

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



UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA



**FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de master

Option : énergies renouvelables

**Etude expérimentale pour chauffage
d'habitation (utilisant mur de TROMBE)**

Présenté par :

GASMI ToufikMr. LAFRI Djamel

Encadré par :

Année universitaire 2014/2015

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents, votre courage, vos sacrifices ont été pour moi le meilleur soutien durant ce long parcours, veuillez trouver dans ce travail une grande reconnaissance pour ce que vous avez entrepris à mon égard, et un fruit de toutes vos prières et vos efforts.

À mes chers étudiants à l'école coranique de Béni Tamou.

À mes chers frères et sœurs.

À tous mes amis.

À tous mes collègues.

À toute ma famille.

Remerciements

Un grand merci à ALLAH de m'avoir guidé vers le bon chemin de la lumière et du savoir.

Je tiens à remercier vivement mon encadreur, Monsieur LAFRI Djamel, pour son suivi, son assistance et ses conseils précieux le long de ma formation. Ses compétences ainsi que son expérience dans le domaine m'ont été d'une grande utilité.

Je remercie beaucoup tous les enseignants qui m'ont enseigné durant mon parcours académique, mention spéciale aux enseignants du département de génie mécanique.

J'exprime ma reconnaissance à tous les membres du jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme finale de ce mémoire.

Je remercie aussi tous ceux qui m'ont aidé à la réalisation de ce projet, spécialement KheddamRedwane, Taleb Abd El Rezzak, Kcimi Mouhammed et la famille Ben Chrif.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mes parents pour leur sacrifice et soutien inestimables durant toutes mes études.

Enfin, mes remerciements vont aussi à tous mes collègues de promotion 2014-2015 de génie mécanique, et particulièrement mes collègues en énergies renouvelables, ainsi que tous ceux qui ont aidés de près ou de loin, à la réalisation de ce travail

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 thermocirculation. Dans ce travail, une étude expérimentale menée sur un prototype à échelle réduite, d'un mur solaire TROMBE classique à l'université Saaddahleb Blida, une chambre à échelle réduite bien isolée a été construite, elle contient un mur sombre de béton, orienté plein sud auquel on vient coller un double vitrage, et les autres parois construites avec des panneaux de contreplaqué et polystyrène. On a étudié la convection dans la cheminée solaire; on a choisi deux journées typiques pour la convection naturelle et d'autres journées pour la convection forcée, où on a surveillé la variation des températures aux différents points du système (l'intérieure de la chambre, mur capteur, vitrage, canal solaire,...) pendant la journée et la nuit. Les résultats nous ont confirmés l'incidence de la thermocirculation ce qui augmente la température de la chambre et le rôle du béton dans le stockage d'énergie, et le double vitrage nous a confirmé également son efficacité dans l'isolement de la fuite de température du mur à l'extérieur et aussi l'efficacité du polystyrène dans l'isolement de température des bâtiments.

Abstract

The wall sensor-storer remains one of the systems the most efficient for the passive heating of locals. The performance of this wall depends on several parameters, namely: its nature, its thickness, presence or not of thermocirculation. In this work, an experimental study conducted on a prototype, on a reduced scale, of a classic solar Trombewall at the university Saaddahleb Blida, a room of reduced scale well isolated has been constructed, it contains a somber wall of concrete, facing full south in which we paste a double glazing, and the other walls built with plywood panels and polystyrene. We studied the convection in the solar chimney; we choose two perfect days for the natural convection and another day for the forced convection, where we monitored the variation of temperatures at different points of the system (inside the room, sensor wall, glazing, solar channel, etc.) during the day and the night. The results have had confirmed the incidence of the thermocirculation which increases the temperature of the room, and the role of the concrete in the storage of energy, also the double glazing have had confirmed its effectiveness in the insulation of the wall temperature leak to the outside and the effectiveness of polystyrene in the insulation of buildings temperature.

ملخص

الجدار المستشعر-المخزن لا يزال واحدا من أكثر نظم التدفئة الكامنة للمباني فعالية. أداء هذا الجدار يعتمد على عدة معايير و هي طبيعته .سمكه. ووجود أو عدم وجود الجريان الحراري . في هذا العمل أجرينا دراسة تجريبية على نموذج أولي . على نطاق مصغر . لجدار شمسي ترومب تقليدي في جامعة سعد دحلب البلدية .تم بناء غرفة مصغرة معزولة جيدا. تحتوي على جدار داكن من الخرسانة. موجهة نحو الجنوب أين ألصقنا زجاجا مزدوجا. و الجدران الأخرى تم بناؤها بواسطة ألوح خشب رقائقي و بوليستيرين . قمنا بدراسة الحمل الحراري في المدخنة الشمسية . اخترنا يومين مثاليين من أجل الحمل الحراري الطبيعي و يوم آخر للحمل الحراري المصطنع أين راقبنا تغيرات الحرارة في مختلف نقاط النظام (داخل الغرفة. الجدار المستشعر. الزجاج. القناة الشمسية ...) خلال النهار و الليل. أكدت لنا النتائج حدوث الجريان الحراري الذي يرفع درجة حرارة الغرفة و دور الخرسانة في تخزين الطاقة. كما أكد لنا الزجاج المزدوج فعاليته في عزل تسرب حرارة الجدار للخارج. و أيضا فعالية البوليستيرين في عزل حرارة البنايات.

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| Introduction..... | 11 |
| CHAPITRE 01:GÉNÉRALITÉ ET ÉTUDE BIBLIOGRAPHIE | |
| 1.1 Généralité..... | 14 |
| 1.1.1 L'énergie thermique solaire, c'est quoi ?..... | 14 |
| 1.1.2 Quelque généralité sur l'énergie solaire..... | 14 |
| 1.1.3 Chauffage des Locaux..... | 15 |
| 1.1.3.1 Systèmes de stockage passif..... | 16 |
| a. Stockage par ballon d'eau..... | 17 |
| b. Stockage par lit de galets..... | 18 |
| c. Stockage par mur capteur..... | 20 |
| 1.1.3.2 Maison Bioclimatique..... | 21 |
| a- Les techniques passives | 22 |
| b- Les techniques dynamiques..... | 25 |
| 1.1.3.3 Description du système de chauffage par mur Trombe..... | 26 |
| a- Fonctionnement de mur Trombe pendant le jour (période de chauffe)..... | 26 |
| b- Fonctionnement de mur Trombe pendant la nuit..... | 27 |
| c- Caractéristiques du vitrage et de la lame d'air..... | 29 |
| 1.1.4 La présentation de différents types de mur solaire passif | 30 |
| 1.1.5 Confort thermique..... | 34 |
| 1.1.5.1 Evaluation du confort thermique..... | 34 |
| 1.1.5.1.1 Température résultante (opérative), T_r | 34 |
| 1.1.5.1.2 La zone de confort | 35 |
| 1.1.5.1.3 Différents facteurs agissant sur le confort thermique..... | 35 |
| 1.1.5.1.3.1 L'orientation..... | 35 |
| 1.1.5.1.3.2 La ventilation naturelle..... | 36 |
| 1.1.5.1.3.3 Dimension des ouvertures..... | 37 |
| 1.1.5.1.3.4 La forme et compacité..... | 37 |
| 1.1.5.1.3.5 Lacouleur..... | 38 |
| 1.1.5.1.3.6 Protection solaire et vent dominant..... | 38 |
| 1.1.5.1.3.7 Isolation thermique..... | 39 |
| 1.1.5.1.3.8 Les caractéristiques principales de l'isolation thermique..... | 39 |
| a) La conductivité thermique (λ)..... | 40 |
| b) La résistance thermique(R) ou coefficient de conductance (K)..... | 40 |
| 1.1.5.1.3.9 Les déperditions thermiques..... | 40 |
| a)Déperditions surfaciques par transmission..... | 40 |
| b)Déperditions linéiques..... | 41 |
| c)Déperditions par renouvellement d'air..... | 41 |
| 1.1.5.1.4 Types d'isolation..... | 42 |
| a) Isolation de l'intérieur..... | 42 |
| b) Isolation de l'extérieur..... | 42 |
| 1.1.5.1.5 Inertie thermique..... | 43 |
| 1.1.5.1.5.1 Les principales caractéristiques de l'inertie thermique sont..... | 44 |
| a) La diffusivité thermique..... | 44 |
| b) L'effusivité thermique..... | 44 |
| 1.2 Etude bibliographique..... | 45 |

CHAPITRE 02: RÉALISATION DU PROJET

| | |
|--|----|
| 2.1 Introduction..... | 51 |
| 2.2 Schéma de projet..... | 51 |
| 2.3 Réalisation du projet sur le terrain..... | 53 |
| 2.3.1 Etape de soudage de structure métallique..... | 53 |
| 2.3.2 Atelier de menuiserie de bois..... | 55 |
| 2.3.3 Etape montage des parois..... | 56 |
| 2.3.4 Préparation de matériau lourd (Mur on béton armé)..... | 58 |
| 2.3.4.1 compositions de béton..... | 58 |
| 2.3.4.2 Etape de peinture du mur..... | 59 |
| 2.3.5 Etape préparation de vitrage..... | 60 |
| 2.3.6-Etape Assemblage le mur vitré avec la pièce à chauffé..... | 61 |
| 2.3.7 Isolation thermique de la chambre | 61 |

CHAPITRE 03: INSTRUMENTATION

| | |
|---|-----|
| 3.1 Introduction..... | 64 |
| 3.2 Les instruments de mesure..... | 64 |
| 3.2.1 Mesure du rayonnement solaire global..... | 64 |
| 3-2-2 Mesure des températures..... | 65 |
| 3-2-3 Mesure de l'écoulement de l'air..... | 65 |
| 3-3 installation des instruments et des appareilles..... | 66 |
| 3 3-1 répartitions des thermocouples sur le système | 66. |
| 3-3-2 La carte d'acquisition de données..... | 68 |
| 3-3-3 Ventilateur pour la convection forcée..... | 70 |
| 3.4 Mesure de la température ambiante..... | 71 |
| 3-5 Schéma descriptif du montage..... | 72 |

CHAPITRE 04: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

| | |
|---|-----------|
| 4-1 Introduction..... | 74 |
| 4-2 Partie 01 (convection naturelle)..... | 74 |
| 4-3 Partie 2 (convectionforcé)..... | 83 |
| Conclusion..... | 91 |
| Références bibliographiques | 93 |

List des figures

Chapitre 01

- Figure 1.2 Schéma d'une Installation de chauffage à air.
- Figure 1.3 Schéma d'un lit de galets avec le sens d'écoulement de l'air en stockage et en déstockage.
- Figure1.4 schéma simplifié d'un chauffage solaire passif à air utilisant un mur comme stockage thermique (mur capteur).
- Figure 1.5 compacité d'une maison en fonction de sa forme, pour une même surface de plancher (120m²).
- Figure 1.6 schéma d'une habitation bioclimatique.
- Figure1.7 fonctionnement de jour en période de chauffe.
- Figure1.8 fonctionnement de nuit en période de chauffe.
- Figure1.9 Fonctionnement hiver.
- Figure1.10 Fonctionnement été.
- Figure1.11 fonctionnement du double vitrage peu émissif.
- Figure1.12 Transmission du rayonnement solaire dans vitrages.
- Figure1.13 Le mur solaire composite.
- Figure1.14 le mur trombe standard.
- Figure1.15 mur trombe avec une couche d'isolant sur le dos.
- Figure1.16 Le mur capteur

Chapitre 02

- Figure dessin du projet.

Chapitre 03

- Figure3.1 Schéma de la distribution des Thermocouples dans le mur.
- Figure3.2 Schéma de montage.

Chapitre 04

- Figure4-1-1 Evolution de l'éclairement solaire globale reçu par le mur.
- Figure4-1-2 variation de la température à l'entrée et à la sortie de canal.
- Figure 4-1-3 variation de la température à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre.
- Figure4-1-4 variation de la température suivant l'épaisseur du mur.
- Figure4-1-5 variation de la température suivant la hauteur du mur
- Figure4-1-6 variation de la température à l'entrée et à la sortie du canal et à la face externe du mur
- Figure4-2-1 variation de radiation solaire globale reçue par le mur
- Figure 4-2-2 variation des températures intérieure et extérieure (ambiante) de la chambre.
- Figure4-2-3: variation de la température à l'entrée et à la sortie du mur capteur.

Figure4-2-4 variation des températures entrée et sortie et intérieure de la chambre.

Figure4-2-6 variation des températures de vitrage intérieur et de face extérieur de mur.

Liste des tableaux

- Tableau1.1 Facteur d'absorption en fonction de la couleur.
- Tableau3.3 l'emplacement des thermocouples dans les voies.
- Tableau4.1 Temps local de site de Blida et leur minute sur le figure.
- Tableau4.2 Temps local de site de Blida et leur minute sur le figure.

