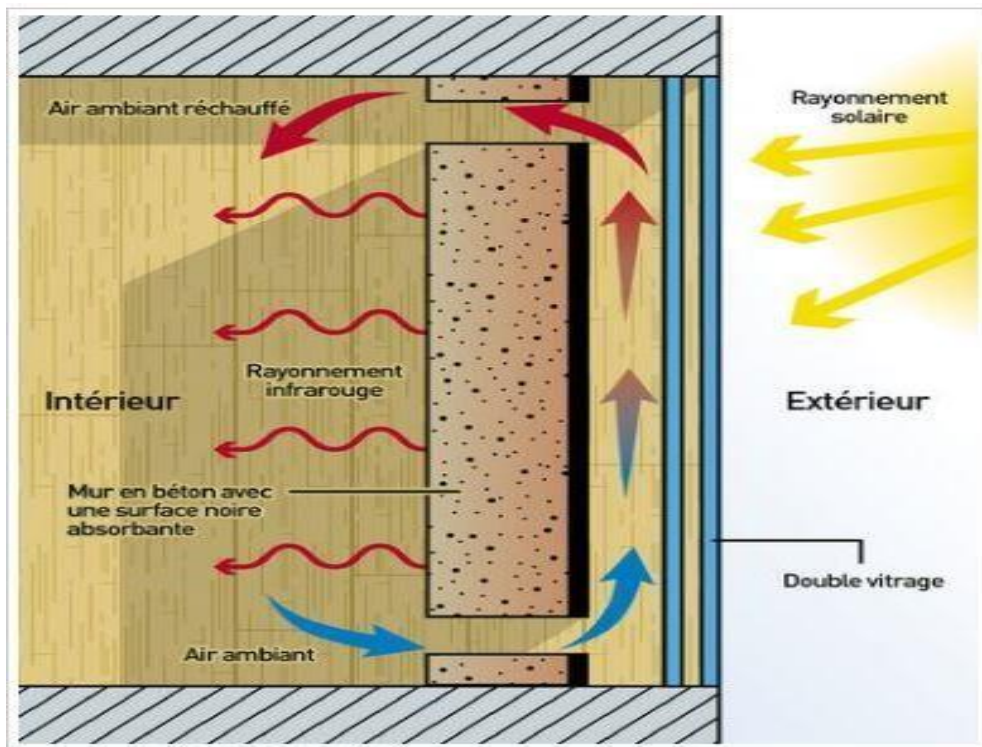


Figure 2. 6 : Principe du fonctionnement du mur trombe [30]

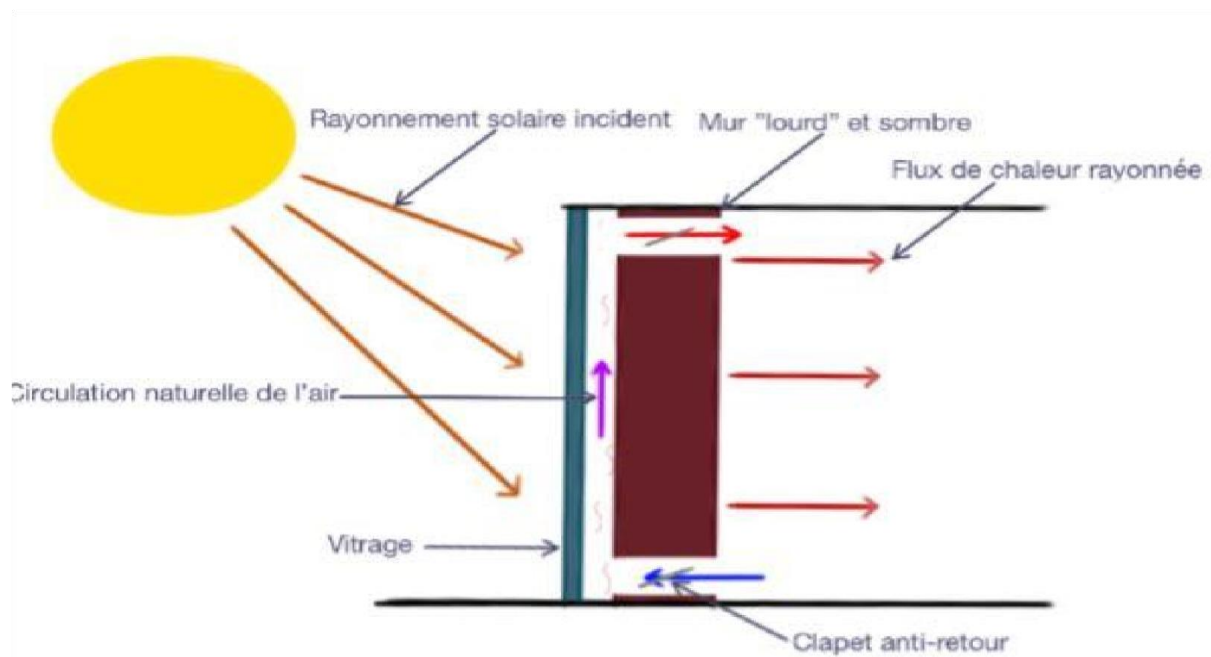


Figure 2. 7 : La spécificité du mur Trombe [30]

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. [30]

2.2. 5 Mur trombe : Avantages et inconvénients [30]

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

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Pas de réglementation.	Système assez complexe à 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.

2.2.6 La présentation de différents types de mur solaire passif :

Murs solaires passifs sont inclus dans l'enveloppe d'un bâtiment. Leur fonction est de permettre la collection d'énergie solaire afin de réduire la quantité de l'énergie payée consommée pour les installations de chauffage standard. Cette

alimentation d'énergie gratuite diffère des gains solaires obtenus par directes surfaces vitrés, en raison de l'utilisation d'un mur de stockage. Ce mur, comme son nom l'indique, Stocke la chaleur durant les périodes ensoleillées et libère avec un décalage de temps qui dépend des caractéristiques du mur. Cette alimentation peut être utilisée en plus de gains solaires directs, et de limiter ainsi les risques de surchauffe [44].

Avec le temps, des modifications ont été apportées aux murs solaires afin d'améliorer leur efficacité.

Quatre configurations différentes de mur solaire sont présentées ci-dessous, avec leurs principaux avantages et inconvénients [44].

Le mur solaire composite (Fig. 2.8) comprend un couvercle extérieur transparent, une couche d'air clos, un mur de stockage, une couche d'air ventilé, et finalement une couche d'isolation dans lequel deux événements ont été forés. Il fonctionne comme suit.

Le mur de stockage absorbe une partie de l'énergie solaire et chauffe par effet de serre, stocke et transmet de l'énergie par conduction vers l'intérieur du bâtiment. Après un certain décalage de temps, selon le type et l'épaisseur de la paroi, une partie de cette énergie est échangée par convection à l'air, le reste étant échangées par rayonnement avec la couche d'isolant. Une très petite partie de cette énergie reçue par rayonnement est transmise par conduction vers l'intérieur de bâtiment, le reste est transféré dans l'air par convection. Par conséquent, presque toute l'alimentation est fournie au bâtiment par les moyens de la couche d'air ventilé. En bloquant la circulation de l'air, l'alimentation est également arrêtée, évitant ainsi toute surchauffe, ou le problème de l'inversion de la circulation de la chaleur.

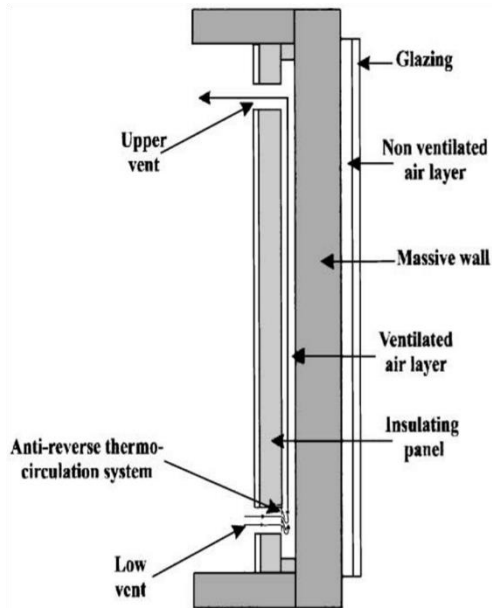


Figure 2.8 : Le mur solaire composite

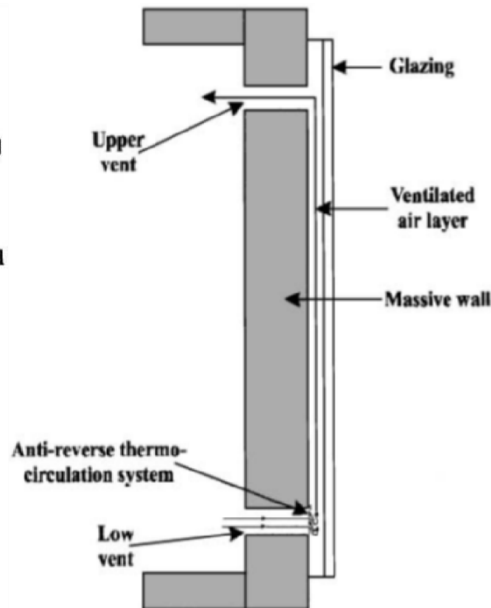


Figure 2.9 : Le mur trombe standard

Le mur solaire composite a les avantages suivants :

Une bonne résistance à la chaleur (en raison de la présence de la couche d'isolant et les couches d'air).

Aucune infiltration d'air frais à travers la couverture extérieure.

En raison de l'existence de la couche d'isolant, l'alimentation en été est limitée. Ceci est fait en bloquant la circulation d'air dans la couche ventilé et, si possible, l'ouverture de la couche d'air extérieure.

L'alimentation stockée dans la masse est libérée par le moyen de la couche ventilée, après un long décalage de temps qui dépend du type et de l'épaisseur de la paroi.

L'alimentation peut être contrôlée en tout temps en réglant la circulation de l'air.

Son principal inconvénient est qu'il nécessite un système pour empêcher les inversions de la circulation de la chaleur dans la couche d'air ventilé.

Ce problème survient lorsque le mur de stockage est plus froid que l'air de la couche aérée. Dans ce cas, à moins qu'un système est fourni de manière à bloquer la circulation, l'air sera refroidi et réinjecté dans la chambre en passant par l'évent inférieur. Cette déclaration est également vraie pour le mur trombe standard, illustré à la Fig.2.8, la configuration qui devait mener au développement de mur solaire composite.

Par chauffage de l'air à l'extérieur de la couche d'air ventilé par convection, la fourniture est relâchée rapidement dans la chambre, tout en conservant les avantages du stockage dans la masse. Cette configuration présente l'avantage d'être plus efficace, par rapport à la précédente. Un inconvénient majeur, à part le problème de l'inversion de la circulation de la chaleur, c'est le manque de contrôle sur l'alimentation en énergie (convection et radiation) par le mur de stockage. En outre, les alimentations en provenance de la couche aérée sont pratiquement des alimentations solaires directes (risque de surchauffe). Il convient de noter que cette configuration nécessite le couvercle transparent pour être parfaitement étanche afin d'éviter tout risque d'infiltration d'air froid. Cette configuration nécessite un bouclier solaire à monter afin de réduire les fournitures d'énergie indésirables durant la saison estivale.

Pour augmenter la résistance thermique du mur Trombe et le contrôle des alimentations, il est possible de mettre en place une couche d'isolant sur le dos (Fig.2.10). L'avantage de cette couche d'isolant est qu'elle améliore la résistance thermique du mur Trombe, et offre donc la possibilité de contrôler les alimentations simplement en ajustant la circulation de l'air. En outre, cette couche d'isolant bloque pratiquement toute l'alimentation en été. Il n'est donc plus impératif de mettre en place un bouclier solaire. Toutefois, la présence de l'isolement limite l'alimentation pour la masse de stockage ; presque toute l'énergie collectée est donc rapidement dirigé dans la chambre par la couche d'air (court décalage de temps). Nous ne devons pas oublier que cette configuration,

comme la précédente, requiert le couvercle transparent pour être parfaitement étanche.