Nomenclature

| | |
|---|---|
| <p>h_v : coefficient volumique (W/m³.k).</p> <p>ρ_f : masse volumique de l'air (kg/m³).</p> <p>V: débit volumique de l'air (m³/s).</p> <p>S : section droite du stockage (m²).</p> <p>Dg: diamètre moyen des galets (m).</p> <p>T_s: température du mur(°C).</p> <p>T_i :température de l'air intérieur(°C).</p> <p>T_a : température extérieure (°C).</p> <p>T₀: température de l'eau du réseau (°C).</p> <p>T_{fe}: température à l'entrée des capteurs.</p> <p>T_{st}: température de l'eau du stockage.</p> <p>φ: Humidité relative.</p> <p>Q_{air}: la puissance perdue par renouvellement de l'air (W).</p> <p>C_{pa}:chaleur massique de l'air (j/kg.k).</p> <p>Trmi : Température radiante moyenne.</p> <p>Tip : Température intérieure de chaque paroi d'un local, de (°C).</p> <p>Si: surface de chaque paroi d'un local(m²).</p> <p>T_{rm} : Température radiante moyenne des parois (°C).</p> <p>Va: Vitesse de l'air (m/s).</p> <p>λ: Le coefficient de conductivité thermique (w/m.k).</p> <p>R : La résistance thermique (m²°C/W).</p> <p>K: conductivité thermique (W/ m²°C).</p> <p>ρ : Masse volumique en (Kg/m³) ;</p> | <p>h_i, h_e: coefficients d'échanges superficiels interne et externe en (W/m²°C).</p> <p>Ki: coefficient de transmission surfacique en (W/m²°C).</p> <p>K_l : coefficient d'échange de transmission linéique de la liaison (W/m°C).</p> <p>L : Longueur intérieure de la liaison en (m)</p> <p>q_e, q_i, q_v: respectivement débit entrant, par infiltration et débit par ventilation [m³/h].</p> <p>M : coefficient de perméabilité des ouvrants (portes et fenêtres) en [m³/hm²pa^{2/3}].</p> <p>f : coefficient de perméabilité des ouvrants des fentes en [m³/hm²pa^{2/3}].</p> <p>A_m : surface des ouvrants [m²].</p> <p>l_f : longueurs des fentes[m] ;</p> <p>e_m: coefficient d'exposition au vent et au tirage thermique [pa^{2/3}].</p> <p>e_i: coefficient d'exposition au seul tirage thermique du local non chauffé[pa^{2/3}].</p> <p>a: Diffusivité en (m²/s).</p> <p>b : L'effusivité thermique ((W/°Cm²)^{1/2}).</p> <p>m : le débit d'air qui s'écoule dans la serre</p> <p>C : Chaleur spécifique en (kJ/kg).</p> |
|---|---|

Introduction

Avec une superficie de 2.381.741km², l'Algérie est le pays le plus vaste du côté de la méditerranée. Les études actuelles montrent que l'Algérie offre des potentialités intéressantes, à moyen et à long terme, pour investir dans de nombreux projets et de programmes qui contribuent au développement des énergies renouvelables, principalement l'énergie solaire [10].

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

Les lois physiques gouvernant les différentes filières solaires ont été établies il y a plus d'un siècle et demi. Mais l'histoire de l'énergie solaire a connu une accélération importante à la suite de la crise pétrolière de 1973.

Les progrès récents de la conversion thermique tiennent plus à la disponibilité de nouveaux matériaux performant (revêtement sélectifs, verre flotté ...) et des systèmes de pilotage par ordinateur qu'à l'apparition des nouveaux concepts[10].

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

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

De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été consacrées depuis un certain temps aux problèmes de l'utilisation de l'énergie solaire. Parmi ces études, celles qui concernent le chauffage

des habitations apparaissent comme les plus prometteuses, étant donné que les températures requises sont modérées.

En général, les systèmes de chauffage proposés sont compliqués et coûteux de fait de la préoccupation de leurs réalisateurs de les rendre complètement autonomes, c'est-à-dire de chauffer les maisons sans recours à une source auxiliaire d'énergie d'appoint durant les périodes d'insuffisance solaire. Ces systèmes se divisent en deux grandes catégories: les systèmes actifs et les systèmes passifs. Parmi ces derniers, celui qui a été développé en France, par le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) apparaît comme un des plus intéressants étant donné la simplicité de la solution proposée.

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 thermocirculation, 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 la chambre, mur capteur, vitrage, canal solaire,...) pendant la journée et la nuit.

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

- ✓ Chapitre 01: Généralité et étude bibliographique.
- ✓ Chapitre 02: Réalisation du projet.
- ✓ Chapitre 03: Instrumentation.
- ✓ Chapitre 04: Résultats et Discussions.
- ✓ Conclusion.

CHAPITRE 01:
GÉNÉRALITÉ ET ÉTUDE
BIBLIOGRAPHIE

1.1 Généralité:

1.1.1 L'énergie thermique solaire, c'est quoi ?

On peut définir l'expression «thermique solaire» un procédé de transformation de l'énergie solaire qui nous parvient sur terre par rayonnement électromagnétique en une forme thermique (chaleur).

L'idée d'utiliser la thermique solaire ne date pas d'aujourd'hui. La première description de cette source d'énergie a une origine lointaine. En Mésopotamie (l'Irak d'aujourd'hui), on a retrouvé des sculptures dans des récipients en métal précieux illustrant le procédé pour obtenir du feu au moyen de l'énergie solaire. Beaucoup plus tard, le savant arabe « Ibn Al Haitam » (965-1039) a décrit un procédé solaire de pyrolyse par miroir parabolique ou sphérique. Le dernier exemple, pour n'en citer que quelques-uns, date du siècle dernier. Le français De Liencourt construisit un système de pompage d'eau fonctionnant à l'énergie solaire à Saïda (Algérie).

L'énergie solaire n'est pas seulement la plus abondante des formes d'énergie mise à notre disposition, elle est aussi une source d'énergie inépuisable, plus ou moins équitablement répartie sur toute la surface du globe. Elle est indirectement la source de ces combustibles dits conventionnels emmagasinés dans le sous-sol, que la nature a mis des millions d'années à produire et qui s'épuisent de plus en plus [1].

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 glaciaire 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 rayonnement 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 de 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 est élevée et plus le niveau énergétique 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 [1].

1.1.3 Chauffage des Locaux:

L'utilisation de l'énergie solaire dans le domaine de l'habitat pour réduire sa consommation énergétique a fait l'objet de plusieurs études. Une technique de chauffage se basant sur un système de captation solaire, de stockage et de restitution de la chaleur a été développée au C.N.R.S (France) par le Professeur Trombe[3].



Photo 1-1: prototype de la maison avec mur Trombe du professeur Felix Trombe (1906-1986) à Odeillio, inventeur de ce procédé (photo 1976 de M.Gazeau) [2,4].

1.1.3.1 Systèmes de stockage passif

Si le système de chauffage nécessite des pièces mobiles (ventilateur, pompe, électrovane...) 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 [2].

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 [2] :

- 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[2].

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.

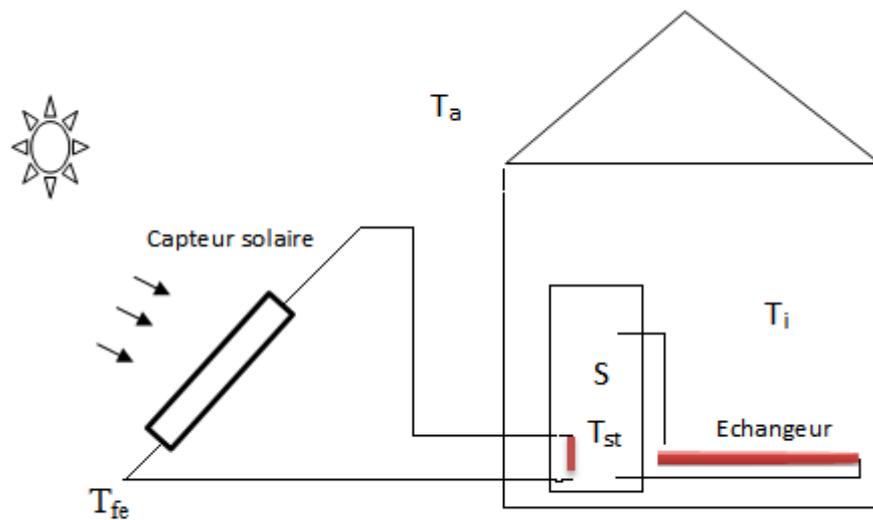


Figure 1.1:Schéma d'une installation de chauffage solaire à eau.

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

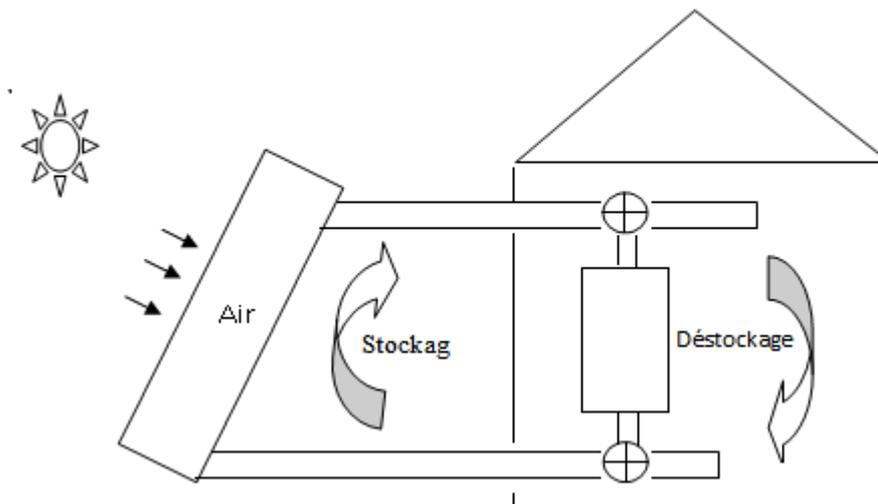


Figure 1.2 Schéma d'une Installation de chauffage à air. Pendant une journée ensoleillée, on chauffe la maison grâce à l'énergie apportée par les capteurs solaires. Si celle-ci est supérieure aux besoins du moment, le surplus est stocké. Durant la nuit l'énergie est déstockée pour maintenir la température 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 [2]:

- Les galets ne doivent pas être trop petits afin que la perméabilité du milieu n'entraîne pas des pertes de charge 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

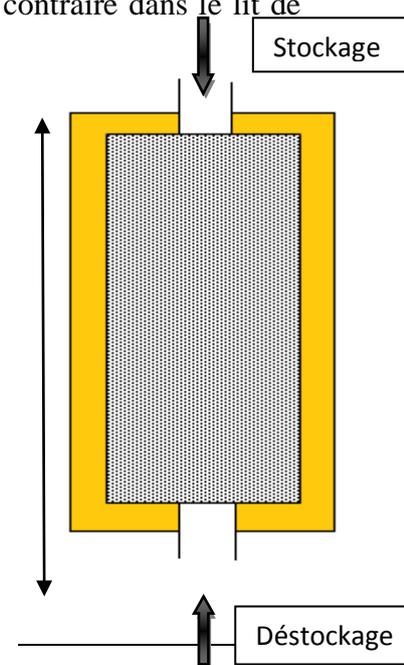


Fig 1.3 Schéma d'un lit de galets avec le sens d'écoulement de l'air en stockage et en déstockage

importante à cause des pertes de charge. Les grandeurs habituelles vont de 1 à 3 m.

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

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

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/m³.k), dont une expression expérimentale a pu être donnée par Lof et Hawley en 1948 :

$$h_v = 650 \left(\frac{\rho_f V}{S D_g} \right)^{0.7} \quad (1.1)$$

Avec : ρ_f 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)

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 (fig .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.

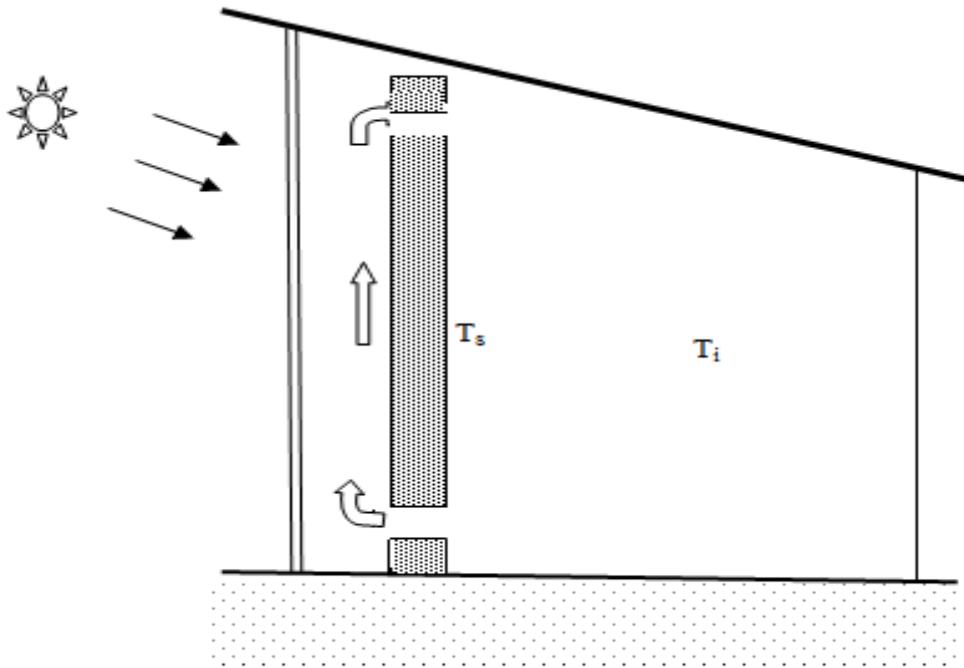


Figure 1.4-schéma simplifié d'un chauffage solaire passif à air utilisant un mur comme stockage thermique (mur capteur).

- T_s 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.

1.1.3.2 Maison Bioclimatique:

Une maison bioclimatique sous-entend une démarche respectueuse de l'environnement lors de sa construction, de son occupation mais aussi de sa déconstruction. On désigne cette démarche architecturale par l'expression Haute Qualité Environnementale (HQE). La future réglementation thermique, dénommée pour le moment RT2012, devant faire la part belle aux techniques bioclimatiques [2].

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

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

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

La réalisation d'une maison bioclimatique fait intervenir des techniques très anciennes et d'autres plus récents. On peut distinguer les techniques passives qui consistent à définir l'implantation, la forme du bâtiment, l'isolation et la nature des matériaux de construction, des techniques dynamiques qui font appel à une énergie extérieure (le plus souvent électronique) pour faire circuler les fluides [2].

a- Les techniques passives:

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

- Température de l'air ambiant T_a
- Température de l'eau du réseau T_0
- Humidité relative φ
- Pluviométrie : hauteurs d'eau mensuelles, écoulement des eaux de pluie
- Aérologie : force et direction des vents dominants
- Ensoleillement : éclairement G_h et durée d'insolation ddi , ainsi que les facteurs mensuels d'éclairement σ et d'irradiation e .

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

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

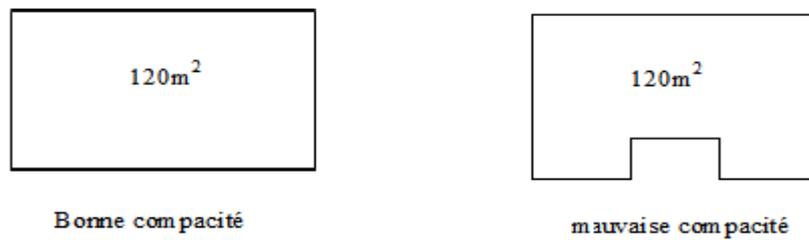


Figure 1.5-compacité d'une maison en fonction de sa forme, pour une même surface de plancher (120m^2) [2].

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

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

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

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

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

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

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

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

On peut aussi planter des arbres à feuilles caduques au sud : en hiver les rayons du soleil passent entre les branches nues alors qu'en été ils sont piégés par le feuillage.

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

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

Réaliser une isolation extérieure de l'habitation évite les ponts thermiques au droit des planchers. Cette technique est évidemment plus intéressante pour les immeubles à plusieurs étages. L'inconvénient est de présenter aux intempéries des matériaux qui sont souvent fragiles (polyuréthane, polystyrène, laine de roche...) et qui supportent mal les revêtements en ciment (crépi) [2].

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

La meilleure des solutions est sans conteste de chercher à diminuer les surfaces soumises au vent en accroissant la compacité du logement.

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

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

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

Des murs à forte capacité calorifique, par exemple en pierre ou en béton, créent une inertie thermique favorisant un meilleur confort thermique. La chaleur solaire accumulée pendant la journée est restituée durant la nuit [2].

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

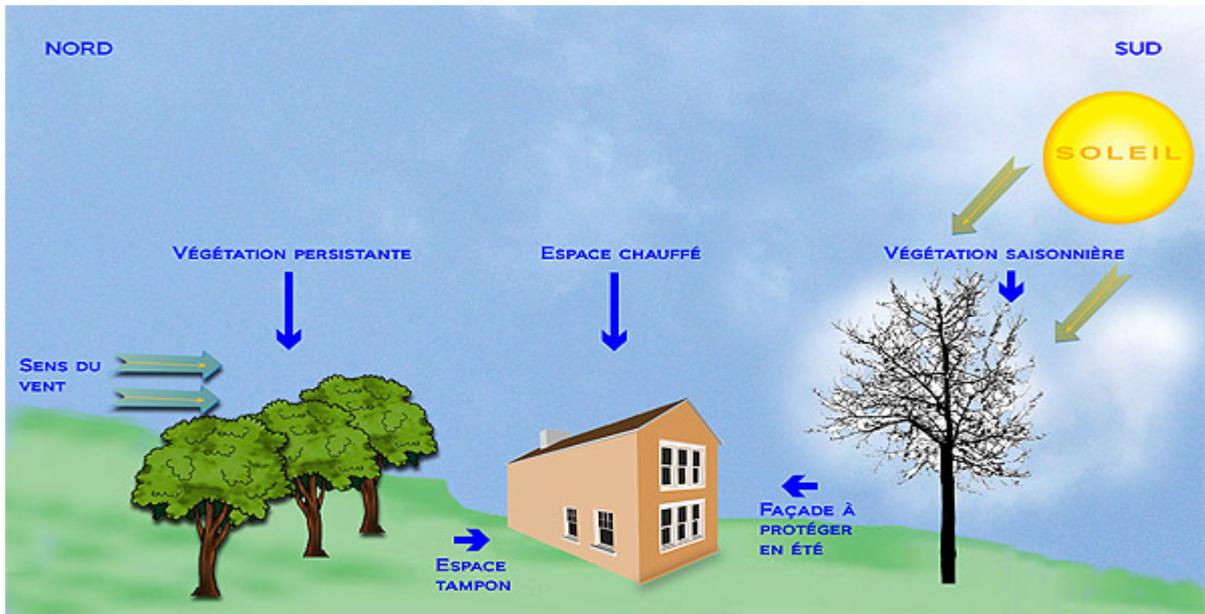


Figure 1.6-schéma d'une habitation bioclimatique.

b- Les techniques dynamiques:

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

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

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

$$Q_{\text{air}} = \rho_a V_a C_{\text{pa}} (T_i - T_a) \quad (1.2)$$

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

Une ventilation mécanique contrôlée (VMC) permet d'optimiser le débit d'air évacué. Si de plus celle-ci comporte un échangeur de chaleur entre l'air sortant et l'air entrant, on réalise une économie d'énergie non négligeable : c'est la VMC double flux.³ le seul souci de ce type d'installation est le risque de condensation au niveau de l'échangeur ; en effet l'air chaud est chargé en humidité et si sa température, en baissant au contact de l'air frais, atteint celle du point de rosée, il y a condensation d'une partie de la vapeur d'eau ; il faut alors évacuer cette eau pour éviter les phénomènes de corrosion et de prolifération de microorganismes.

Une autre source de fuites thermiques est constituée par les eaux ménagères (ou eau grise). Celles-ci, contrairement à l'air, n'ayant pas un débit continu, on peut concevoir la récupération des calories par un échangeur eaux ménagères/eau du réseau, situé dans un ballon de préchauffage [2].

1.1.3.3 Description du système de chauffage par mur TROMBE :

L'utilisation de l'énergie solaire dans le domaine de l'habitat pour réduire sa consommation énergétique a fait l'objet de plusieurs études. Une technique de chauffage se basant sur un système de captation solaire, de stockage et de restitution de la chaleur a été développée au C.N.R.S (France) par le Professeur Trombe[3].

Le mur trombe est un système de chauffage qui utilise l'énergie solaire. Il est constitué d'un mur sombre orienté plein sud auquel on vient coller un vitrage pour profiter de l'effet de serre. Le mur ne doit pas être isolé pour permettre une bonne conduction vers l'intérieur de l'habitation, il est préférentiellement en pierre ou en béton lourd pour profiter de l'inertie thermique de ces matériaux. C'est un mur capteur qui comporte dans sa partie basse et dans sa partie haute des orifices de communication entre l'espace de vie et la lame d'air comprise entre vitrage et surface réceptrice [4,6-17].

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

a-Fonctionnement de mur Trombe pendant le jour (période de chauffe:

Pendant la période d'ensoleillement de la façade ; les orifices ménagés dans le mur rendent possible la distribution de la chaleur par thermo circulation : l'air intérieur entre par les orifices du bas du mur, se réchauffe au contact de la paroi (qui peut être portée à 65°C). Ce faisant, il s'élève, et retourne dans le volume habitable par les orifices supérieurs [4].

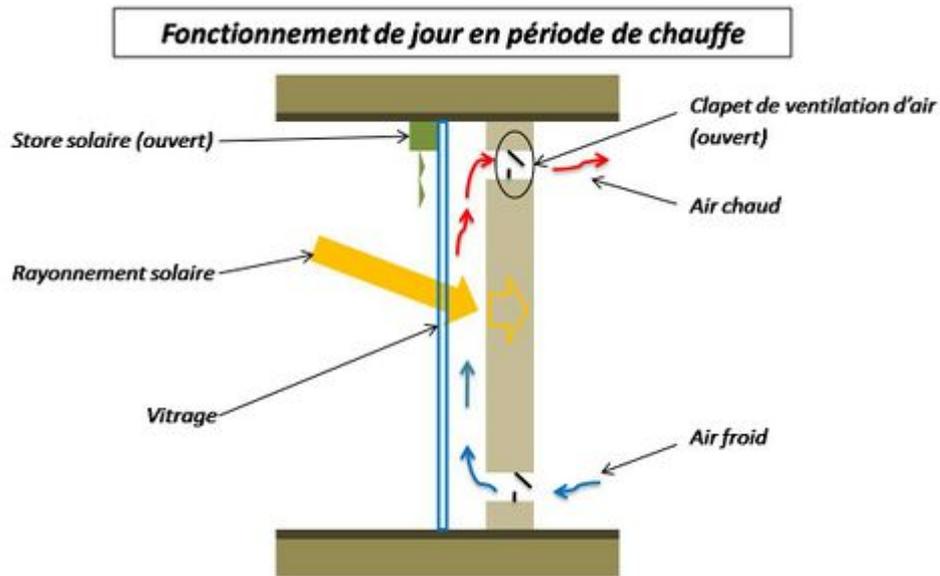


Figure1.7 fonctionnement de jour en période de chauffe.[4]

b-Fonctionnement de mur Trombe pendant la nuit:

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

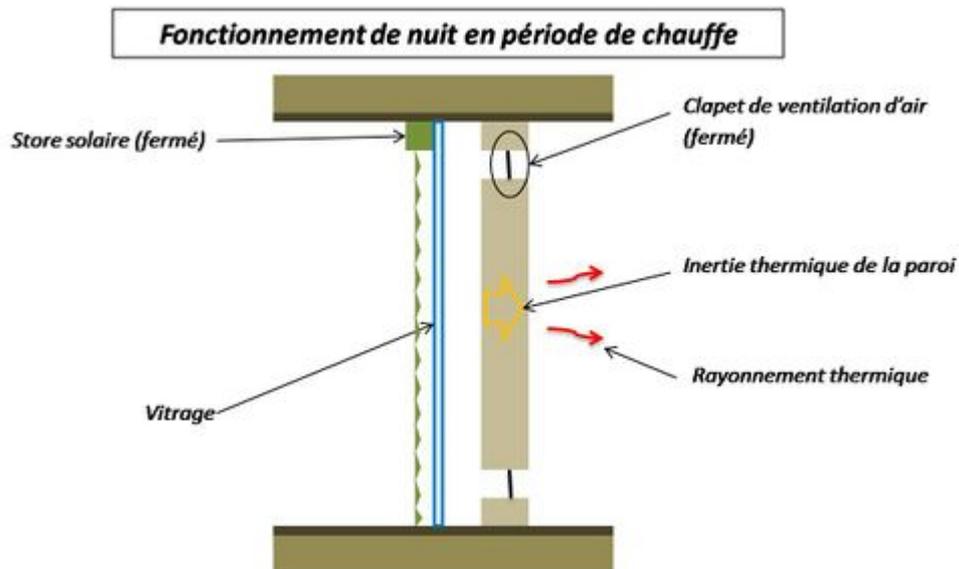


Figure1.8 fonctionnement de nuit en période de chauffe.[4]

Les études et les mesures effectuées sur les premières maisons expérimentales utilisant le mur trombe ont montré que l'énergie solaire utilisée fournissait de 70 % à 85 % des besoins de

chauffage sans aucune assistance mécanique. Aujourd'hui, avec des vitrages deux à trois fois plus performants, de tels résultats sont possibles sur des projets moins typés, avec des surfaces plus restreintes et plus variées. Pour une maison de 100m² au sol on peut espérer récupérer 175 kwh/(m².an) à Paris [4].

On ce qui concerne le fonctionnement durant l'hiver et l'été, la différence est que durant l'hiver le système est fermé et durant l'été est ouvert suivant la figure1.9 et la figure1.10.