La quatrième et dernière configuration est la plus simple et la plus ancienne. Dans ce cas, le mur (Fig.2.11) comprend un couvercle transparent, une couche d'air clos et un mur de stockage. Il fonctionne comme suit : le mur de stockage absorbe l'énergie solaire, et chauffe par effet de serre, stocke de l'énergie et la transmet par conduction à l'intérieur de la chambre.

L'énergie est ensuite libérée dans la pièce par convection et radiation. Le principal avantage de cette configuration est sa simplicité.

Ses inconvénients sont un manque de contrôle sur les alimentations stockées dans la masse, mauvaise résistance thermique globale du mur (les pertes importantes pendant la nuit et durant les périodes sans soleil) et la nécessité d'un bouclier solaire en été pour éviter tout dommage à l'alimentation en énergie.

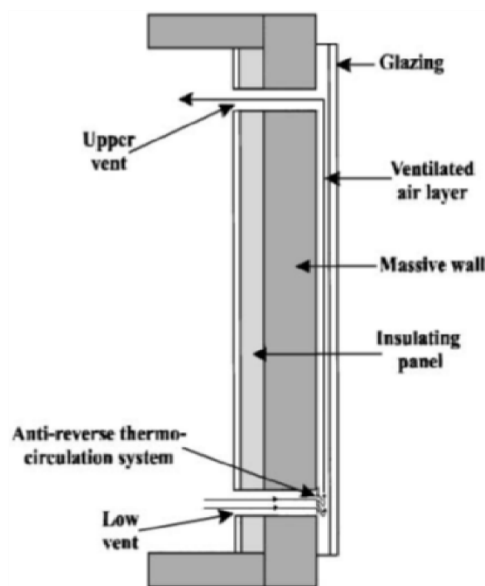


Figure 2.10 : mur trombe avec une capteur couche d'isolant sur le dos.

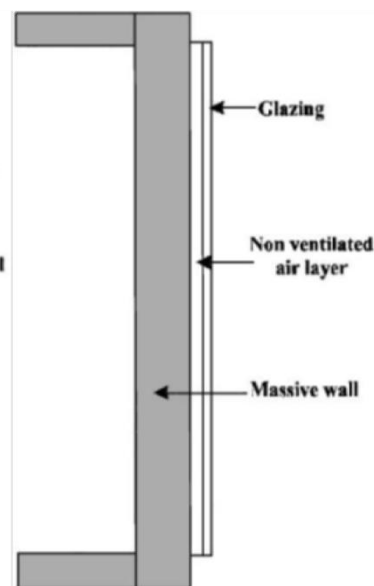


Figure 2.11 : Le mur

Nous venons de présenter les différents types de murs solaires passifs, avec leurs principaux avantages et inconvénients et principes d'exploitation. Ils utilisent les différents modes de transfert de chaleur qui peut être habituellement trouvée

simultanément dans les bâtiments. Pour étudier et comparer l'efficacité de ces murs, il est essentiel d'effectuer des recherches très détaillées sur les divers phénomènes physiques impliqués dans la collecte et le transfert de chaleur de l'extérieur dans les locaux qui doivent être chauffés [44].

Réduction de la facture énergétique.	Très onéreux à mettre en place en raison de l'étude en amont et de l'installation.
--------------------------------------	--

2.4 Le fonctionnement d'un mur Trombe

2.4.1 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

lémur. En même temps, le refroidisseur d'air passant par les événements inférieurs tend à combler le vide d'air créé.

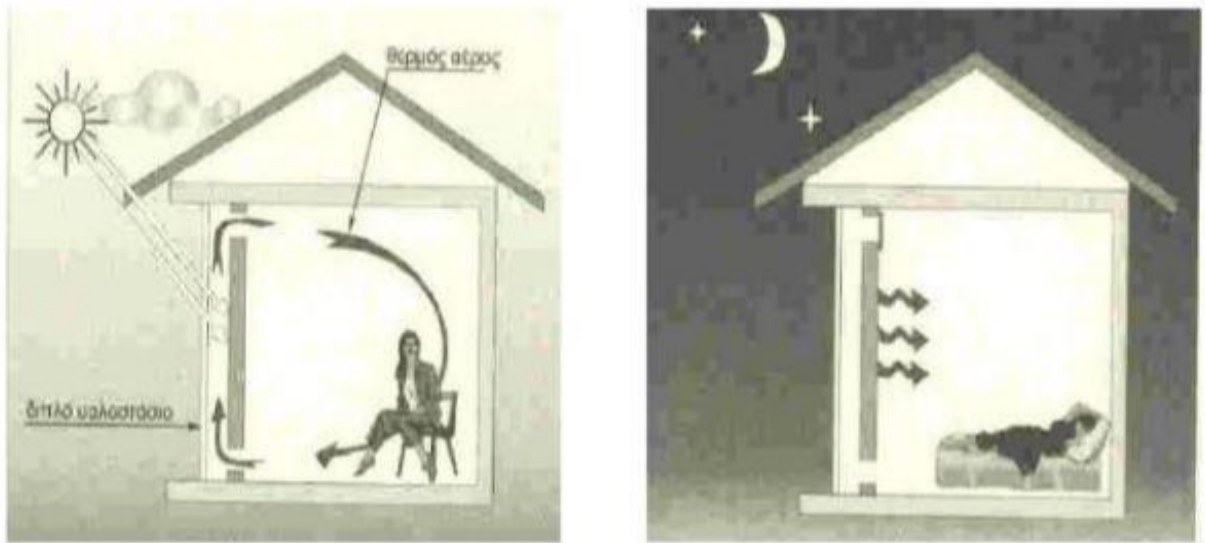


Figure 2.12 : Fonctionnement d'un mur thermique en hiver [26]

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.

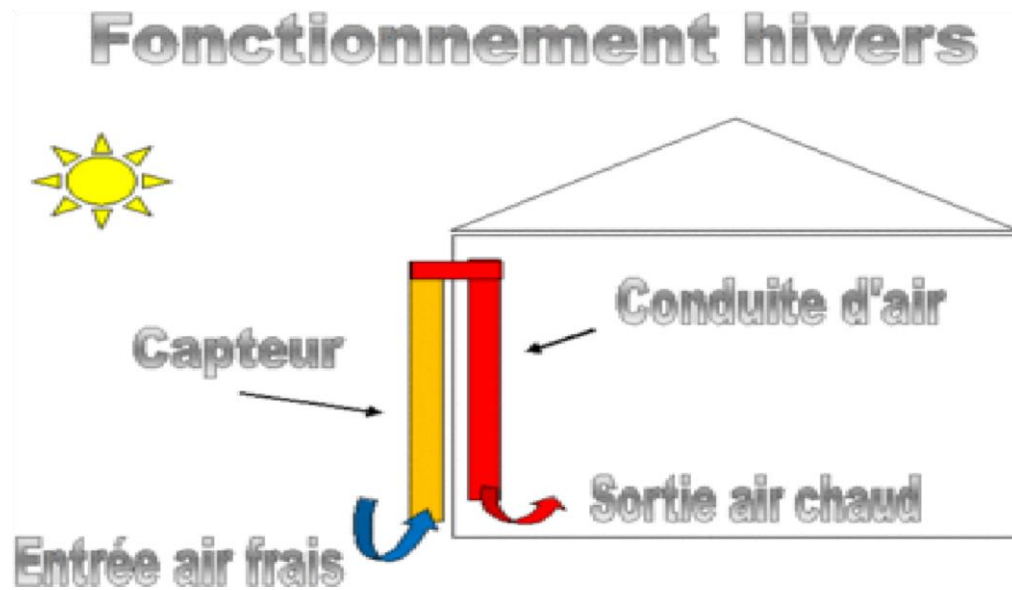


Figure 2.13 : Fonctionnement hiver : l'air extérieur est réchauffé par le mur Trombe

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 le mur, une basse pression d'air peut créer ce qui aspire l'air intérieur à l'extérieur. [41]

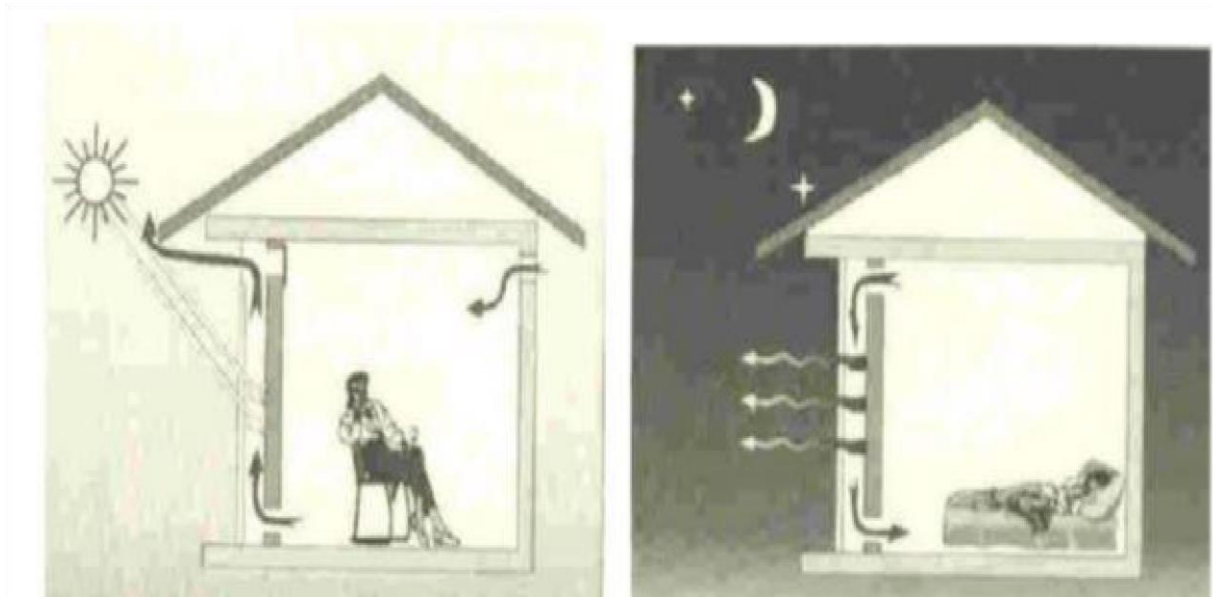


Figure 2.14 : Fonctionnement d'un mur thermique pendant l'été [26]

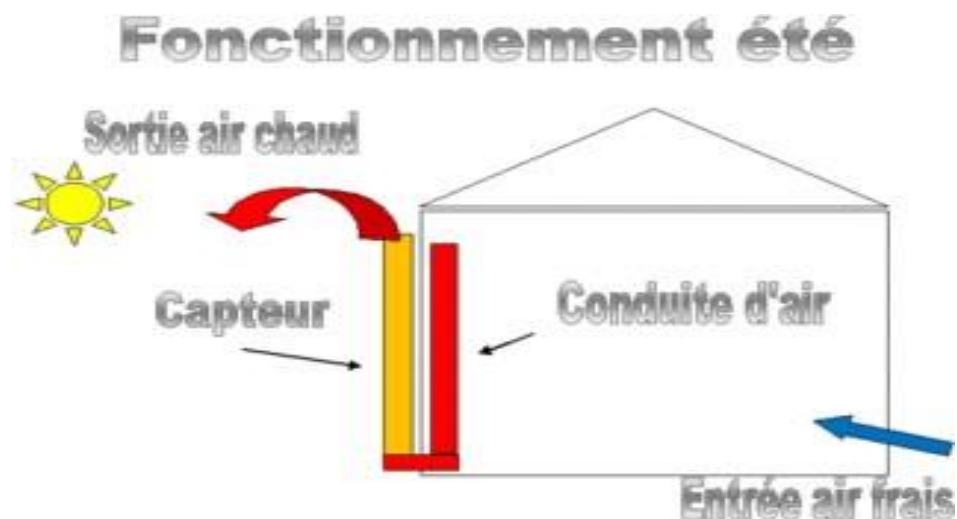


Figure 2.15 : Fonctionnement été : l'air intérieur est aspiré par le capteur

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

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

$$Q_r = \frac{e}{2-e} \times \sigma (T_f^4 - T_{ref}^4) \quad [27]$$

Où :

e : 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. [27]

2.3.5 Thermo circulation

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]

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

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)

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

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 : [45]

Surface du mur Trombe : 32.5 cm^2

Epaisseur du mur Trombe : 60 cm^2

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

Volume de la pièce : 244 m^3

Première approche :

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

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

Avec : h_c : coefficient de convection (W/m^2)

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]

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

Avec :

A : surface du mur trombe (m^2)

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.

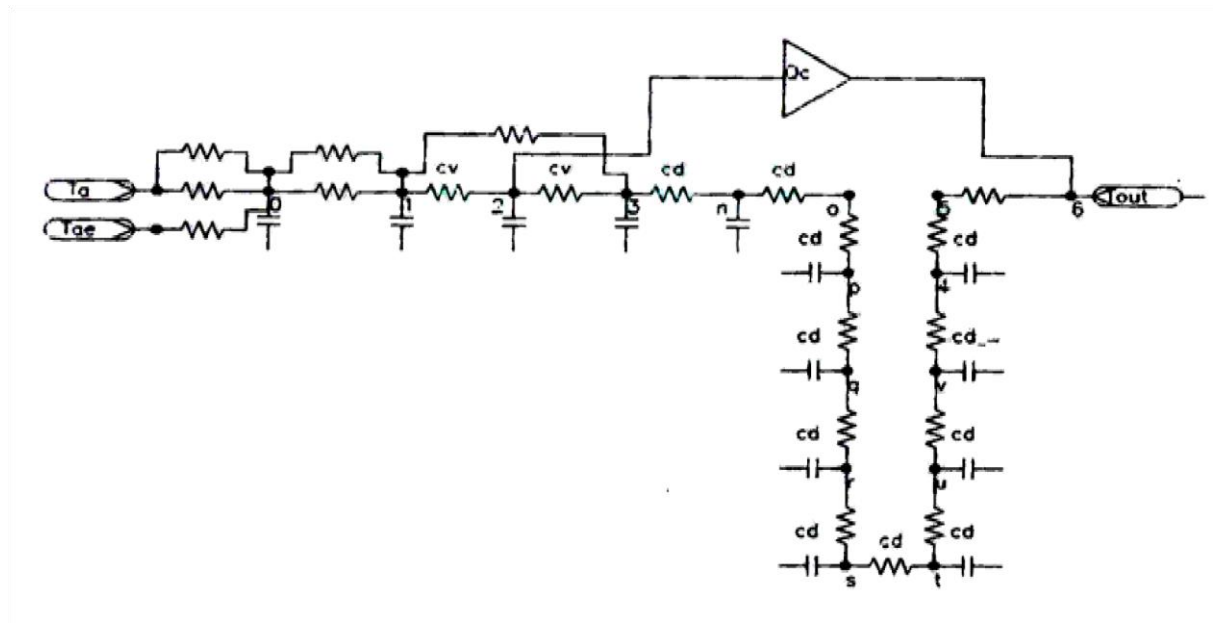


Figure 2.16 : Schéma électrique du mur [46]

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.

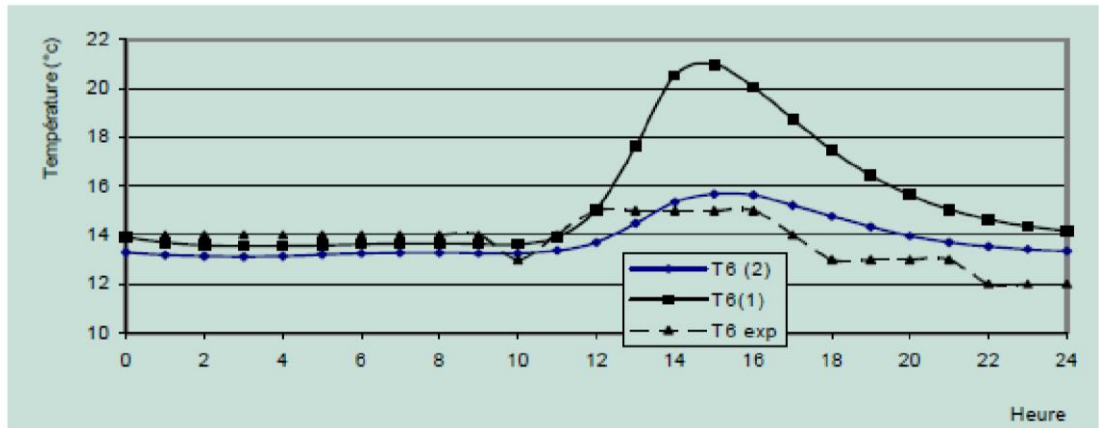


Figure 2.17 : Evolution de la température interne du local avec deux méthodes pour l'évaluation du flux échangé par thermo circulation [47]

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

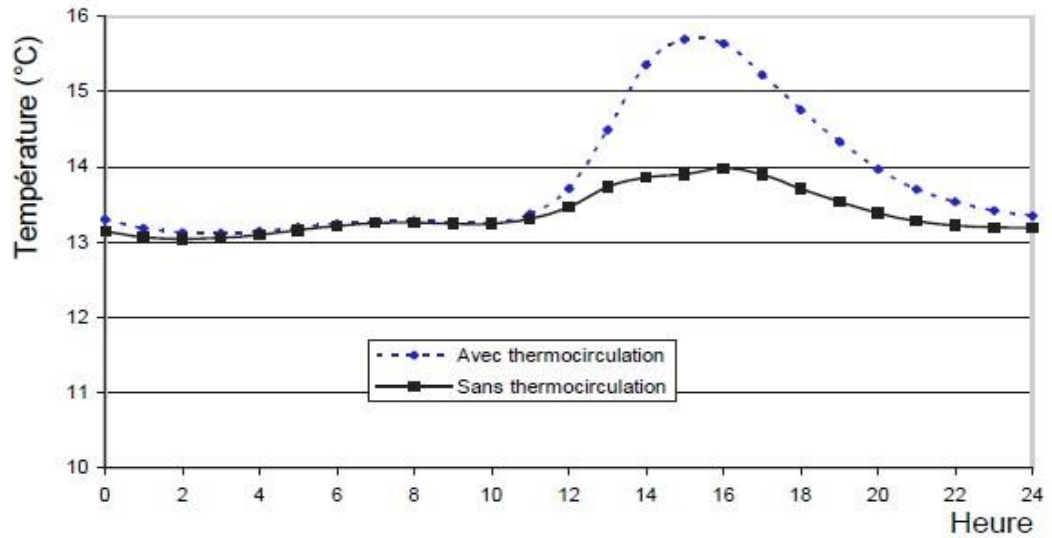


Figure 2.18 : Influence de la thermo circulation sur la température interne du local

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.[47]

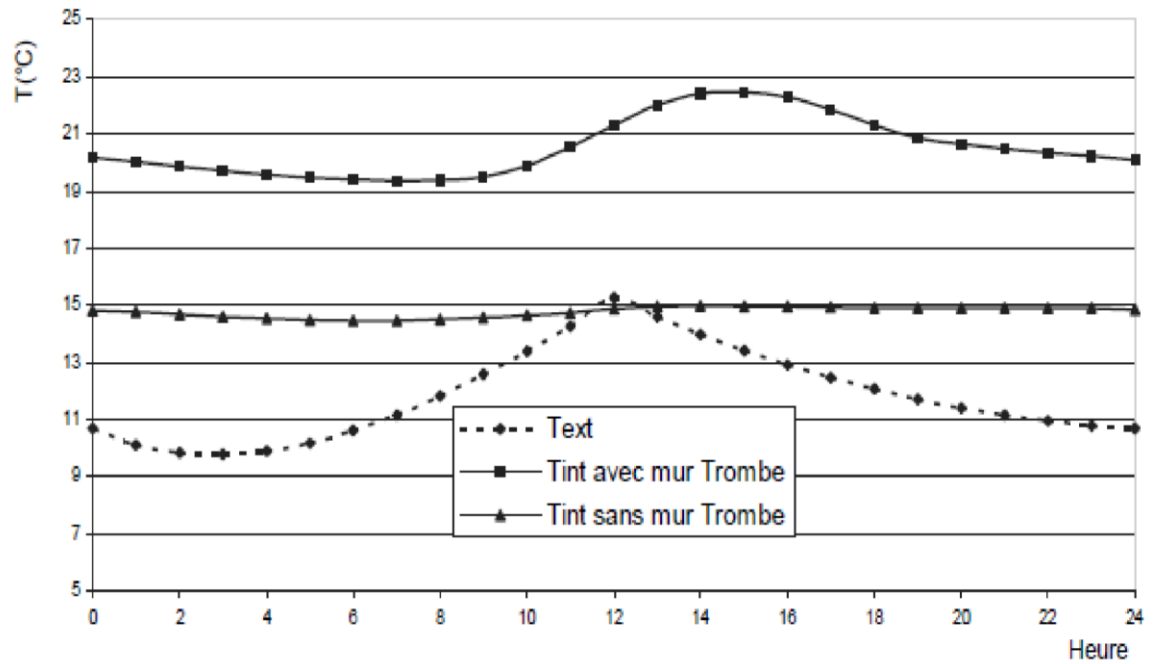


Figure 2. 19 : Evolution de la température du local en hiver [47]

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 montres que la mise en place de store vénitien peut diminuer la température intérieure du local d'environ 3 °C.

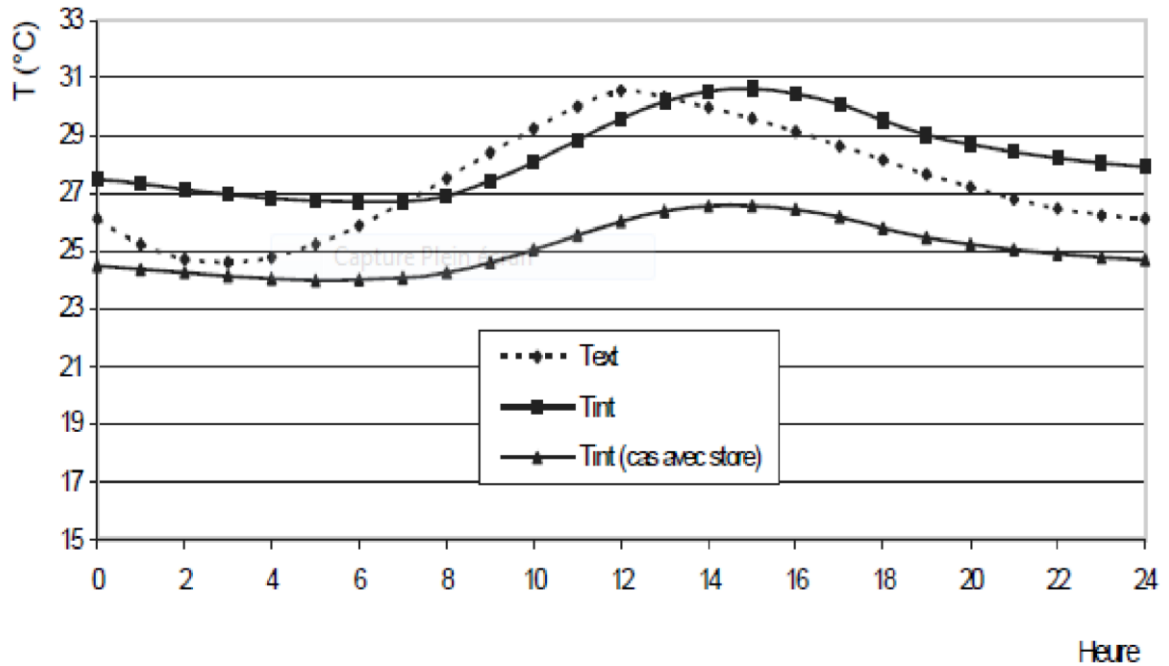


Figure 2. 20 : Evolution de température la du local en été [47]

Conclusion : après avoir les performances d'un mur de trombe dans le nord de l'Algérie, dans le troisième chapitre on va concentre sur le sud d'Algérie pour faire étudie les performances de mur et le comportement de température par faire une simulation numérique et de comparé les résultats entre le nord et le sud.