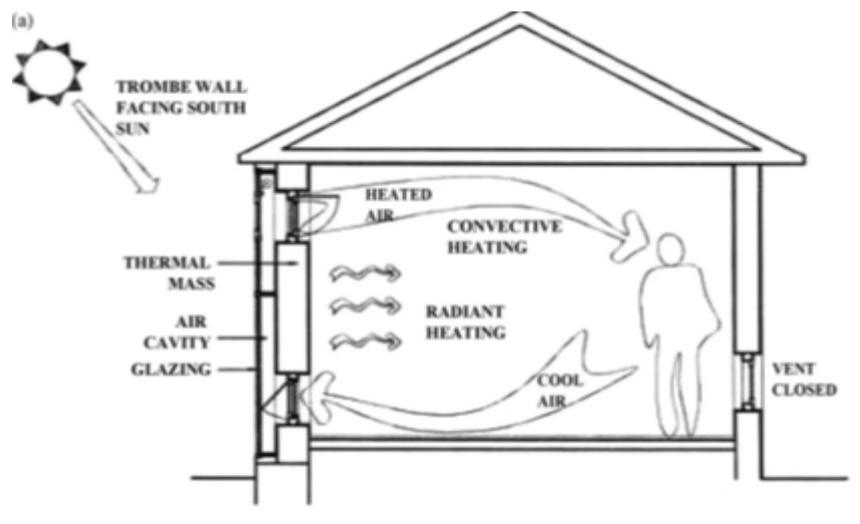


Figure1.9 Fonctionnement hiver

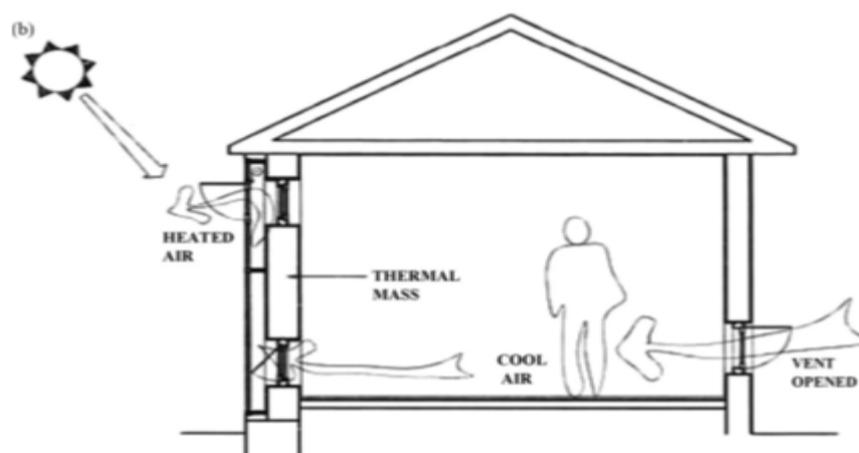


Figure1.10 Fonctionnement été

1.1.4 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 [14].

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 [14].

Le mur solaire composite (Fig. 1.13) 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.

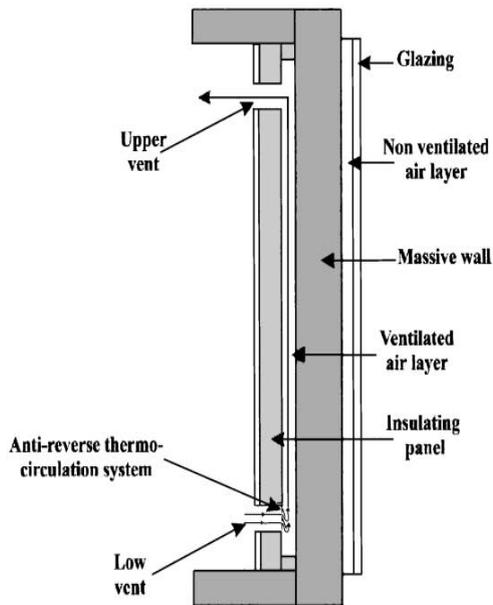


Figure 1.13 Le mur solaire composite

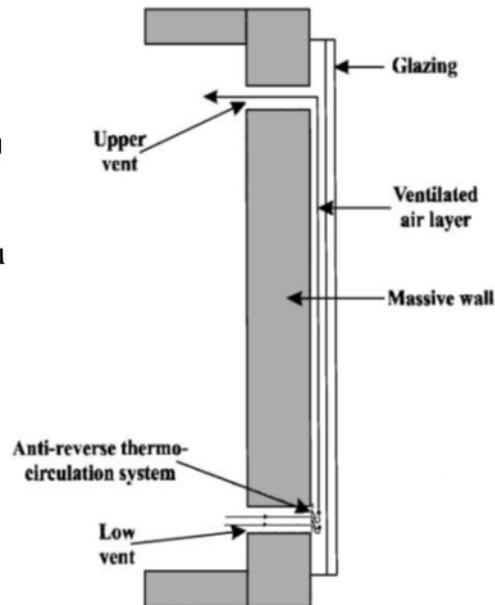


Figure 1.14 le mur trombe standard

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.1.14, 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.1.15). 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.1.16) 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.

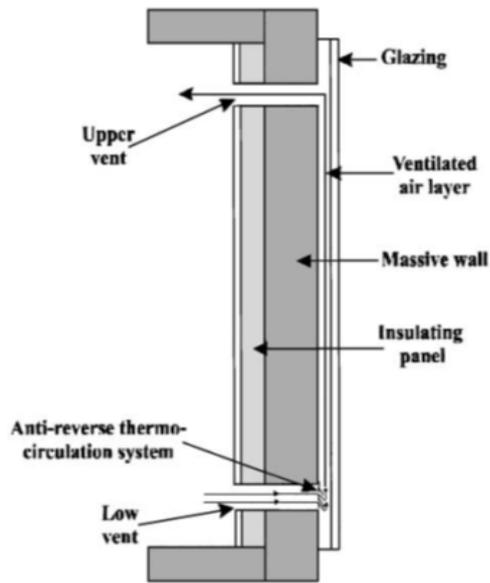


Figure 1.15 mur trombe avec une couche d'isolant sur le dos.

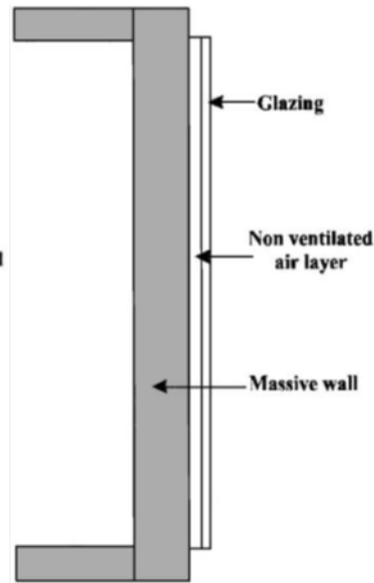


Figure 1.16 Le mur capteur

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 [14].

1.1.5 Confort thermique:

L'amélioration du confort thermique qui constitue l'objectif principal de la réhabilitation thermique, consiste à mettre en évidence le comportement thermique d'une habitation au cours du temps, et ce à partir de la prédiction des températures ambiantes intérieures.

Toutefois, la maîtrise des phénomènes d'ambiance dans l'étude du confort thermique fait appel aux informations relatives à la conception globale du bâtiment, à l'isolation thermique et enfin l'inertie thermique.

Bien entendu, chaque site à ses spécificités climatiques qu'il faut exploiter, ainsi il existe une approche de réhabilitation thermique appropriée pour chaque type de climat.

1.1.5.1 Evaluation du confort thermique:

L'évaluation du confort thermique fait généralement recours à l'étude thermique qui permet de définir les conditions d'ambiances acceptables et de quantités d'énergie à fournir pour les équipements d'ambiance, et ce dans l'objectif de donner des recommandations les plus adaptées dans le domaine de l'habitat [5].

Les principaux indicateurs pour l'évaluation du confort thermique se résument comme suit :

1.1.5.1.1 Température résultante (opérative), T_r

Le calcul de la température résultante, présente un indice de confort intégrant l'effet de la convection et du rayonnement pour des vitesses de l'air peu élevées (<0.2m/s) [5] :

$$\text{Et d'après, A. MISSENARD [4]} T_{ri} = \frac{T_{ai} + T_{rmi}}{2} \quad (1.3)$$

$$T_{rm} = \frac{\sum_i S_i T_{ip}}{S_i} \quad (1.4)$$

Avec,

T_{ai} : température de l'air (°C) ;

T_{rmi} : Température radiante moyenne émise par l'environnement intérieure (°C) .

T_{ip} : Température intérieure de chaque paroi d'un local, de surface S , mesurée en (°C).

1.1.5.1.2 La zone de confort:

La zone de confort est une zone où les conditions sont confortables pour l'homme. Ainsi, les paramètres permettant de la déterminer sont les suivants [5] :

- Température de l'air T_a (°C) ;
- Température radiante moyenne des parois T_{rm} (°C) ;
- Humidité de l'air H_r (%) ;
- Vitesse de l'air V_a (m/s).

1.1.5.1.3 Différents facteurs agissant sur le confort thermique:

1.1.5.1.3.1 L'orientation:

B. Givoni, place le concept de l'orientation au centre des éléments influant sur les ambiances intérieures d'un bâtiment. Il définit, l'orientation d'un bâtiment par la direction vers laquelle sont tournées ces façades. Ce facteur est soumis à de nombreuses considérations, telles que la vue, les déperditions possibles, l'aération et la nature du climat. En effet, l'orientation des bâtiments détecte la qualité de l'habitat en affectant son ambiance intérieure de deux manières et ce par la régulation de deux facteurs climatiques distincts :

- Le rayonnement solaire et ses effets d'échauffement sur les murs et pièces orientés selon différentes directions ;
- La ventilation en rapport avec la direction des vents dominants et l'orientation de la construction.

Ainsi, les différentes orientations des façades d'un bâtiment se présentent comme suit [5]:

- L'orientation sud est généralement génératrice de chaleur et de lumière, les espaces orientés vers cette direction seront les pièces de vie consacrées aux activités de jour, comme le salon, salle à manger, cuisine et bureau. Ces pièces doivent posséder de grandes ouvertures vitrées pour mieux capter le rayonnement solaire. Toutefois une attention particulière devra être portée quant aux apports solaires. Ainsi, l'intégration de protection solaire est indispensable.
- Les pièces peu utilisées et à faible température sont à placer de préférence côté Nord de l'habitat, il s'agit de zones tampons. Elles sont moins utilisées, mais jouent un rôle protecteur vis-à-vis du froid. La mise en place de ces zones permet de réduire jusqu'à 30 % la déperdition thermique totale. La salle de bain, le garage, la buanderie, les escaliers, le cellier, les couloirs, etc. constituent des zones tampons idéales.
- A l'est et au sud-est, les chambres profitent du soleil levant, source d'éblouissement lumineux.
- A l'ouest et au sud-ouest, ces pièces bénéficient du soleil couchant, mais elles subissent des surchauffes difficiles à contrôler en fin de journée.

Dans la réhabilitation thermique, lorsque cela est possible, un réaménagement ou redistribution des activités et espaces intérieurs de manière à ce qu'ils correspondent au mieux à une stratégie d'architecture qui tient compte du lieu d'implantation ; ainsi, les espaces intérieurs seront réorganisés en fonction de l'usage, de manière à ce que l'ambiance thermique corresponde aux activités et aux heures d'utilisation.

1.1.5.1.3.2 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 [5].

1.1.5.1.3.3 Dimension des 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 quant aux dimensions de ces ouvertures est recommandée selon l'orientation et la conception. En effet :

- Les vitres verticales orientées au sud présentent le double avantage d'être très bien exposées au soleil d'hiver, et faciles à protéger du soleil d'été.
- Pour les vitres orientées à l'Est ou à l'Ouest, il n'est pas souhaitable de leur donner de grandes dimensions au seul plan d'énergie solaire, car elles reçoivent très peu d'énergie solaire en hiver. Il faut aussi éviter de surdimensionner les fenêtres orientées ouest pour risque de surchauffe. On ne dimensionne les ouvertures Est et ouest qu'en fonction de la vue et de l'éclairage. En été, elles sont, par contre, largement exposées (le matin pour les fenêtres Est, l'après-midi pour les fenêtres ouest). La température extérieure étant plus élevée l'après-midi, les ouvertures ouest produisent des surchauffes plus difficiles à éliminer.

Les ouvertures vitrées orientées au nord, sont celles qui reçoivent le moins d'énergie solaire, car, c'est souvent du nord que viennent les vents les plus froids, donc ses ouvertures doivent être réduites. Mais à cause du problème de surconsommation en éclairage artificiel il faut éviter de trop réduire ces ouvertures.

1.1.5.1.3.4 La forme et compacité:

Une habitation confortable ne peut être que de forme simple et compacte. Toutefois, la forme du bâtiment influe sur :

- Le bilan global de l'éclairement énergétique du soleil
- Le taux de déperditions thermiques.
- L'écoulement des flux aux abords des bâtiments.

Ainsi, selon (V. Olygay (1963)), la forme optimale d'un bâtiment correspond à celle qui permet de perdre un minimum de chaleur en hiver et d'en gagner un minimum en été. Il précise que :

- La forme allongée dans la direction est-ouest, donne de meilleurs résultats pour tous les climats.
- Par contre le carré, n'est pas optimale quelle que soit la localisation de la construction.
- Et toutes les formes allongées dans la direction nord-sud sont encore moins efficaces que la forme carrée.

1.1.5.1.3.5 La couleur:

Du point de vue thermique, la teinte des couleurs influence fréquemment le comportement thermique des murs extérieurs par conséquent, sur le rendement énergétique de l'habitat. Des essais poussés ont montré que les températures superficielles dues à l'action directe des rayons du soleil varient fortement en fonction de la couleur. Par conséquent, il faut un choix judicieux des matériaux et de leur couleur au moment de la construction ou de la réhabilitation thermique [5].

Des couleurs différentes absorbent des quantités variables de lumière naturelle. Ainsi, dans le (Tableau 1.1), il sera donné les coefficients d'absorption selon leurs catégories.

Tableau1.1 : Facteur d'absorption en fonction de la couleur (Source : J.L. Izard, 1993)

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

1.1.5.1.3.6 Protection solaire et vent dominant:

Les dispositifs de protections solaires ont pour but de minimiser la surchauffe et de contrôler l'éblouissement lumineux. Ils peuvent, soit s'intégrer structurellement à l'architecture par des (porches, vérandas, brise-soleil, débord de toiture), ou s'appliquer à l'enveloppe (stores,

peirciennes, volets). Ils peuvent également être fixes ou mobiles, intérieures ou extérieures, verticales ou horizontales. Les protections solaires peuvent être aussi, liées à l'environnement, autant naturel ou construit, comme la végétation, le relief ou même des masques provoqués par des bâtiments voisins.

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

-La façade sud est celle qui capte plus de rayons solaires dans l'année. Cette façade perçoit le rayonnement solaire lorsque le soleil est le plus haut dans le ciel. Une protection contre le soleil est toutefois recommandée. Seulement et paradoxalement, cette façade n'est pas celle qui capte le plus de rayons en été, car les rayons étant moins inclinés, l'absorption est donc moindre que sur les façades Est et ouest, c'est également cette particularité qui fera de la façade sud la plus aisée à protéger.

-Les façades orientées au nord, sont celles qui reçoivent le moins d'énergie solaire, car, c'est souvent du Nord que viennent les vents les plus froids. Ainsi, pour cette orientation, les protections solaires horizontales sont les plus efficaces, notamment celles intégrées à l'architecture, telles que les auvents, les débords de toiture, les retraits, les pergolas, etc.

1.1.5.1.3.7 Isolation thermique:

Pour avoir un confort thermique, une isolation thermique est plus que nécessaire.

En hiver, l'isolation donne une bonne sensation de confort tout en limitant sa note de chauffage.

En été, le confort sera obtenu en associant les atouts de cette isolation à une forte inertie thermique de la maison ainsi la température intérieure sera maintenue stable et la plus fraîche possible sans recours à la climatisation.

En effet, d'après (P. de Haut (2007)), une maison chauffée perd continuellement une partie de sa chaleur. Les grosses fuites de chaleur s'effectuent par les surfaces : toiture, murs et vitrages. Ces points sensibles d'une habitation peuvent générer jusqu'à 60 % des déperditions en chaleur, les joints entre les parois laissent également fuir la chaleur appelée « ponts thermiques ». Ces derniers peuvent participer de 5 à 25 % à la fuite de chaleur.

Les déperditions thermiques peuvent être surfaciques par transmission à travers les parois opaques et vitrages, linéiques à travers tous les angles de l'habitat et ponts thermiques ou encore des déperditions par renouvellement d'air.

1.1.5.1.3.8 Les caractéristiques principales de l'isolation thermique:

Dans le traitement de problème thermique et énergétique du bâtiment en rapport avec les matériaux isolants, deux principaux paramètres thermo-physiques interviennent :

a-La conductivité thermique (λ)

Il s'agit d'une donnée intrinsèque à chaque matériau, qui caractérise uniquement ses performances isolantes. Le coefficient de conductivité thermique (λ) d'un matériau caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction. Ainsi, plus λ est grand, plus le matériau est conducteur de chaleur ; et plus λ est petit, plus le matériau est isolant thermiquement [5].

b- La résistance thermique($R=1/K$) ou coefficient de conductance (K)

La résistance thermique est le rapport de l'épaisseur d'un matériau à sa conductivité thermique (e/λ). Elle s'exprime en mètre carré et en degré Celsius par watts (m^2C/W). Plus R est élevée, meilleure est la performance d'isolation, ce qui diminue les déperditions en hiver et les apports thermiques en été (transfert de chaleur par les parois et vitrages) [18].

Dans un mur constitué de plusieurs couches de matériaux d'épaisseur thermique différente, la relation donnant la relation de résistance thermique se présente comme suit :

$$\frac{1}{Ki} = \sum_{i=1}^n \frac{e}{\lambda i} + \frac{1}{hi} + \frac{1}{he} \quad (1.5)$$

Où :

$1/h_e + 1/h_i$: Somme des coefficients d'échanges superficiels interne et externe en (m^2C/W) ; R_i

$=1/K_i$: Somme des résistances thermiques en (m^2C/W).

* En régime permanent, les coefficients d'échanges superficiels prennent des valeurs conventionnelles selon la position de la paroi. Ce qui n'est pas le cas pour le régime transitoire où ces coefficients tiennent compte des paramètres de facteurs de forme du à l'interaction entre toutes les surfaces internes à l'habitat avec un échange par rayonnement infrarouge et de leurs émissivités. Ils dépendent aussi des émissivités et d'absorptivités de la voûte céleste et du sol par rapport à la surface externe.

1.1.5.1.3.9 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 :

$$Q = \sum_i K_i S_i T_i \quad (1.6)$$

Où :

K_i : coefficient de transmission surfacique en (W/m²°C) ;

S : surface intérieure de la paroi en (m²) ;

$T = (T_i - T_a)$: 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 :

$$Q_l = \sum_i k_i L_i T_i \quad (1.7)$$

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 pris en compte. Ainsi les déperditions par renouvellement d'air s'expriment comme suit [19] :

$$Q_r = \sum 0.34 q_e T_i \quad (1.8)$$

Où

$$q_e = q_i + q_v \quad (1.9)$$

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

$$q_i = \sum m A_m e_m + \sum f \cdot l_f \cdot e_i \quad (1.10)$$

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].

1.1.5.1.4 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

a) 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.

b) Isolation de l'extérieur

L'isolation de l'extérieur est la plus intéressante, puisqu'elle présente des avantages multiples et importants [5] :

- 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 [20].

1.1.5.1.5 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 [22].

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 [22].

1.1.4.1.5.1 Les principales caractéristiques de l'inertie thermique sont :

a) La diffusivité thermique:

La diffusivité thermique "a" exprime la vitesse à laquelle la chaleur se propage, par conduction, dans un corps. Plus la diffusivité est grande, plus le matériau s'échauffe ou se refroidit rapidement. Tandis que, plus elle est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. Elle s'exprime selon l'équation suivante [5] :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (1.11)$$

Ou :

a: Diffusivité en (m²/s) ;

λ : Conductivité thermique en (W/mC) ;

ρ : Masse volumique en (Kg/m³) ;

C : Chaleur spécifique en (kJ/kg).

b) L'effusivité thermique:

L'effusivité thermique "b" exprime l'aptitude de la surface d'un matériau à stocker ou restituer de la chaleur. Elle caractérise, donc, la capacité des matériaux à réagir plus ou moins rapidement à un apport de chaleur au logement. Elle croît avec la conductivité et la capacité thermique. Elle s'exprime en ((W/°Cm²)^{1/2}) et donnée par la formule suivante:

$$b = \lambda \cdot \rho \cdot C \quad \sqrt{\quad} \quad (1.11)$$

En général, pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois d'enveloppe devront présenter une faible diffusivité et une forte effusivité.

* Dans le contexte de la démarche bioclimatique, une inertie très lourde, associée à une bonne gestion des apports solaires (captage l'hiver et protection l'été) devient un critère décisif de la construction, notamment pour le confort d'été, qu'il s'agisse des températures maximales atteintes ou des variations de températures jour/nuit [21]

1.2 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 [8].

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) [6], 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 maison analogues ont été construites, dont l'un 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 thermocirculation. 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) [7]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 thermocirculation). Deux approches théoriques pour quantifier le flux de chaleur échangé par thermocirculation ont été proposées, les résultats obtenus ont permis de recommander celle qui se rapproche avec les résultats expérimentaux présentés par la littérature.

Jibao Shen et all (2005)[8]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 Jibao Shen 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) [9]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.

Arvind Chel et all (2007)[11]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: 268140N) 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 de 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 réalisée 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 3312 kWh / an et une réduction associée de CO₂ (33 tonnes / an) en utilisant un mur Trombe. En outre, le réaménagement de bâtiment est économiquement viable comme la période de récupération est seulement d'environ 7 mois.

M.K. Cherier et all (2008) [12] 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) [13] 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 fluxmétrique ou enthalpique.

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 de stockage

L. Zalewski et al (2010) [14] 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 murs solaires, suivies par une description de l'installation expérimentale, les mesures et l'étude des différents modes de transfert thermique nécessaires 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 la période d'été. Les résultats de cette étude sont fondamentaux pour aider les architectes ou chefs de projets à choisir la configuration la mieux adaptée pour chaque type de bâtiment.

Basak Kundakci Koyunbaba (2011) ;[15] 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 Abbassi et al (2014) [16] 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) de Borj Cedria. 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 [17] 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.

CHAPITRE2

RÉALISATION DU PROJET

-



2.1 Introduction:

Une première étude expérimentale menée sur un prototype, à échelle réduite, d'un mur solaire TROMBE classique à l'université saad dahleb Blida, une chambre à échelle réduite bien isolé a été construite au sud du pavillon de génie mécanique. La chambre contient un mur sombre de béton, orienté plein sud auquel on vient coller un double vitrage, et les autres parois construites avec des panneaux de bois et polystyrène comme suit :

On va étudier les performances thermiques de mur TROMBE pour le site de Blida telle que la présence ou non de thermocirculation, et la circulation naturelle et forcée de l'air dans le canal solaire du système, et on va étudier la variation des températures aux différents points de système (l'intérieur de la chambre, mur capteur, vitrage, canal solaire,...) pendant la journée et la nuit.

2.2 Schéma de projet:

Nous avons dessiné le schéma de projet par le logiciel solid works, le schéma avec les dimensions est représenté par la figure suivant:

2.3 les étapes de Réalisation:

Dans cette étape j'ai pratiqué beaucoup de cours que j'ai pris pendant ces années dans la faculté de génie mécanique, où j'ai utilisé plusieurs ateliers pour réaliser ce projet (Atelier de soudage et Atelier de fabrication mécanique et Atelier de Thermo dynamique),et aussi l'atelier privé de menuiserie de bois , tout ça m'a donnée une bonne expérience sur le terrain , et on va présenter les étapes de réalisation comme suit :

2.3.1 Etape de soudage de structure métallique:



Photo2-2:soudage des plaques



Photo2-1: Plaques métallique

- On a découpé une tôle d'épaisseur de 4mm en 5 plaques de 8×100cm (Photo3-1).
- On a soudé 4 plaques sous forme carré voir (Photo3-2).
- La Photo3-3 représente la machine de découpage des tôles(Guillotine).



Photo3-3 Guillotine



Photo3-4 tronçonneuse

- On a découpé les corniers qui forment la structure et les limites intérieures de la chambre.
- La Photo3-4 représente la machine de découpage des corniers (tronçonneuse).
- Pour assembler les parois avec la structure métallique il faut percer les corniers et les plaques avant le soudage voir Photo3-5.
- On a soudé les corniers avec la plaque et on a placé les roues (voir photo3-6)



Photo3-6: Structure métallique Photo3-5: perçusse

2.3.2 Atelier de menuiserie de bois:



Photo3-7: plaque de contreplaqué Photo3-8: La presse de menuiserie

- On a découpé les contreplaqués de différentes mesures pour garantir une bonne isolation thermique :

- La plate-forme 1m×1m
- La toiture 1.22m ×1.16m
- Panneau Est et panneau West 1.08m×1.28m
- Panneau Nord, face intérieure 1m×1m et la face extérieure 1.1m×1.3m.

Chaque coté nécessite 2 plaques de contre plaqués de même mesure, pour la protection du polystyrène de 10 cm qui se trouve entre les deux.

- On colle (par une colle de bois) les deux plaques de contre-plaqué et le panneau de polystyrène à l'aide d'une machine de presse, cette opération dure plus de 12 heures pour un collage selon les normes voir les photos 3-7 et 3-8.



Photo 3-9: Panneau contreplaqué+ polystyrène Photo3-10: Parois de la chambre

A la fin de cette étape on a obtenu les cinq parois de la chambre voir photo3-9 et 3-10

2.3.3 Etape montage des parois:

On a placé les panneaux (parois) sur la structure métallique à l'aide de morceaux de tiges filtré, des écrous et des rondelles.

On met la silicone entre les parois elles-mêmes et entre les parois et la structure pour éviter les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur (voir photo3-11 et 3-12)



Photo3-11: Isolation des rondelles



photo3-12: montage des parois

A la fin de cette étape on arrive à la structure finale de la 1^{er} partie de la chambre (partie mobile) voir photo3-13.



Photo3-13: vue intérieur de la chambre

2.3.4 Préparation de matériau lourd (Mur on béton armé):

2.3.4.1 compositions de béton:

1 sac de ciment,gravier, sable et l'eau



Photo3-14: moule de mur Photo3-15:comble le moule par le béton

- On prépare un moule en bois (1.08m×1.18) pour réaliser notre mur
- On place 2 tubes PVC de diamètre 0.125m pour obtenir les 2 orifices supérieurs et inférieurs
- On place un grillage de trie à souder
- On place les thermocouples sur le grillage comme il est présenté dans la photo3-14
- On remplit le moule en béton voir la photo 3-15
- Il faut laisser le béton dans le moule une semaine pour bien sécher.