4.2 Etude bibliographique :

Il est très difficile de calculer et d'analyser avec précision le comportement thermique des murs de l'enveloppe du bâtiment lorsque coexistent différents modes de transfert thermique et en raison des phénomènes climatiques aléatoires particulières. Ces problèmes sont très complexes dans le cas de composants spéciaux tels que le mur solaire passif utilisé dans l'architecture bioclimatique [48].

Le **mur Trombe** ou **mur Trombe-Michel**, a été conçu par le Professeur **Félix Trombe**(1906-1985) et l'architecte **Jacques Michel**. Edward Morse breveta le concept en 1881 (US Patent 246626), mais il fut ignoré jusqu'en 1964.

Il y a eu des analyses étendues de l'exécution du chauffage par mur de Trombe, expérimentalement et analytiquement par de nombreux chercheurs. On montre ici une partie de ces recherches :

E. TASDEMIROGLU et F. RAMOS BERJANO and D. TINAUT (1977) [42], à Laboratoire d'applications thermique d'énergie solaire de MTA" à Marmaris, en Turquie, une étude expérimentale d'un système passif de "mur de stockage thermique Trombe" continue en fonctionnement ; deux maisons analogues ont été construites, dont l'une sert comme système de référence. Le rayonnement solaire incident sur une surface verticale, les variations de température des surfaces internes et externes de la paroi, à intervalle de 30 minutes, et l'écoulement de convection à travers le " mur Trombe " ont été mesurés afin de déterminer les fractions solaires transmises par les procédés de rayonnement, la convection et thermo circulation. Dans la présente étude, la variation d'efficacité de "mur Trombe" a été calculée pendant la période d'une année à l'aide d'un modèle d'évaluation informatique dans lequel les données de mesure de demi-heure ont été introduites. Les résultats expérimentaux montrent que, selon les mois, de 15 à 35 % du rayonnement solaire incidente sur la façade sud est transmis à l'intérieur à travers le "mur Trombe»,

K. Imessad et M. Belhamel (1999)[45] une simulation du comportement thermique d'un local muni d'un mur Trombe a été effectuée pendant des journées type d'hiver et d'été en faisant varier ces paramètres : (sa nature, son épaisseur, présence ou non de thermo circulation). Deux approches théoriques pour quantifier le flux de chaleur échangé par thermo circulation ont été proposées, les résultats obtenus ont permis de recommander celle qui se rapproche avec les résultats expérimentaux présentés par la littérature.

JibaoShen et all (2005) [48] les performances thermiques des systèmes solaires passifs, un mur Trombe classique et un mur Trombe-Michel composite, sont étudiés. Les modèles ont été développés avec la méthode de différences finie (FDM) et avec le logiciel TRNSYS. Le modèle pour un mur composite développé avec FDM a été validé par l'expérimentation. Les comparaisons entre les résultats de simulation avec TRNSYS et avec FDM, et entre les résultats de la simulation d'un mur de Trombe classique et les résultats de simulation d'un mur de Trombe composite ont été faites. Ils montrent que les modèles développés par JibaoShen et all sont très précises, et le mur composite a de meilleures performances énergétiques que le mur classique dans le froid et / ou temps nuageux.

Y Li et all (2007) [50] Un modèle mathématique pour simuler la circulation d'air, dans le canal solaire du système de mur Trombe solaire isolé, est proposé. Il est supposé que le vitrage est isotherme et la chaleur solaire absorbée par la paroi est transférée à l'air dans le canal avec un flux constant par convection naturelle. Les équations de masse, d'élan et de conservation d'énergie sont discrétisés et résolus en utilisant la méthode de contrôle de volume de différence finie. Une étude expérimentale de cheminée solaire a été utilisée pour valider le modèle mathématique proposé. Les différences entre les résultats prédits du flux d'air dans le mur solaire et ceux des données de mesure sont inférieures à 3,0% lorsque la largeur de mur solaire est de 0,2 m et la température de mur est inférieure à 50 °C. Lorsque le mur est de 0,3 m de large, ces différences sont inférieures à 5,0%,

la température de mur est inférieure à 50°C. Les champs de flux et de température sont produits et les résultats sont présentés en termes de distribution de température et de vitesse dans différentes parties du système. Les résultats montrent que le gain de chaleur solaire et la largeur de canal sont deux paramètres importants affectant le motif d'écoulement de l'air et le transfert de chaleur.

ArvindChel et all (2007) [51] Cet article étudie la conservation de l'énergie, l'atténuation des émissions de CO₂ et de l'économie du réaménagement d'un bâtiment de stockage de miel avec le mur Trombe pour l'application de chauffage en hiver. Le potentiel de chauffage passif du mur Trombe pour un bâtiment de stockage du miel a été estimé en utilisant logiciel TRNSYS de simulation de bâtiment. Ce bâtiment de stockage du miel est situé à Gwalior (latitude : 26°14'N) en Inde. Pendant les mois d'hiver, la température de l'air de chambre du bâtiment tombe en dessous du rang de 18-27°C requis qui est approprié pour le stockage du miel. Ainsi, le rang de température de l'air du chambre est maintenue dans le bâtiment à l'aide d'un radiateur à huile d'une capacité électrique de 2,3 kW (ou chambre de chauffage d'air) qui est responsable de la grande consommation d'énergie de l'immeuble sur une base annuelle. En raison de laquelle il Ya d'importantes émissions de CO₂ dans l'atmosphère provenant du bâtiment de stockage du miel. Par conséquent, cette étude de cas a été menée pour recommander le concept de chauffage passif aux intervenants du bâtiment de manière à conserver l'énergie requise pour le chauffage de l'air de la chambre. L'enquête a montré que la température de l'air de la chambre peut être facilement maintenue dans l'intervalle approprié pour le stockage du miel en utilisant un mur Trombe ventilé. Le travail expérimental a été réalisé pour le bâtiment existant sur une typique journée claire d'un mois dur, d'hiver, de Janvier pour valider les résultats de modèle TRNSYS du bâtiment actuel. L'analyse d'erreur statistique a montré un bon accord entre le modèle et les résultats expérimentaux. Cette enquête conclut qu'il existe un potentiel de conservation d'énergie jusqu'à 3312kWh / an et une réduction associé de CO₂ (33 tonnes / an) en utilisant un

mur Trombe. En outre, le réaménagement de bâtiment est économiquement viable comme la période de récupération esseulement d'environ 7 mois.

M.K. Cherier et all (2008) [52] Cet article se concentre donc sur l'étude théorique de l'isolation thermique par un mur Trombe lors de son application sur l'architecture de l'enveloppe d'un habitat. Dans tous les cas, il s'agit de tirer parti du rayonnement solaire par une architecture adaptée, permettant de limiter les besoins énergétiques, tout en contribuant à la production du confort pendant l'hiver.

Zohir YOUNSI et all (2009) [53] L'article présente les résultats d'une première étude expérimentale menée sur un prototype, à échelle réduite, d'un mur solaire TROMBE-

COMPOSITE. Un matériau à changement de phase, conditionné sous forme de briquettes, y a été inséré. Il se confirme que le matériau permet de stocker davantage de chaleur qu'un même volume de béton mais les mesures réalisées montrent un comportement thermique très différent en régime dynamique. Un regard particulier est porté sur les déphasages entre les différentes grandeurs et les sollicitations climatiques. Dans cette communication, nous présentons également les performances énergétiques de la paroi à partir de bilans flux métrique ou enthalpie.

Ils sont intéressés au déphasage qu'engendrait un mur solaire composite constitué de 2,5cm de matériau à changement de phase comparé à un mur béton de 15 cm d'épaisseur ayant approximativement les mêmes capacités déstockage

L. Zalewski et all (2010) [44] Le but de cet article est de présenter les résultats d'une étude comparative de quatre types de mur solaire. Ces résultats ont été obtenus en utilisant un modèle de simulation numérique. Afin de valider le modèle, une vaste étude expérimentale a été menée sur un mur solaire composite. La première partie de l'article est consacrée aux caractéristiques particulières des configurations des cartes murs solaires, suivis par une description de l'installation expérimentale, les mesures et l'étude des différents modes de transfert thermique

nécessaire pour le modèle pour être validé. La troisième section commence par une brève présentation du principe utilisé pour développer ce modèle, en continuant avec la phase de validation. Le modèle est ensuite utilisé pour étudier l'efficacité des murs solaires dans des endroits différents et sous des conditions climatiques différentes. Ceci est suivi par une analyse de la façon dont ils libèrent la réserve d'énergie et leur performance durant le période d'été. Les résultats de cette étude sont fondamental pour aider les architectes ou chefs des projets à choisir la configuration la mieux adapté pour chaque type de bâtiment.

BasakKundakciKoyunbaba (2011) ;[54] la comparaison des performances énergétiques de simple vitrage, double vitrage et un module PV Si semi-transparent intégrée sur une façade de mur Trombe d'un modèle de chambre d'essai construite à Izmir, en Turquie a été effectuée. Le système a été exploité pendant les jours 25-26 Février. La dynamique des fluides computationnelle (CFD) analyse pour modèle à deux dimensions de 3 systèmes ont été faites pour l'analyse transitoire. Les variations de température à certains nœuds où les sondes de température sont placées ont été comparées avec les résultats de simulation et se trouvent en bon accord. Cette opération valide le modèle de simulation. Ainsi, le changement de l'efficacité électrique par la température de la surface du module PV a été interprété et le taux d'alimentation électrique du module PV a été désigné. Ce modèle sera utilisé pour l'optimisation du système dans différentes régions climatiques, emplacements et pour différentes typologies de bâtiment. Ce projet vise à être un prototype et à se généraliser à travers toute la Turquie et le monde comme il est facile pour rénover des bâtiments existants avec ces systèmes et de les appliquer à de nouvelles unes.

Fakhreddine Abassi et all (2014) [55] Dans cette étude, un modèle numérique d'un système de mur Trombe a été développé à l'aide de logiciel TRNSYS et validé par un prototype expérimental à petite échelle, situé au Laboratoire des procédés thermiques du Centre de recherche et de la technologie de l'énergie (CRTE_n) de BorjCedria. Ce modèle a ensuite été adopté pour l'étude numérique

de bâtiments typiques tunisiens. Les résultats de la simulation montrent qu'environ 77% de la demande totale de chauffage d'un simple bâtiment tunisien typique, non isolée, de 16 m², peut être réalisé par un mur Trombe ventilé de 8 m². Une réduction, des charges annuelles de chauffage, de 97% a été atteinte par une zone mur Trombe de 6 m² lorsque les murs extérieurs de bâtiment simple considéré étaient des doubles murs isolés par 5 cm de polystyrène expansé.

Xiaoqiang Hong, Wei He [43] Un modèle CFD tridimensionnelle complet a été développé pour étudier le flux et transport thermique dans un nouveau mur Trombe équipé avec un store vénitien. Le modèle a été impliqué dans le flux et le transfert de chaleur dans le mur trombe qui a été conjugués avec de la conduction de la chaleur dans le store vénitien. Un équipement expérimental a été construit et utilisé pour valider la prédiction du CFD. Il a été constaté que le modèle établi est capable de prédire la performance opérationnelle du système à une précision raisonnable. L'effet des paramètres structuraux de mur Trombe a été étudié en détail sous la condition opérationnelle spécifique. La présente étude indique que la position de store vénitien, la largeur du conduit d'air et la zone des événements d'entrée et de sortie influence la performance thermique du système. Les résultats prédisent que l'optimum de la distance entre le verre et le store vénitien est de 0,09 m pour un conduit d'air de 0,14 m de largeur, la largeur du conduit d'air est de 0,14 m et la superficie de chaque événement est 0,60 m de largeur × 0,10 m de hauteur. Les résultats de la recherche pourraient aider dans l'élaboration d'une haute efficacité de système de chauffage solaire de l'air et ainsi de contribuer à réduire la consommation de combustibles fossiles dans le secteur du bâtiment.

CHAPITRE III :

ETUDE NUMERIQUE ET SIMULATION RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons définir un modèle simple de mur de trombe, ce modèle doit être modélisé de telle façon que tous les paramètres sont facilement calculés et en évitant le plus possible les équations compliquées.

Ce projet consiste à obtenir la température d'un type de mur spécifique (Trombe Wall) qui absorbe le flux solaire et fournit de la chaleur à la chambre.

Vous trouverez dans cette simulation :

- ✓ les courbes du flux solaire sont obtenues à partir de l'équation.
- ✓ Courbes de température du "mur trombe" sur une période de 36000 secondes = 10 heures
- ✓ la simulation a été effectuée par parties :
- ✓ partie 1 : étude de l'évaluation de température dans le mur extérieur
- ✓ partie 2 : étude de l'évaluation de température dans le mur intérieur
- ✓ comparaison entre le sud et le nord algérien par l'efficacité de mur

3.2 Système propose :

Dans ce travail nous étudions un local situé dans la ville de Adrar (le sud algérienne), cordones graphique d'Adrar latitude $27^{\circ}52'50,16''$ Nord et la longitude $0^{\circ}17'50,00''$, Altitude 279 m

Nous pouvons considérer que le flux solaire Φ (en W/m^2) arrivant sur la face extérieure du mur Trombe entre 7 h 00 et 17 h 00 est de valeur maximale 544 (W/m^2) à 13 h 00 :

Tableau 3.1 : Flux solaire hivernal (mois de janvier) de la ville d'Adrar [31].

Heure/jour	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	0	53	214	369	478	547	561	492	367	178
2	6	50	194	386	286	233	272	286	336	178
3	0	42	197	347	461	547	544	483	367	183

- Local est inoccupé ou seulement chauffé par le rayonnement solaire direct à travers le vitrage, de 7 h 00 à 16h 00 ;
- Comment va évoluer pendant les 24 heures de fonctionnement du système, la température ;
- $T(t)$ de l'air à l'intérieur du local si cette température est initialement de 10°

$$\Phi(t) = 544. \sin\left(\frac{\pi}{36000} t\right) = \text{flux solaire } \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad [33]$$

Le temps t et exprime par (s)

Φ Le flux solaires incident sur la vitre $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

$36000 \text{ s} = 10 \text{ h}$: c'est le temps d'ensoleillement, correspondant à la durée du jour en hiver (janvier), soit $\Phi_{\max} = 544(W/m^2)$, c'est le flux solaire maximum à 13 h 00.

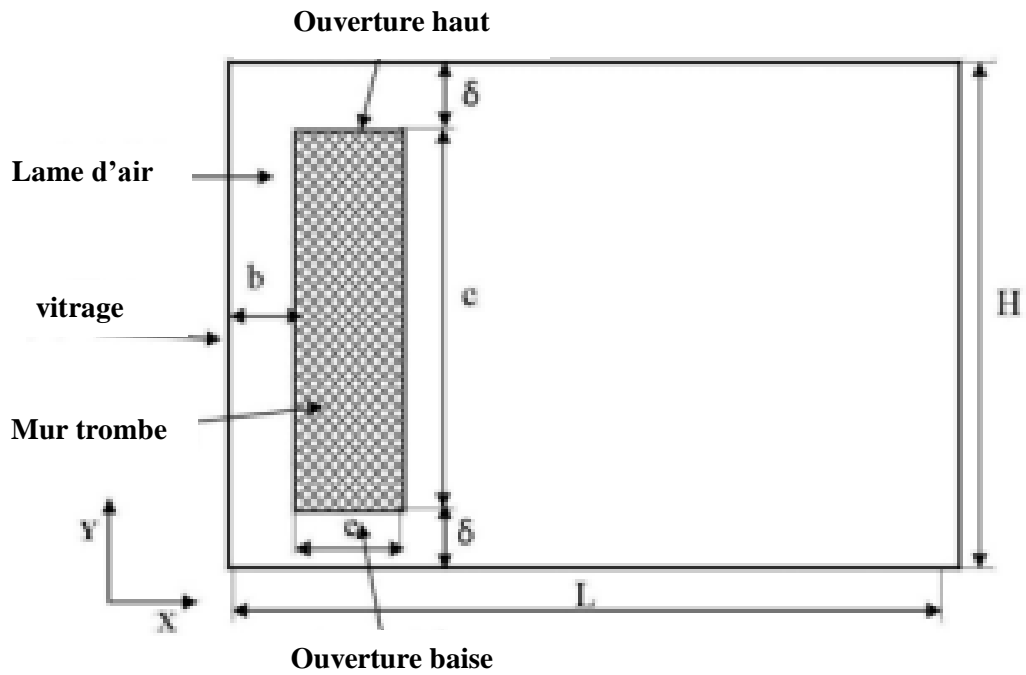


Figure 3.1 : Modèle géométrique du local étudié

$b = 0.30 \text{ m}$; $\delta = 0.20 \text{ m}$; $H = 3 \text{ m}$; $L = 5 \text{ m}$; $c = 2.60 \text{ m}$; $e = (0.20 \ 0.30 \ 0.40) \text{ m}$

Tableau 3.2 : Propriétés physiques des matériaux choisis pour la simulation

	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)	C_p (J/kg.K)
Fluide (aire)	1.2	0.024	1000
BETON	1400	1.05	1080
BRIQUE	1600	0.8	936
PIERRE	2300	3	936

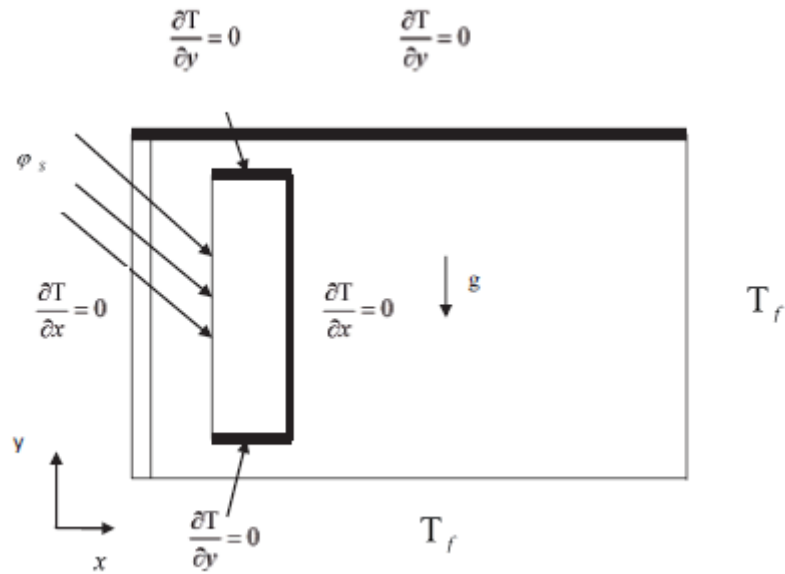


Figure 3.2 : Modèle physique étudié

Initialement, on ne considère que la température de l'air à l'intérieur du local (Fig. 3) et constante :

- $T(x, y, 0) = 0^{\circ}\text{C}$
- L'air est en repos (sans mouvement) : $U = V = 0$
- Sur les parois internes du local (condition de non glissement) : $U = V = 0$

Pour la formulation mathématique des équations régissant le mouvement d'air et le transfert de chaleur à l'intérieur du local, on adopte les hypothèses suivantes :

- L'écoulement et le transfert de chaleur sont bidirectionnels (2D) et instationnaire
- L'écoulement est laminaire compte tenu des dimensions et des faibles gradients de température rencontrés généralement en thermique des bâtiments,
- L'air est incompressible et newtonien,

- Les propriétés thermo physiques de l'air sont indépendantes de la température, sauf pour la masse volumique de l'air dans le terme de poussée, où celle-ci varie linéairement en fonction de la température et est donnée par la relation suivante :

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

Compte tenu de ces hypothèses, les équations traduisant la conservation de masse (3), de la quantité de mouvement (4) et de l'énergie (5) peuvent s'écrire :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + F_i$$

Conditions initiales et aux limites Initialement, on ne considère que la température de l'air à l'intérieur du local (Fig.) et constante:

- $T(x, y, 0) = 0^\circ\text{C}$
- L'air est en repos (sans mouvement) : $U = V = 0$
- Sur les parois internes du local (condition de non glissement) : $U = V = 0$
- Au niveau de la surface gauche du mur Trombe, $x = b$, $\delta \leq y \leq (H - \delta)$

$$\Phi(t) = 544. \sin\left(\frac{\pi}{36000} t\right) \text{ Avec } 0 < t < 36000 \text{ [33]}$$

- Verticale gauche (vitrage), $x = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$
- Verticale droite (mur latéral à droite du local), $x = L, T = T_f$

- Verticale droite (surface à droite du mur Trombe), $x = (b + e)$ et

$$\delta \leq y \leq (H - \delta), \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

- Horizontale haute (plafond), $y = H, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
- Horizontale basse (sol), $y = 0, T = T_f$
- Horizontale haute du mur Trombe, $x = b$ et $y = (H - \delta), \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
- Horizontale basse du mur Trombe, $x = b$ et $y = \delta, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

3.3 Résultats et discussions :

Dans mon code de simulation, on a choisi de travailler avec deux parties (extérieur et intérieur de mur) afin de pouvoir voir la différence entre les résultats finaux.

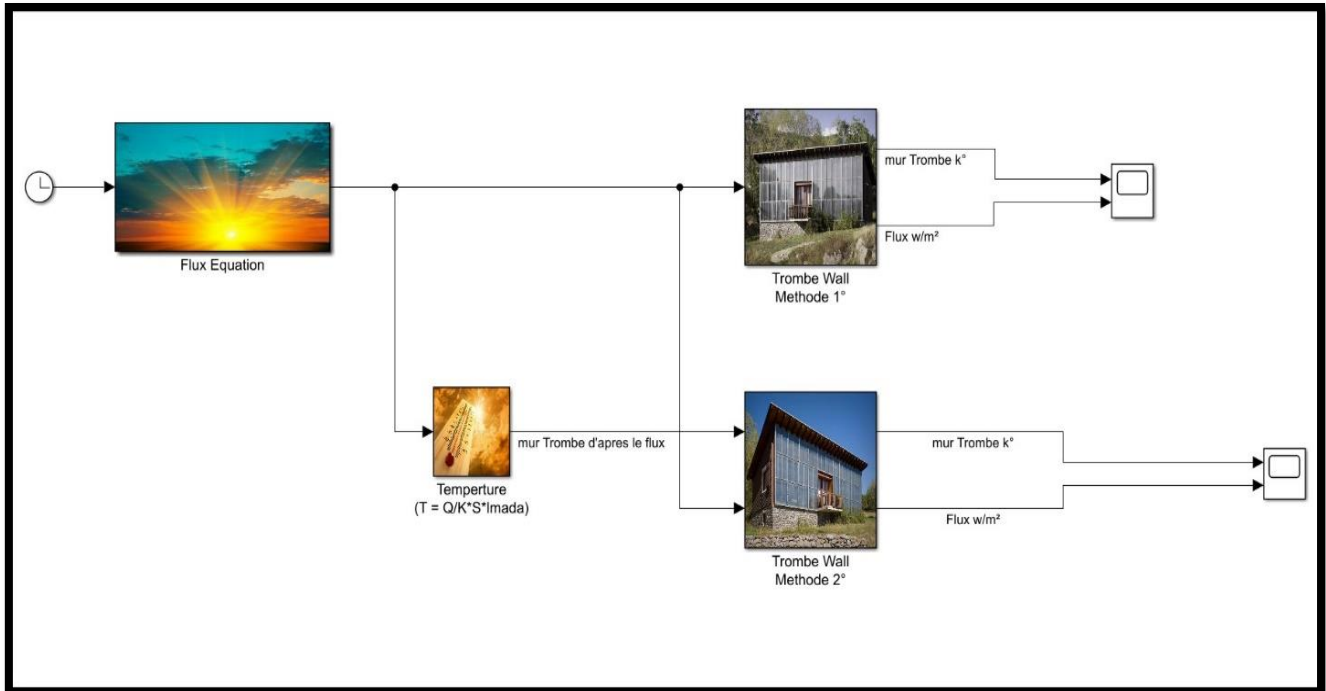


Figure 3.3 : Code de simulation

3.3.1 Le Mur extérieure :

La première méthode qui est montrée est la description de notre équation mathématique intégrée.