2.3.4.2 Etape de peinture du mur:

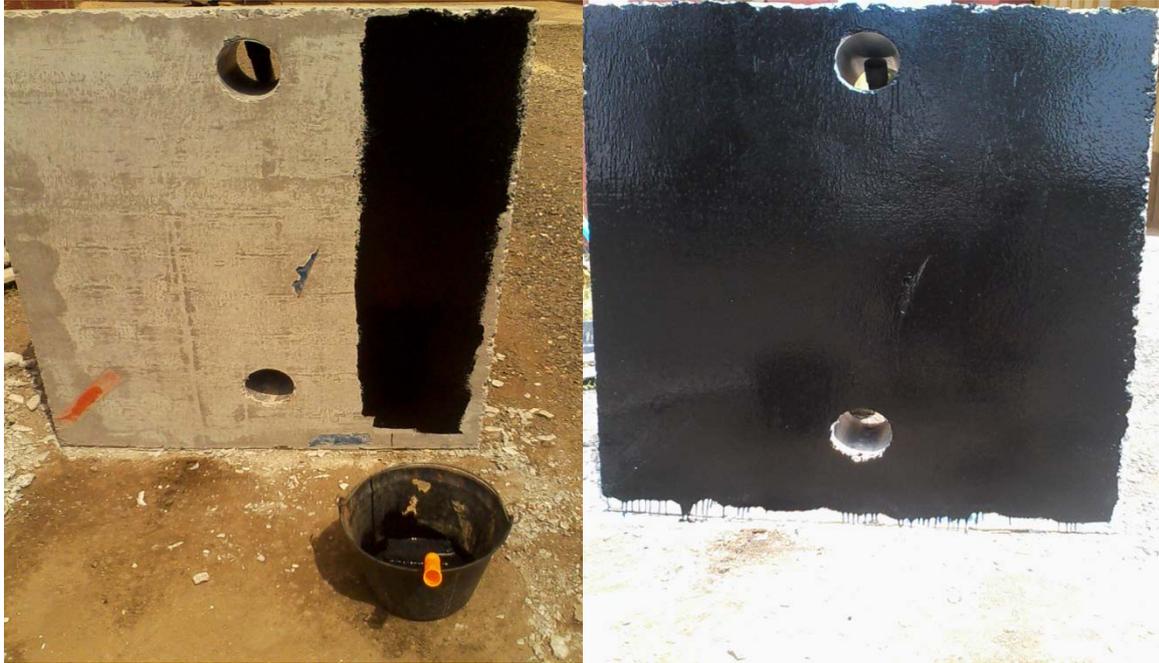


Photo 3.16: Mur de béton

Photo 3.17:peinture de mur

Après une semaine, on met le mur dans une position verticale puis on le peint avec une peinture noir mat (voir les photos 3.16 et 3.17)

2.3.5 Etape préparation de vitrage:



Photo 3.18:cadre en bois+ double vitrage.



Photo 3.19:assemblage le cadre et le mur

On place le double vitrage sur un cadre en bois (voir photo 3.18), avec les caractéristiques physiques suivantes:

- le double vitrage (1.02m × 1.02m).
- cadre en bois (1m×1m, prof 0.05m).
- l'air entre les deux plaques de verre est de 06mm.

On assemble le cadre et le double vitrage avec le mur de béton (voir photo 3.19), ceci est la 2^{ème} partie de la chambre (partie fixe)

2.3.6-Etape Assemblage le mur vitré avec la pièce à chauffé :



Photo 3.20: photo réel du chambre.

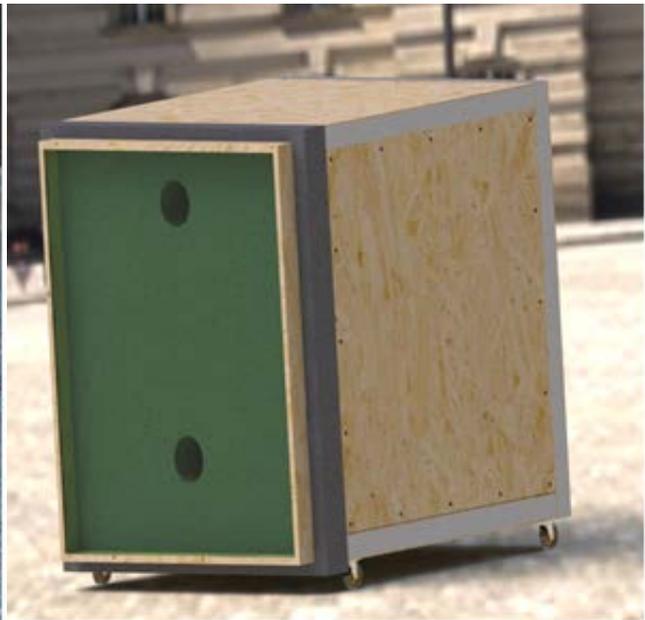


Photo3.21: photo du chambre par solid works.

A la fin on assemble les deux parties de la chambre (partie mobile et partie fixe) voir photo3.20.

2.3.7 Isolation thermique de la chambre :

a _ polystyrène

b _ la mousse polyuréthane pour boucher les différents joints (fissure).



Photo3.22: isolation par mousse polyuréthane.



Photo3.23: isolation par silicone.

d- le bois le cadre qui porte le vitrage et le contreplaqué qui protégé le polystyrène (épaisseur de 0.007 m)

e- le double vitrage (épaisseur = $0.004 \text{ m} \times 2$, épaisseur de lame d'air = 0.006m)

Chapitre 3

Instrumentation

3.1 Introduction:

après avoir réalisé le projet. Nous avons testé le prototype réalisé au département de Génie Mécanique université de Blida. Telle que les dimensions de la chambre ont été choisies de $1 m^3$ de volume et $1 m^2$ de surface de captation (mur en béton) et le diamètre de chaque orifice est de 0.125 m et la distance entre le vitrage intérieure et le mur est de 0.05m.

On a placé les 14 thermocouples aux différents niveaux de mur, la chambre et le vitrage pour mesurer ces températures. Ainsi un pyranomètre pour mesurer les rayonnements solaires incidents sur le vitrage. D'après ces différents paramètres physiques à mesurer il a été nécessaire d'utiliser plusieurs appareils et instruments.

3.2 les instruments de mesure:

3.2.1 Mesure du rayonnement solaire global:

Cette mesure a été faites à l'aide d'un pyranomètre model CM 6B N° 973313 .qui est place sur une surface verticale proportionnel avec le vitrage du mur (voir photo3.1), le pyranomètre est relié à une carte d'acquisition de données de vingt voies, branchée sur un micro-ordinateur qui a enregistré les mesures d'après un programme FLUK.



photo3-1 Pyranomètre

3-2-2 Mesure des températures:

Les températures ont été mesurées à l'aide de thermocouples de type K et type T. ces thermocouples ont été reliés à une carte d'acquisition de données (comme le pyranomètre) voir photo3-2, on a utilisé quatorze thermocouples sélectionnés, après un étalonnage des thermocouples au laboratoire de transfert thermique de département de Génie mécanique.

L'enregistrement des différentes températures se faisait automatiquement sur le micro-ordinateur, on même temps on pouvait lire directement sur l'écran de notre micro-ordinateur la valeur correspondante à chaque point de mesure.

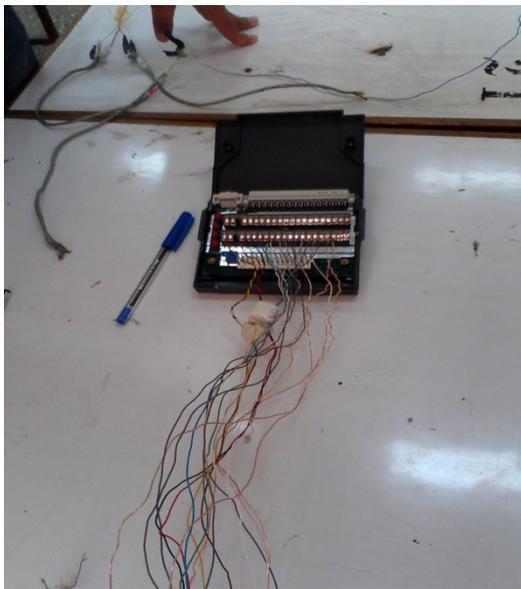


Photo3-2 la carte d'acquisition



Photo3-3 une partie d'étalonnage

3-2-3 Mesure de l'écoulement de l'air:

Pour connaître le débit d'air qui s'écoule dans la serre, il faut mesurer la vitesse de sortie de l'air par anémomètre à fil chaud qui peut mesurer des vitesses d'écoulement comprises entre 0.015 m/s et 30 m/s, malheureusement Nous ne pouvions pas obtenir cette instrument, c'est-à-dire Nous ne pouvions pas calculer la vitesse de l'air en convection naturel; mais on a une relation utilisée dans le programme TRNSYS pour calculer le débit s'écoulant entre le mur et la vitre interne, et qui est dérivée par Utzinger basée sur les résultats expérimentaux du C.N.R.S, est donnée par:

$$m = \rho A d (2 g H (T_f - T_i) / C T_f)^{1/2} \quad (3.1)$$

ou: $C = C1 (Ad/Av)^2 + C2$

$$Tf = (Ti + To)/2$$

$C1 = 8$ et $C2 = 2$

Pour la convection forcée on a utilisé une appareil multi mesures pour mesurer la vitesse de l'air sortie

3-3 installation des instruments et des appareils:

3 3-1 répartitions des thermocouples sur le système

Nous avons utilisé 14 thermocouples, répartis dans les voies de la carte d'acquisition (de N° 06 à N°19) comme le montre le tableau ci-après:

Tableau3.3: l'emplacement des thermocouples dans les voies

| N de voie | Zone de Thermocouple |
|-----------|--|
| 01 | Rayonnement globale (surface vertical) |
| 06 | Température entrée |
| 07 | Température sortie |
| 08 | Température intérieur de la chambre |
| 09 | Température mur centre extérieur |
| 10 | Température mur centre, centre |
| 11 | Température mur centre intérieur |
| 12 | Température mur centre, centre inferieur |
| 13 | Température mur centre, centre supérieur |
| 14 | Température mur centre, centre ouest |
| 15 | Température mur centre, centre est |
| 16 | Température extérieure supérieure |
| 17 | Température ambiante |
| 18 | Température de vitrage extérieur |
| 19 | Température de vitrage intérieur |

3.3.2 La distribution des Thermocouples dans le mur:

On a choisit la distribution des thermocouples suivant la hauteur et suivant l'épaisseur pour voir la variation de température suivant les deux sens x et y de mur.

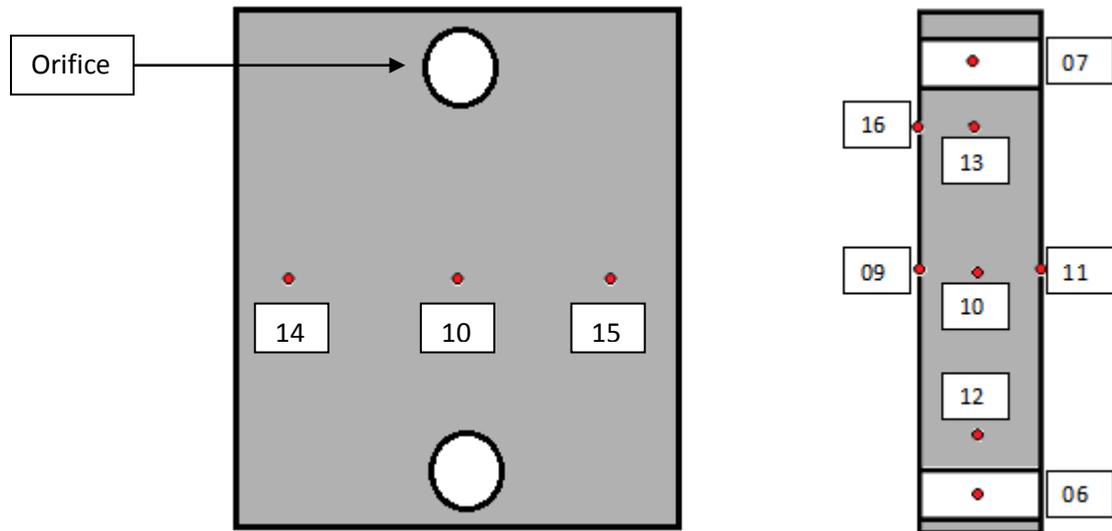


Figure3.1: Schéma de la distribution des Thermocouples dans le mur.

3-3-3 La carte d'acquisition de données:

Le but principal de la carte d'acquisition de données est de recevoir les différences de potentiels générés par les thermocouples, et de les transmettre à l'ordinateur pour une analyse qui résulte en une lecture des températures (voir photo3-4 à 3-6).



Photo 3-4 l'acquisition des données relie avec le microordinateur



Photo 3-5 Acquisition de données

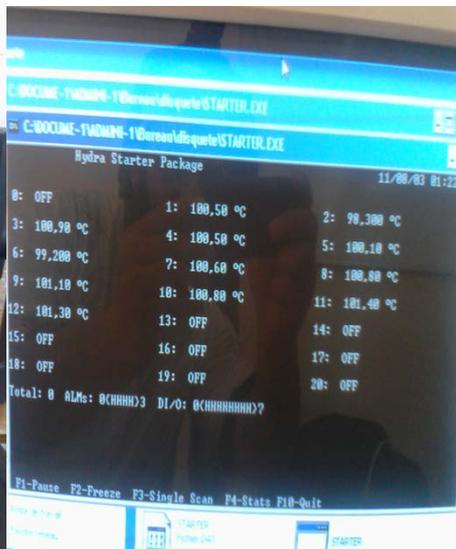


Photo3-6 enregistrement des mesures

3-3-4 Ventilateur pour la convection forcée:

Pour étudier la convection forcée, on a ajouté un petit ventilateur au niveau de l'orifice inférieur comme on peut contrôler la vitesse du ventilateur par un variateur de tension (voir photo 3-7 et 3-8).



Photo 3-7: Emplacement de ventilateur



Photo3-8: variateur de tentions

Pour éviter l'excès de chaleur (la surchauffe). on ajouté un tube PVC de diamètre de 0,125 m et sa longueur est égale à la longueur de la chambre, placé au niveau de l'orifice supérieur et on a percé des trous au niveau des deux côtés de tube pour distribuer l'air chaud de façon régulière dans tous les points de la chambre. Mais l'utilisation principale de ce tube est de se débarrasser de l'excès de chaleur, sachant que le tube termine dans un orifice à la paroi sud, s'ouvre et ferme manuellement ou automatiquement lorsque la température dépasse la zone de confort thermique (voir photo 3-9 et 3-10).