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_P u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)$$

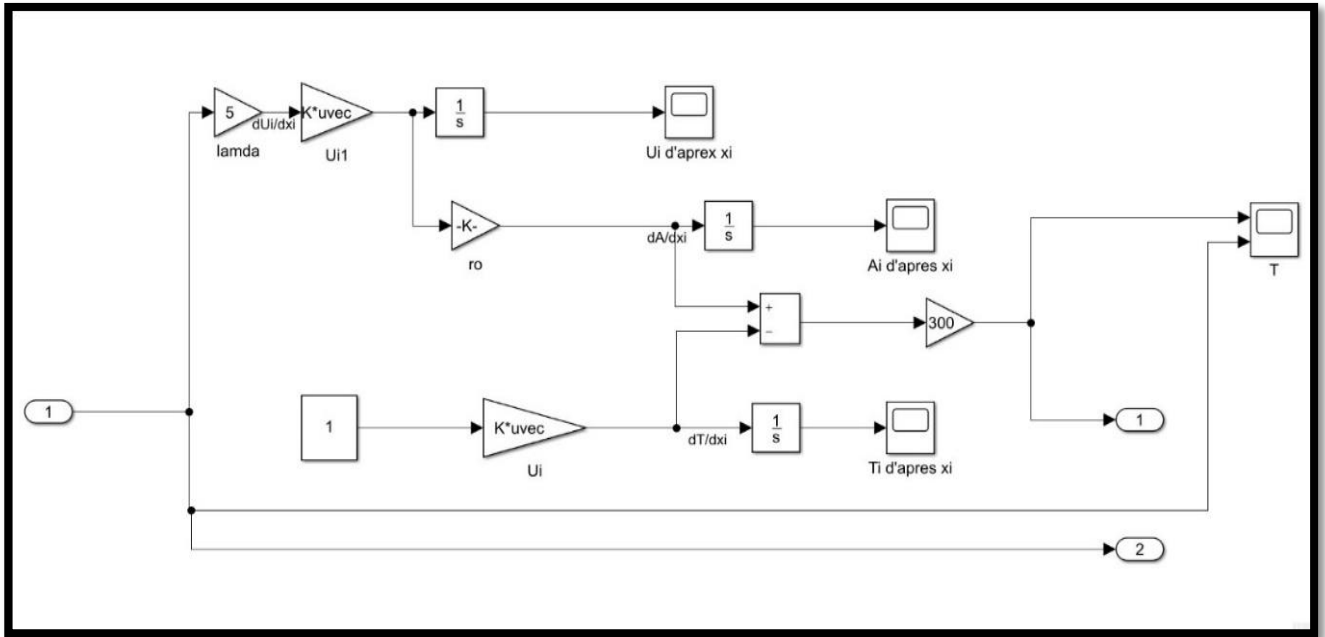


Figure 3.4 : Code de simulation pour mur extérieur

On a fait la simulation pour trois matériaux de construction :

1- Béton

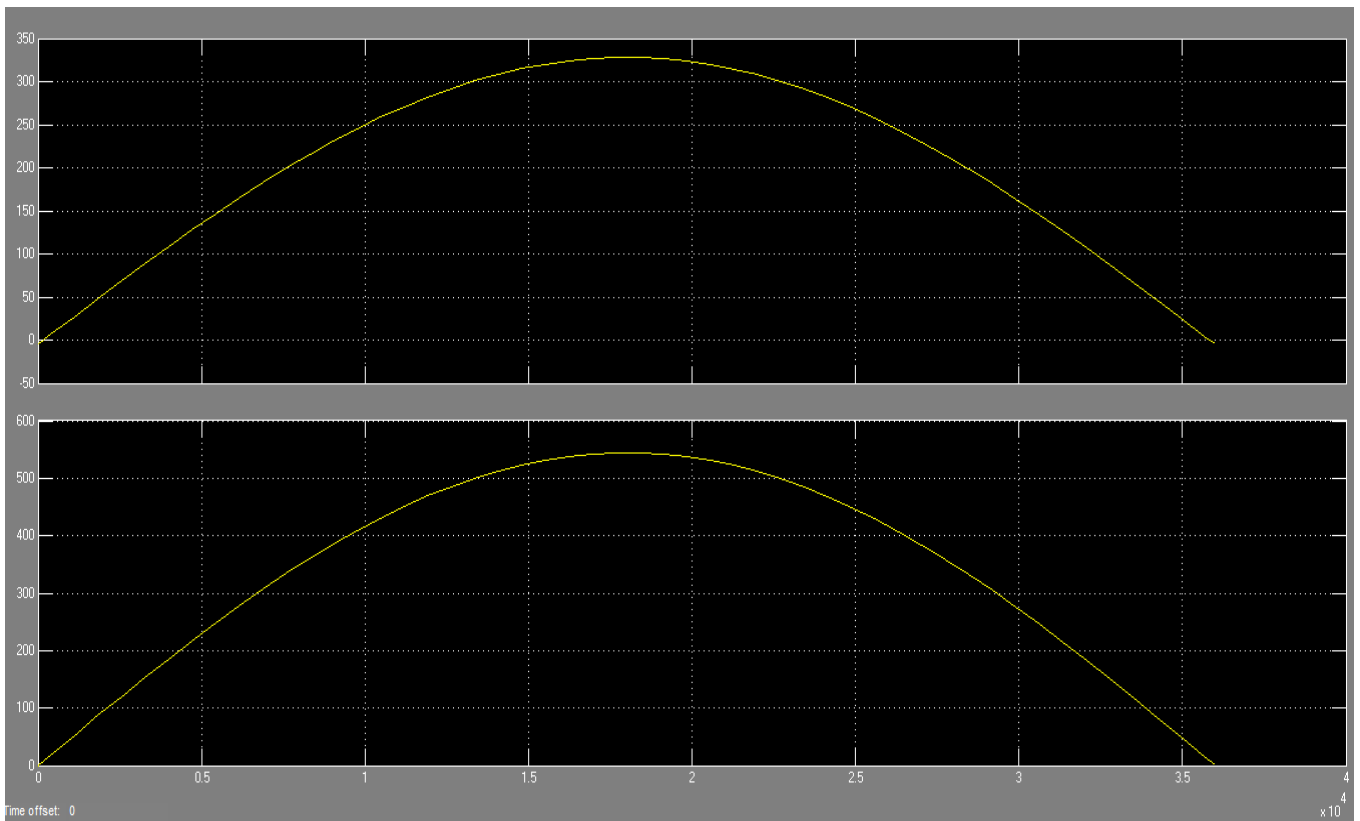


Figure 3.5 : L'évaluation de température et le flux solaire dans le cas du béton

2- brique :

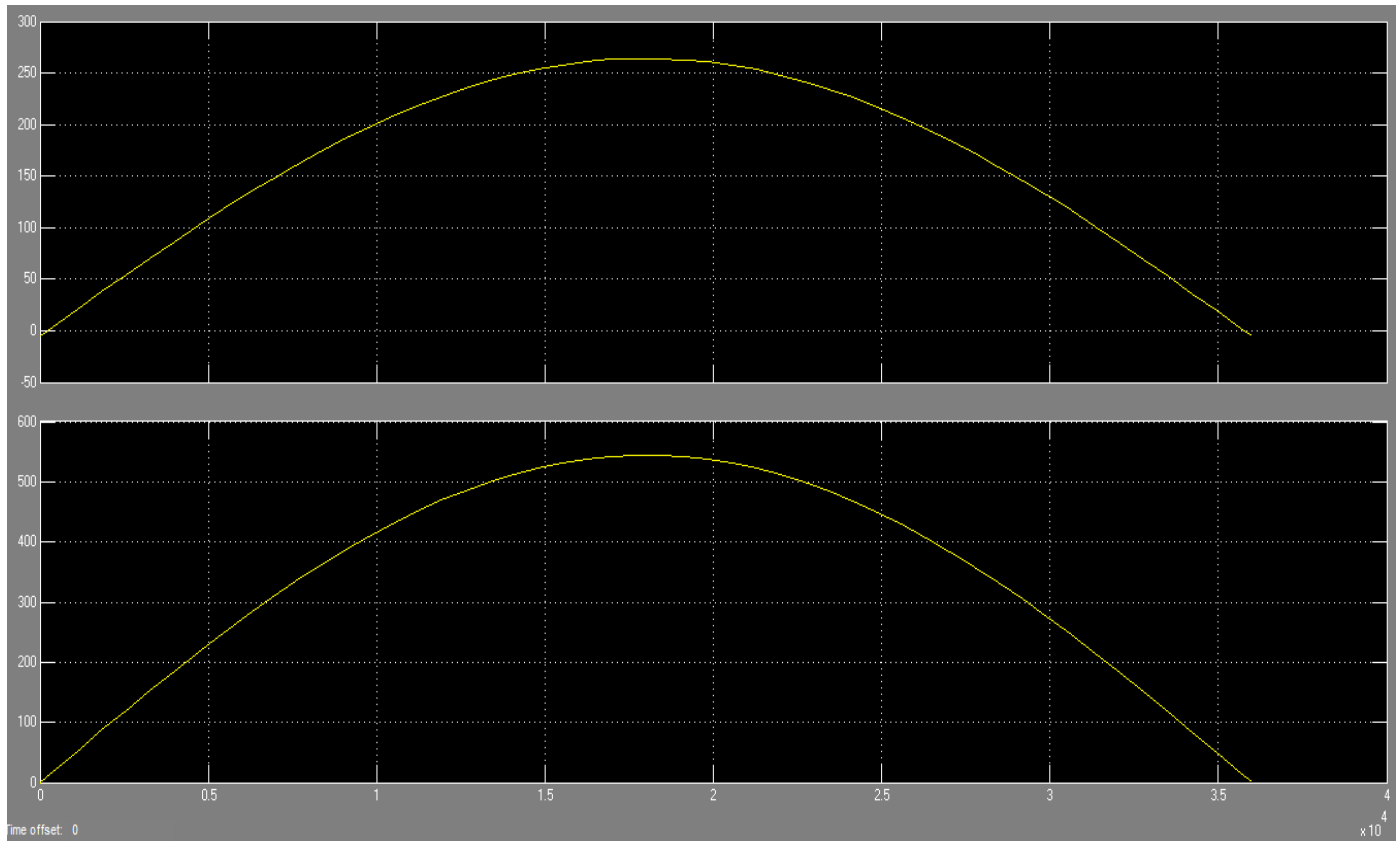


Figure 3.6 : l'évaluation de température et le flux solaire dans le cas de la brique

3 - Pierre:

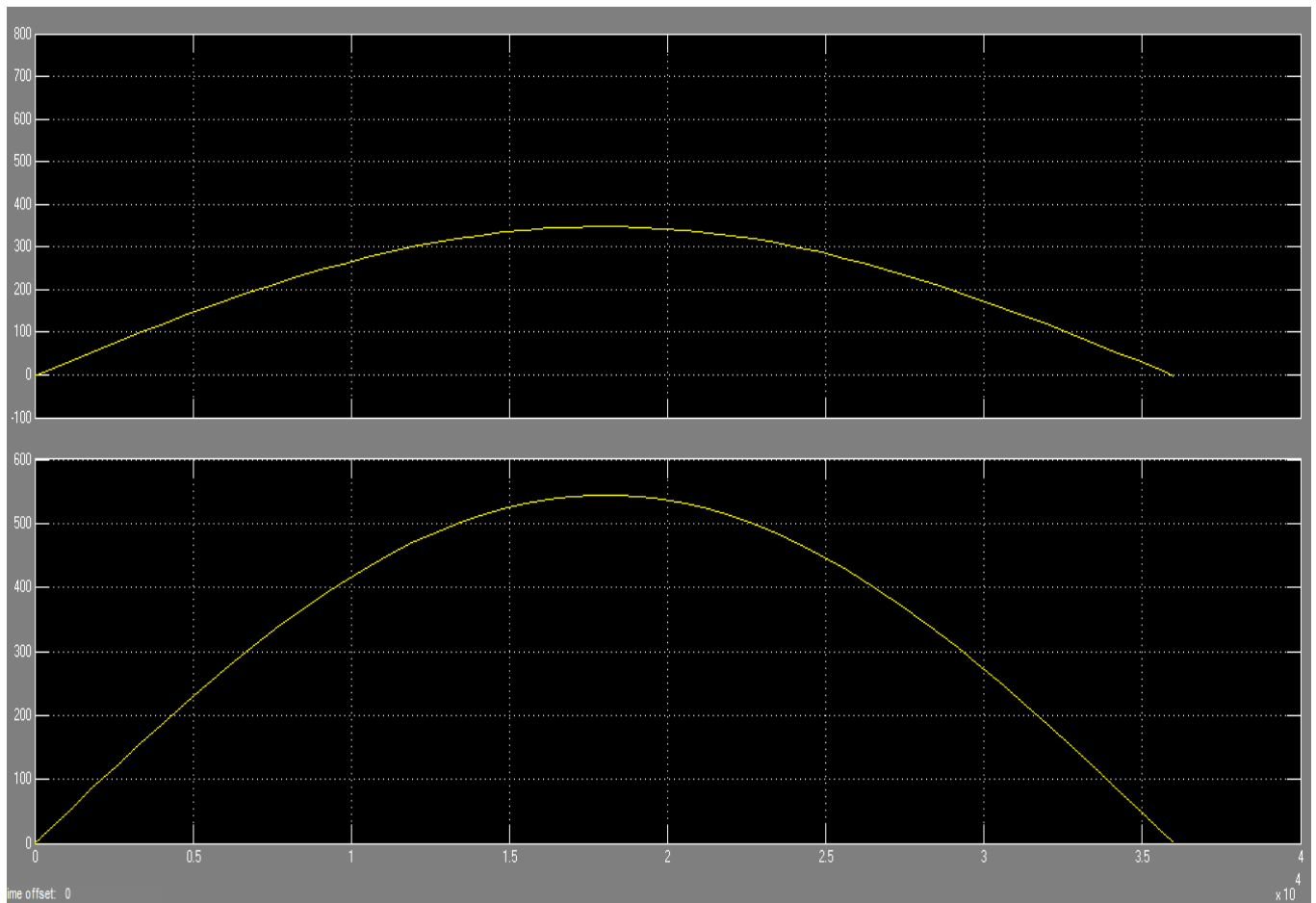


Figure 3.7 :L'évaluation de température et le flux solaire dans le cas de la pierre

3.3.1.1 Discussion pour les trois résultats :

Les 3 figures 3(1 2 3) ; montre l'influence de l'ensoleillement sur la température de la surface extérieur de mur Trombe, remarquons que l'évolution de la température au niveau de cette surface augmente lorsque le flux solaire augmente et elle diminue lorsque le flux solaire diminue. Aussi il existe trois différents valeurs de température maximale pour les chaque trois type des matériaux et on voit que le matériau qui a une conductivité la plus grand celui qui a la plus grand température, donc on a la pierre pour ce cas puis le béton et le brique respectivement.

3.3.2 Le Mur intérieur :

Dans un autre cas, on va présenter le résultat de la température calculée ; utilisant la loi entre le flux et la température.

On a utilisé la relation de conduction

$$\phi = kS\Delta T \quad [32]$$

K : coefficient de transmission surfacique (appelé aussi conductance)

S : la surface de mur

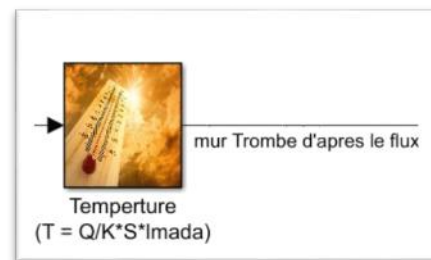
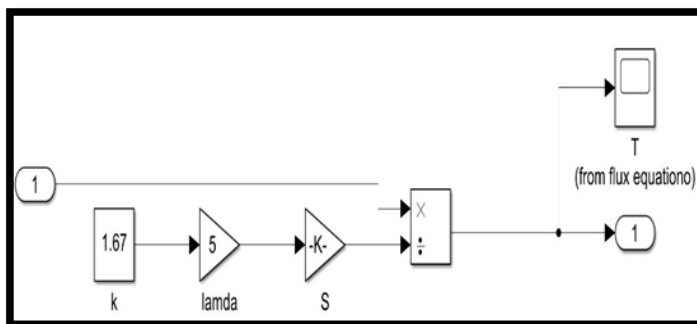


Figure 3.8 : La température calculée

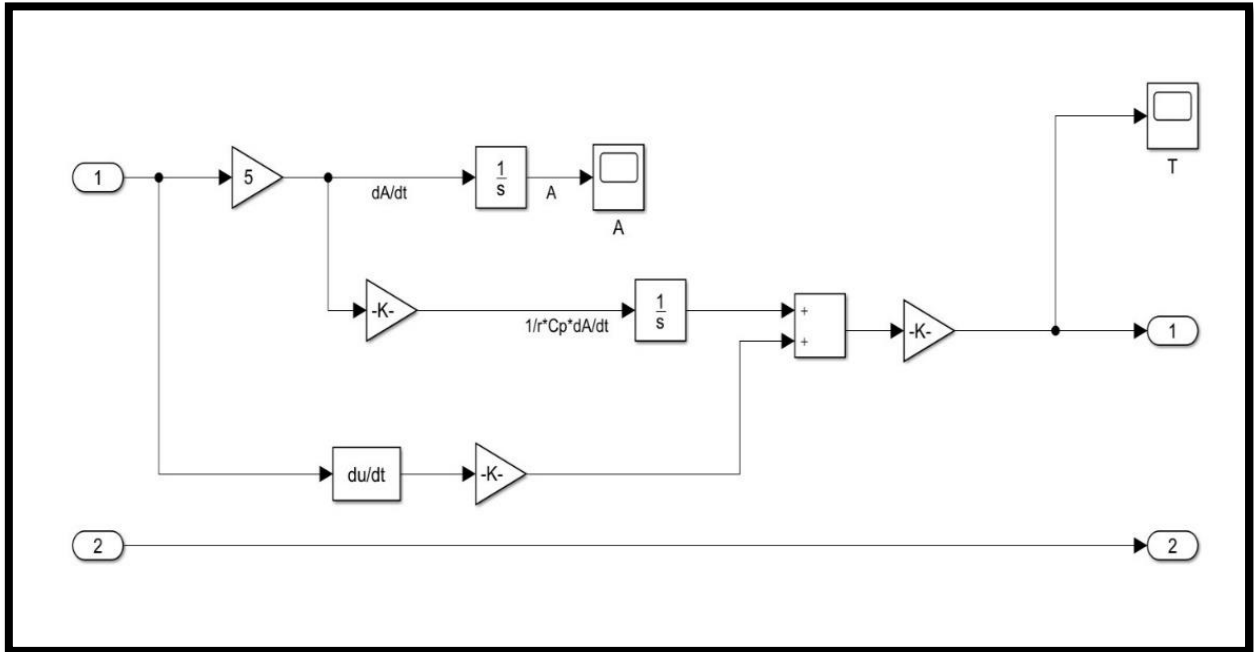


Figure 3.10 : schéma d'opération

- Les équations utilisées

$$K = \Sigma R + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} \quad [38]$$

$$\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} = 0,22$$

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad [39]$$

Par ces équations nous avons changé la valeur d'épaisseur de mur :

- 20cm
- 30cm
- 40cm

A chaque fois on va déterminer la variation de température et du flux, qui sont représentés sur le tableau suivant :

t (s)*10 ⁴	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
q (w/m ²)	250	430	510	510	450	290	60
Ti	140	245	330	330	252	150	48
Te20	127	217	304	304	229	135	45
Te30	124	219	299	299	224	132	44
Te40	122	214	293	293	219	119	43

Tableau 3.3 : variation de flux et de température dans trois épaisseurs différents

Avec l'aide de cette méthode, nous pouvons obtenir les graphiques de température du mur Trombe en fonction du temps.

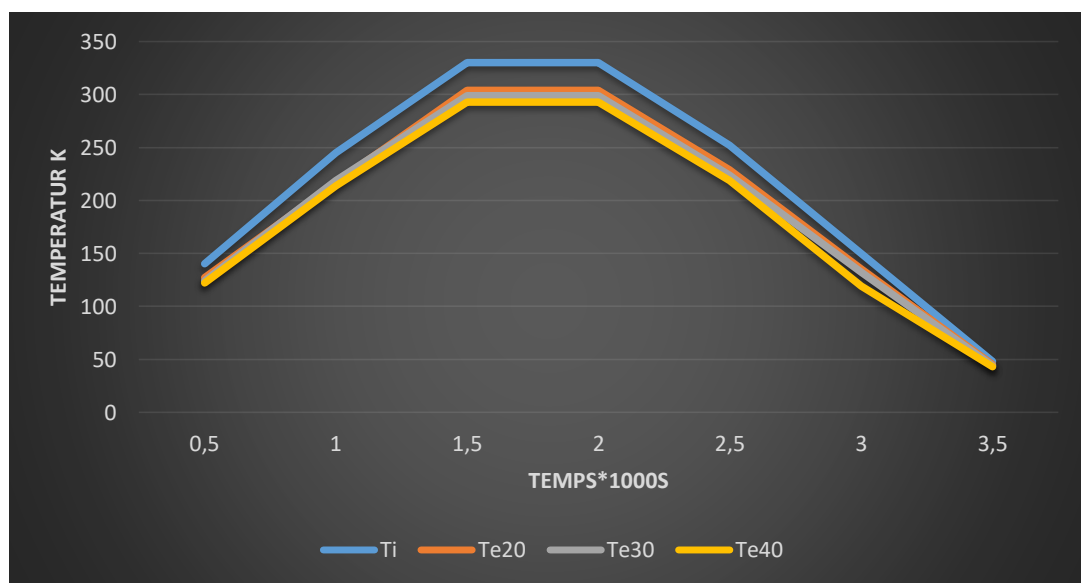


Figure 3.9 : L'évaluation de température par rapport l'épaisseur de mur, en fonction de temps.

3.3.2.1 Discussion :

Représente l'amélioration du transfert thermique par conduction au cours du temps au niveau de l'épaisseur du mur Trombe, en remarque que tout ce que avions une grande épaisseur, la température dans le mur intérieur diminuer.