Photo3-9: Canal de distribution
de l'air chaude



Photo3-10: ouverture pour
la surchauffe

3.4 Mesure de la température ambiante:

Pour mesuré la température ambiante, on a placé le thermocouple T17 dans un tube tuniqueé en papier d'aluminium (voir Photo3.11).



Photo3.11: mesure la température ambiante

3-5 Schéma descriptif du montage:

Dans ce schéma nous allons donner la disposition de notre appareillage pendant de notre expérimentation.

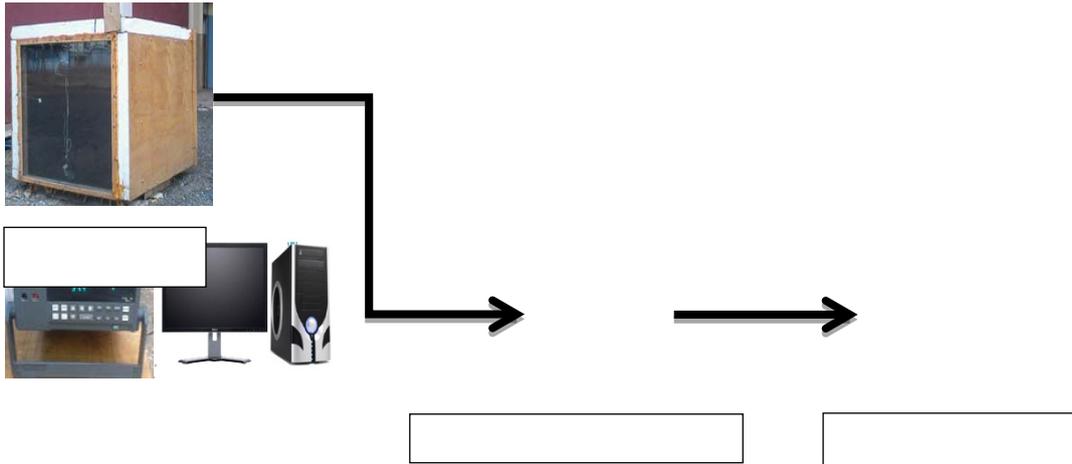


Figure3.2: Schéma de montage.

Chapitre 4

Résultats et discussions

4-1 Introduction:

Dans la cellule que nous avons choisie, nous avons effectué des prises de mesures d'essais durant certaines journées ensoleillées. A chaque fois, il nous a fallu améliorer le montage ou la façon d'opérer. Et c'est ainsi que nous avons réussi à avoir de bonnes mesure pour les journées 27 et 28 mai 2015 pour la convection naturelle, et 07 et 08 juin 2015 pour la convection forcée. La prise de mesure s'est effectuée pendant le jour et la nuit.

On a placé les 14 thermocouples aux différents niveaux du mur, la chambre et le vitrage pour mesurer ces températures. Ainsi un pyranomètre pour mesure les rayonnements solaires incidents sur le vitrage.

Les différentes températures du mur et la chambre ainsi le rayonnement, relevées dans les journées 27 et 28 mai 2015 pour la convection naturel et dans les journées 07 et 08 juin 2015 pour la convection forcé.

Les axes des abscisses nous représentent le temps avec un pas de 10 minutes.

Les résultats expérimentaux sont représentés sur les figures des deux parties suivantes:

4.1.1 Partie 01 (convection naturel):

Nous présenterons dans cette partie les résultats relevé lors de nos deux journées d'expérimentation le 27 et 28-05-2015

L'axe de l'abscisse de chaque figure est en fonction du temps pour un pas de 10 minutes, le tableau suivant présente le temps local du site de Blida et leur minute sur la figure:

Tableau4.1: Temps local du site de Blida et leur minute sur le figure.

| | | | | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| 0 | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 | 720 | 840 | 960 | 1080 | 1200 | 1320 | 1440 |
| 9:41 | 11:41 | 13:41 | 15:41 | 17:31 | 19:31 | 21:34 | 23:34 | 1:34 | 3:34 | 5:34 | 7:34 | 9:48 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 1560 | 1680 | 1800 | 1920 | 2040 | 2160 | 2280 | 2400 | 2520 | 2640 | 2760 | 2880 | 3000 |
| 11:48 | 13:48 | 15:48 | 17:48 | 19:48 | 21:48 | 23:48 | 1:48 | 3:48 | 5:48 | | | |

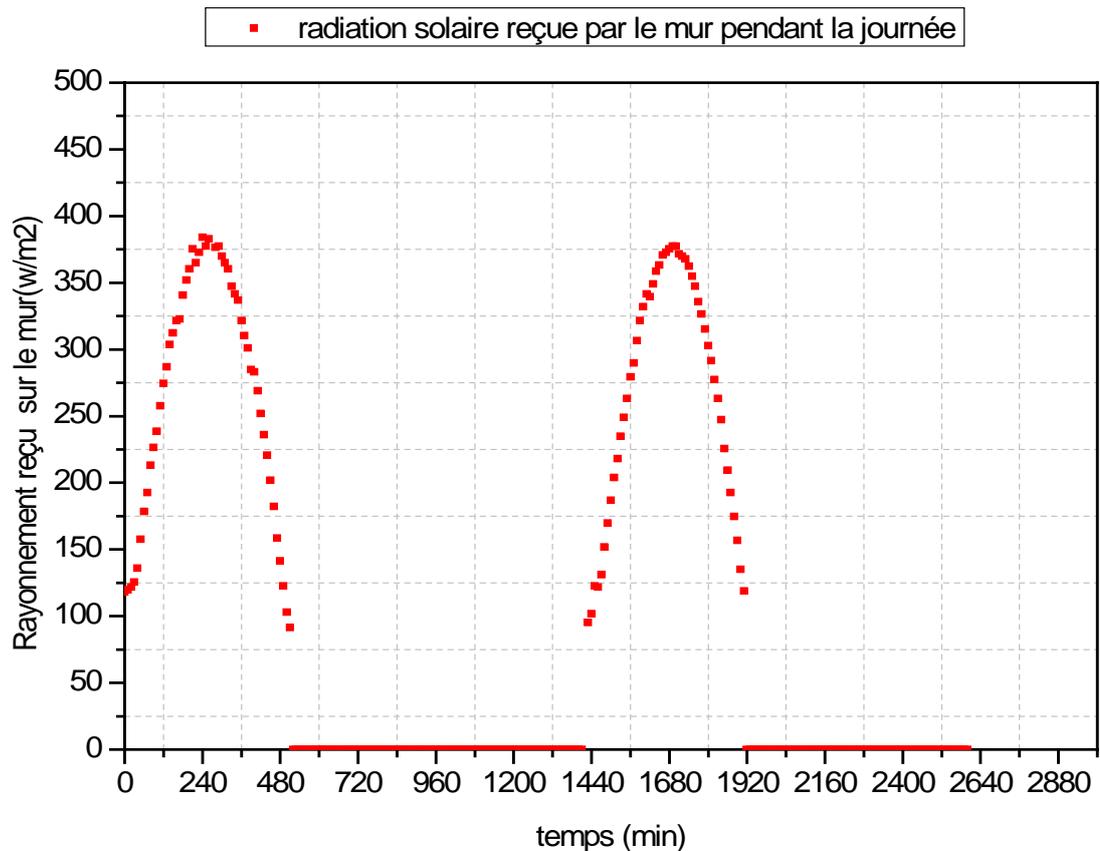


Figure4-1-1: Evolution de l'éclairage solaire globale reçue par le mur pendant les deux journées 27 et 28 mai 2015

La figure 4-1-1 représente l'évolution de rayonnement solaire global pendant les deux journées (27 et 28 mai 2015), nous pouvons mieux apprécier la variation de cette densité de flux solaire. Comme on peut le voir sur la figure, le rayonnement solaire global varie selon la forme de cloche, atteint un maximum d'environ 383.96 W/m² entre 12:40h et 15:20h pour la 1^{ère} journée, et 371.69 W/m² entre 13:00h et 15:00h pour la 2^{ème} journée. Nous pouvons aussi remarquer que cette densité de flux commence à croître assez régulièrement depuis le démarrage de prendre les mesures à 09:41h et ce jusqu'à 13:40h environ pour la 1^{ère} journée et depuis 09:04h et ce jusqu'à 15:00h environ pour la 2^{ème} journée). Ensuite elle décroît régulièrement jusqu'à 17:44h pour la 1^{ère} journée, et jusqu'à 17:38h pour la 2^{ème} journée. On mentionne que le rayonnement direct n'atteint pas le mur après ces deux derniers temps.

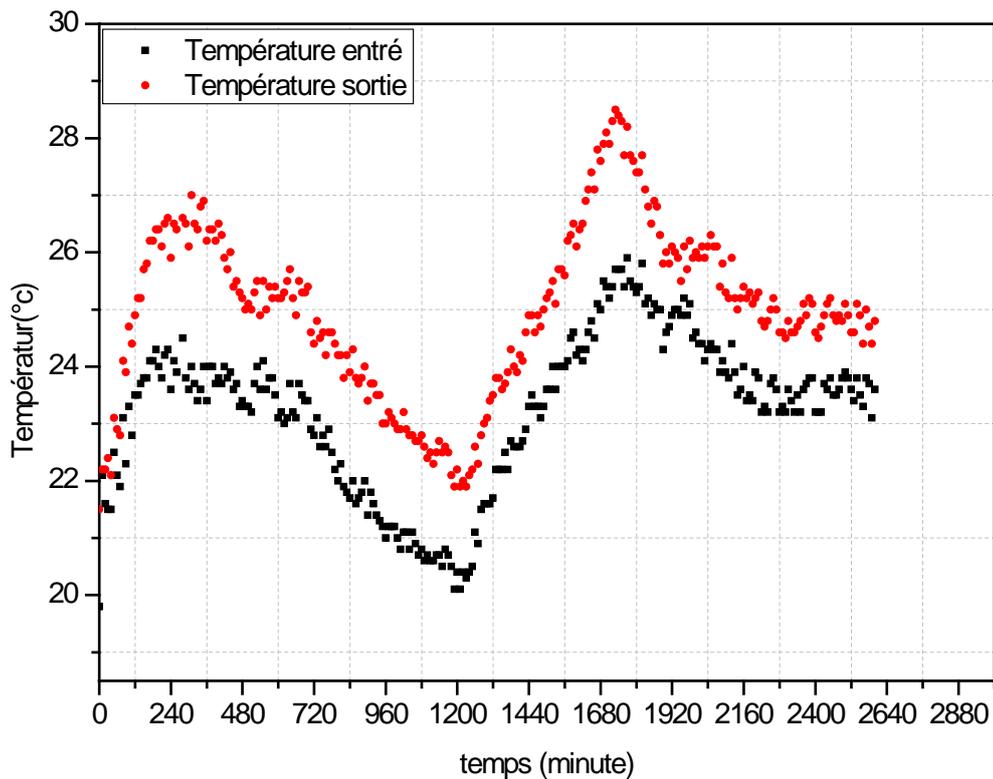


Figure4-1-2: variation de la température à l'entrée et à la sortie de canal pendant les deux journées 27 et 28 mai 2015

La figure 4-1-2 montre les variations des températures à l'entrée et à la sortie de l'air de la serre. Nous remarquerons que les allures des deux variations sont presque les mêmes. Nous pouvons aussi remarquer que il existe un écart entre les deux courbes il commence de dévoiler à 10:00h environ (après 1 heure de fermé la chambre), jusqu'à prendre une valeur maximum de $\Delta T=3,2^{\circ}\text{C}$ entre 14:00h et 15:30h, la même remarque pour la 2^{ème} journée. Par contre pendant la nuit l'écart est de l'ordre de $1,5^{\circ}\text{C}$. Ce qui fait que l'écart de température entre le bas et le haut est plus prononcé.

D'après ces observations, on peut présumer qu'il y a une thermocirculation dans la cheminée solaire.