3.4 La comparaison entre le nord et le sud de l'Algérie :

Avons que n'a travailler sur le sud algérien, maintenant on asse sur une simple étude de mur e trombe dans le nord d'Algérie, exemple a la région Blida

Etude de site :

Coordonnées $36^{\circ} 29' 00''$ nord , $2^{\circ} 50' 00''$ est Altitude 229 m [40].

Le flux solaire : 310 w/m^2

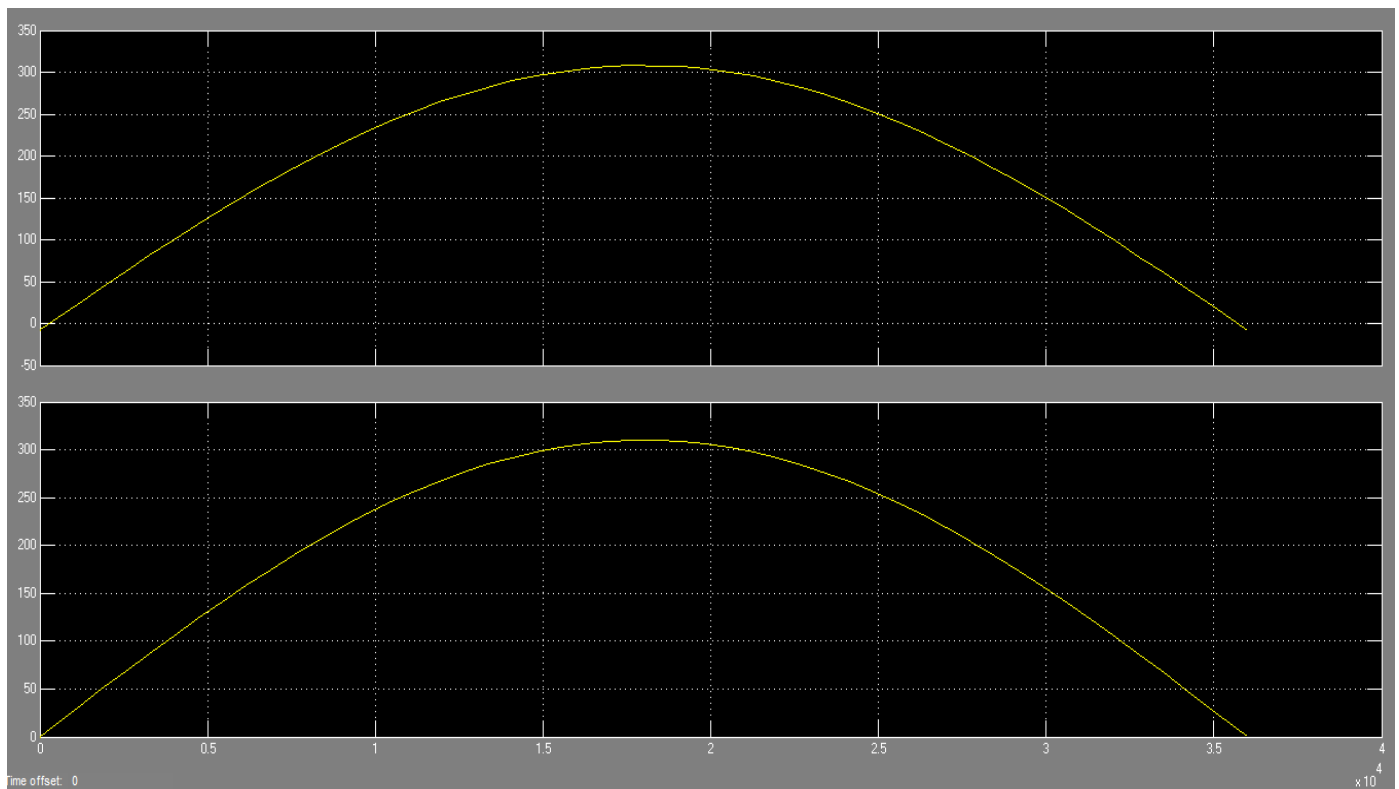


Figure 3.10 : L'évaluation de température extérieure de mur et le flux solaire à blida

3.4.1 Discussion : dans ce cas l'éclairement à blida est presque égale 310 w/m^2 , on remarque que le flux max à 13h et la température va augmenter jusque à 31°c seulement par contre si nous somme a le nord le sud de pays, la température dans le point de flux maximal va augment jusque à 40°c .

Conclusion générale

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, dans l'étude qui a été présentée le mur Trombe paraît comme une solution intéressante pour l'économie de l'énergie.

Le résultat obtenu en utilisant un chauffage passif par la technique d'un mur Trombe, semblent intéressants d'appliquer un tel système.

L'extension et l'amélioration du présent travail semblent intéressantes à développer, pour cela, nous citerons les points suivants :

- * Ces travaux de simulation ont permis d'obtenir des températures d'entrée et de sortie (mur de trombe extérieur et intérieur) en utilisant le logiciel Matlab Simulink
- * La température de sortie varie en fonction du flux solaire.
- * La comparaison des résultats des trois différents matériaux de construction, pierre, béton et brique. On trouve que pour choisir l'élément de construction il faut considérer leur caractéristique (la conductivité, masse volumique) ; le cas favorable dans cette comparaison c'est le béton parce que la pierre est très chère et ça chauffe beaucoup et rapidement bien que c'est un matériau très solide. Et pour le cas de brique on détermine dans cette simulation que ce matériau est presque isolant, donc c'est un cas défavorable pour notre expérience
- * L'épaisseur aussi a un effet sur l'augmentation de la température de l'intérieur du mur à l'extérieur par la relation de Fourier $\phi = kS\Delta T$, on conclut que le mur de trombe avec une petite épaisseur avait une amélioration significative de la température.

* par l'effet de l'éclairement solaire, la densité de flux jouer un rôle important à l'efficacité de mur de trombe pour bien chauffe le lieu, ce qui donne que la température va être plus grand pour nous cas a le sud d'Algérie toujours le fonctionnement de mur sa sera parfait par ce que le flux est très grand par rapport dans le nord de pays.

En terme générale, l'élément essentiel de la conception des murs Trombe est le choix du matériau de masse thermique et de l'épaisseur appropriés. L'épaisseur optimale de la masse thermique dépend de la capacité thermique et de la conductivité thermique du matériau utilisé. Il y a quelques règles à suivre lors du dimensionnement de la masse thermique.

Effet du mur sur l'épaisseur de la masse thermique sur les fluctuations de température de l'air dans l'espace habitable.

L'épaisseur optimale d'un mur de maçonnerie augmente à mesure que la conductivité thermique du matériau du mur augmente. Par exemple, pour compenser un transfert de chaleur rapide à travers un matériau hautement conducteur, la paroi doit être plus épaisse.

References bibliographies

- [1] A. B. Stambouli, "Promotion of renewable energies in Algeria: Strategies and perspectives," *Renew. Sustain. Energy*, 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. Boudghene Stambouli, and B. Draoui, "Prospects of wind farm development in Algeria," *Desalination*, vol. 239, no. 1–3, pp. 130–138, 2009.
- [5] I. Guy, La SAGA de mes capteurs solaires à AIR, février 2012, Localisation : Villedieu la Blouère , 49450 , Pays de Loire (47° 09.049 N et 1° 03.899 W)
- [6] *Memoire technique du bâtiment, confort technique*, CERTU – 2003
- [7] *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE Standard 55 – 2004
- [8] DTR C3.2/4 'Document Technique Réglementaire, Règlementation Thermique Algérienne du Bâtiment', CNERIB, 2016.
- [9] J.L. Barras « Cours de Physique ». Collège du Sud, Bulle. Avril 2001.
- [10] 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
- [11] Appellation recommandée par la Commission internationale de l'éclairage (anciennement émittance énergétique)
- [12] C. Long & N. Sayma. « Heat Transfer ». Chris Long, Naser Sayma & Ventus Publishing APS ISBN 978- 87-7681-432-8. 2009.

- [13] P. A. C. Raats, « Steady Gravitational Convection Induced by a Line Source of Salt in a Soil », *Soil Science Society of America Journal*, n° 33, 1969, p. 483-487
- [14] 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. OLGAY, « 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] <https://www.paperblog.fr/5906643/reduire-l-effet-de-paroi-froide/>
- [22] <https://coproprietes.senova.fr/conseils-techniques/ameliorer-confort-copropriete-sanstravaux/attachment/confort-temperature-ressentie/>
- [23] Développer une architecture bioclimatique méditerranéenne. (fichier PDF)
- [24] Akbari, H., & Borgers, T. R. (1979). Free convective laminar flow within the Trombwall channel. *Solar Energy*, 22(2), 165–174.
- [25] Courgey, S., & Oliva, J.-P. (2006,2007). *La Conception Bioclimatique*. Mens, France: Terre Vivante
- [26] Conception bioclimatique des bâtiments K. Tsipras (Page 214).
- [27] Bioclimatic design of buildings K. Tsipiras (page 213).
- [28] D.M. Utzinger, 'Analysis of Building Components Related to Direct Solar Heating of Building', M.S. Thesis, University of Wisconsin, Madison, 1979.
- [29] A. De HERDE & A. Evrard, « béton et utilisation rationnelle de l'énergie », Bulletin publié par : FEBELCEM – Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, (2005), p 28a.

- [30] Roger. CASAR, Guide des calculs des déperditions et charges thermiques d'hiver, « Détermination des puissances de chauffage a installé dans les locaux », collection des guides de l'AICVF, ouvrage de la commission technique coordonné, Edition (1989).
- [31] <https://www.cder.dz/>
- [32] Document de la réglementation thermique algérien 'DTR' (page 18)
- [33] DTR
- [34] WH Ball, Communication présentée à la réunion générale annuelle, Institut du génie du Canada, publiée à l'origine en septembre (1967).
- [35] DTR
- [36] Développer une architecture bioclimatique méditerranéenne. (fichier PDF)
- [37] J. Bernard, Energie Solaire, Calculs et optimisation, Ellipses Edition marketing S.A 2011
- [38] DTR
- [39] DTR
- [40] K. Imessad, Et Al. ' Renewable Energy, Vol. 71 (2014) Pp. 589-597.
- [41] L Zalewski , Etude expérimental et simulation numérique du mur solaire composite
- [42] E. TASDEMIROGLU ET all, The Performance Results of TROMBE-WALL Passive systems Under Aegean Sea Climatic Conditions, Solar Energy 181-189. 1983.
- [43] Habitation rurale à forte performance énergétique , CDER
- [44] L Zalewski et all, Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material, Univ Lille Nord de France, France, Solar Energy 86 (2012) 208–219.

- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 195-198 Evaluation des Performances d'un Mur Trombe.
- [48] Jibao Shen et al, Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls, Energy and Buildings 39 (2007) 962–974.
- [49] Y Li et al, STUDY ON THE AIR MOVEMENT CHARACTER IN SOLAR WALL SYSTEM, University of Technology, 2007, Beijing, 100022, China
- [50] Arvind Chelet et al, Energy conservation in honey storage building using Trombe wall, Energy and Buildings 40 (2008) 1643–1650.
- [51] M.K. Cherier et al, Etude des Performances Thermiques d'un Mur Trombe, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, B.P, 88, ZI, Garet Taam Ghardaïa (2008).
- [52] Zohir YOUNSI et al, étude expérimentale d'un mur TROMBE-COMPOSITE à échelle réduite intégrant des matériaux à changement de phase, IXème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, 18-20 mai 2009, Lille.
- [53] B.K.Koyunbaba et Z Yilmaz, The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels, Turkey, Renewable Energy 45 (2012) 111e118.

[55] F Abbassi et al, Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations, Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie (CRTE), PB 95, HammamLif 2050, Tunisia, Energy and Buildings 80 (2014) 302–308.