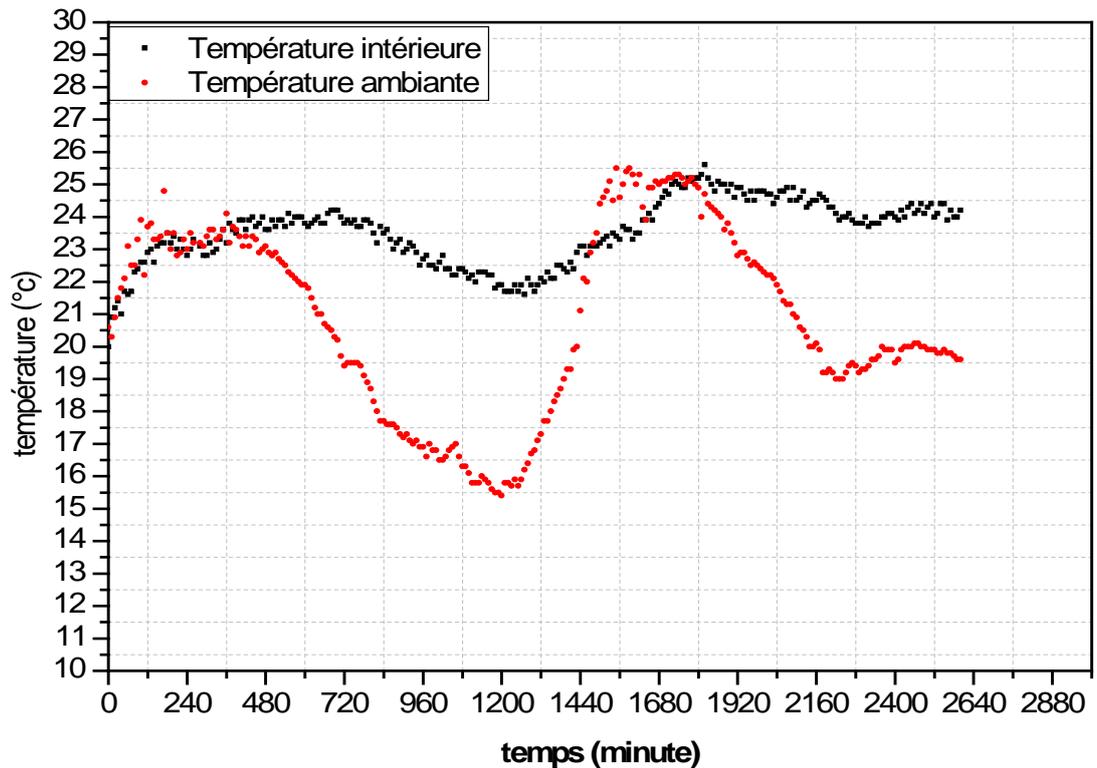


Figure 4-1-3: variation de la température à l'intérieure de la chambre et la température ambiante pendant les deux journées 27 et 28 mai 2015

La figure 4-1-3 montre la variation de la température à l'intérieure et la température ambiante. On constate que les deux courbes sont confondu à partir de 09:41h jusqu'à 15:41h environ (de façon croissante de 21°C à 23,5°C), puis la température interne reste presque constante jusqu'à 18:34h, et la température externe baisse régulièrement jusqu'à 15,4°C à 05:24h pour remonter assez brusquement vers 25,5°C à 11:38h, elle reste constante jusqu'à environ 15:38h, ensuite elle décroît assez brusquement jusqu'à 19°C à 23:08h, puis remonter un peu vers 05:08h.

Et on remarque qu'après 18:34 de 1^{ère} journée la température interne se diminue un peu jusqu'à 21,6°C à 06:34h de la 2^{ème} journée, puis elle va remonter à 25°C à 14:48h et reste presque constante pendant le soir et la nuit.

D'après ces observations, on peut présumer qu'il y a une énergie qui chauffe la chambre pendant la journée et il y a une bonne isolation thermique de la chambre.

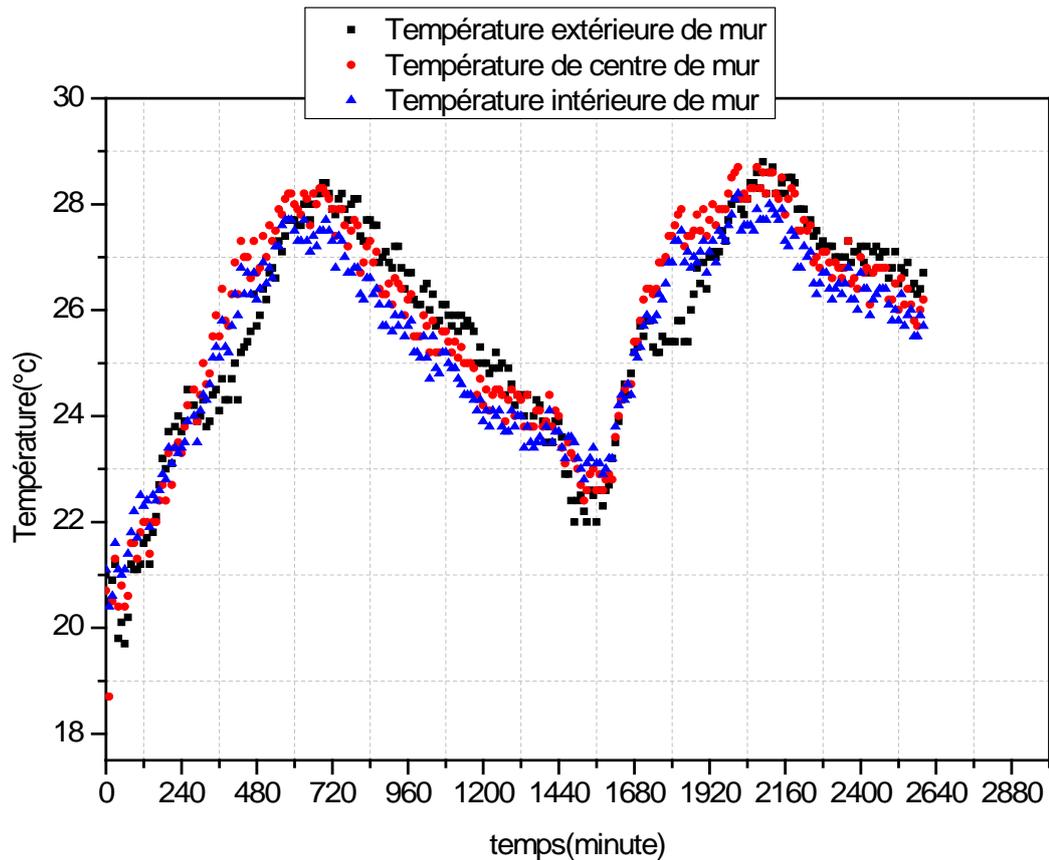


Figure4-1-4: variation de la température suivant l'épaisseur de mur pendant les deux journées 27 et 28 mai 2015

Le figure4-1-4 présenter la variation de la température suivant l'épaisseur de mur. Nous pouvons remarquer que les allures des trois points sont de même forme, la forme des courbes compose a deux phases pour chaque journée, stockage et déstockage de l'énergie solaire. Le stockage de 1^{ère} journée ce fait entre 09:41h et 20:00h à partir de température 21°C jusqu'à 28°C, ensuite la décharge se fait entre 20:00h et 11:48h à partir de température 28°C jusqu'à 23°C. La même remarque pour la 2^{ème} journée mais on remarque que la période de la charge est réduite à 9 heures environs (10 heures et 20 minute pour la 1^{ère} journée), et même l'écart entre la température à la fin et à début de stockage est réduit à 5°C (7°C pour la 1^{ère} journée).

Nous pouvons aussi remarquer que pendant la phase de stockage, la température de mur extérieur est inférieure par-rapport les deux autres températures; par contre pendant la phase de déstockage la température de mur extérieur est supérieure par-rapport aux deux autres températures. Ceci s'explique par la convection naturelle qui est prendre la chaleur du mur (les deux faces externe et interne) tend que la température T10 reste supérieur par-rapport a T09 et T11 pendant le stockage, On mentionne que a ce temps la thermocirculation est atteinte au maximum (l'écart de 3,2 °C), et

pendant le déstockage la chaleur est tirée directement vers la chambre à partir de la paroi interne du mur, tant qu'il y a une bonne isolation par le double vitrage.

D'après ces observations, on peut dire qu'il y a une circulation naturelle de l'air entre le vitrage et le mur (thermocirculation), et il y a un transfert de chaleur entre la face interne du mur et l'air de la chambre.

On peut dire que l'écart de température suivant l'épaisseur est important.

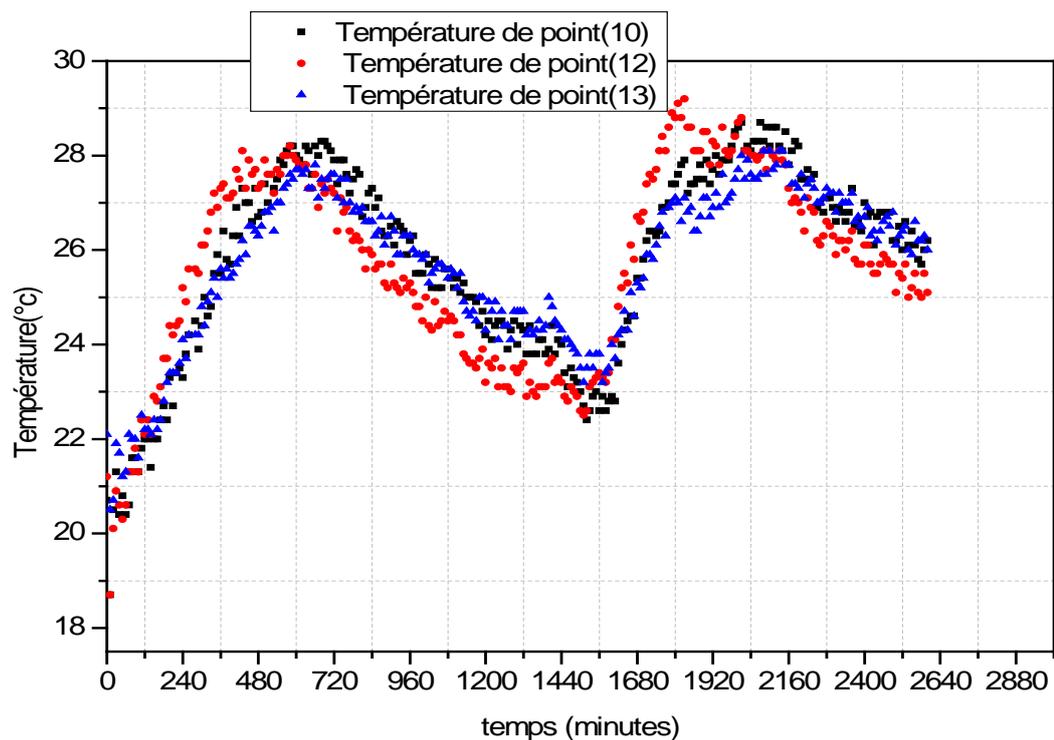


Figure4-1-5 variation de la température suivant la hauteur de mur pendant les deux journées 27 et 28 mai 2015

La figure 4.1.5 montre l'évolution des températures des trois points répartis suivant la hauteur de mur (T13;T10;T12) comme il est indiqué dans le schéma de répartition des thermocouples (la distance entre T12 et T13 est égale 0,7m). Nous pouvons remarquer que les allures des trois points sont de même forme, et la variation de ces courbes est de la même manière que la variation des courbes de figure4-1-4. Nous pouvons remarquer que l'écart entre les trois points (T13;T10;T12) est négligeable, c'est-à-dire la répartition de température suivant la hauteur du mur est presque homogène.

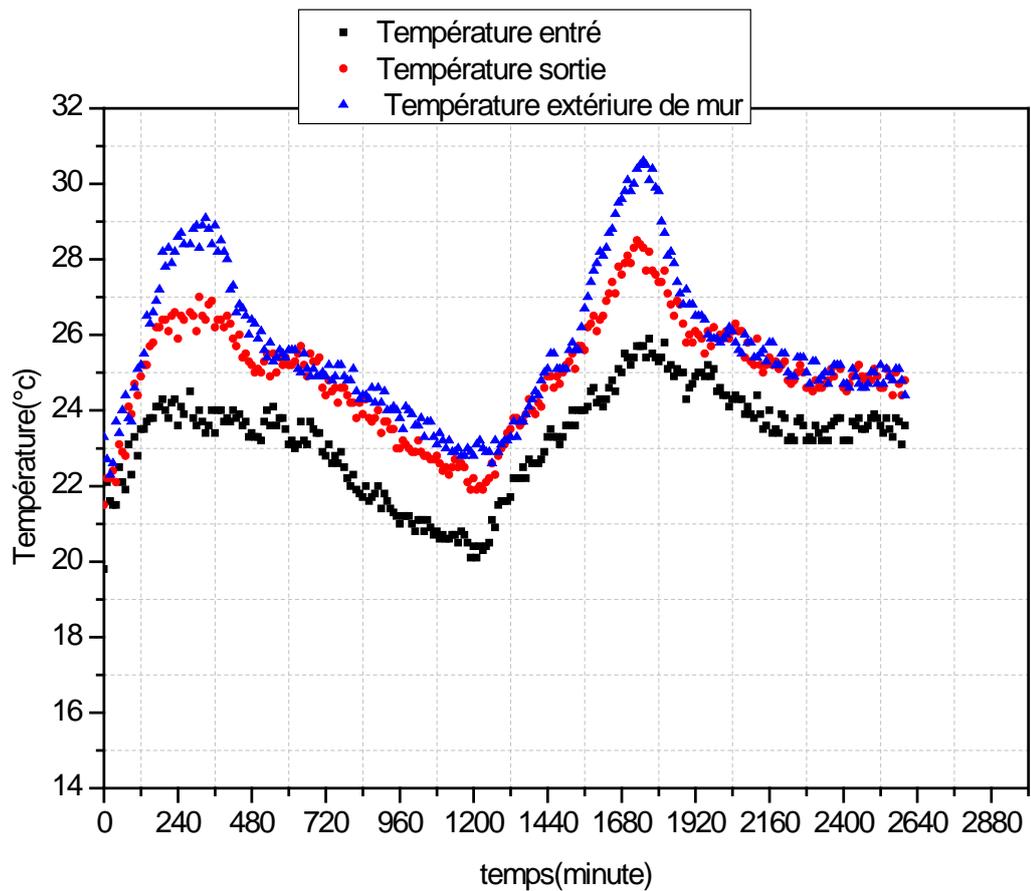


Figure4-1-6: variation de la température à l'entrée et à la sortie du canal et à la face externe de mur pendant les deux journées 27 et28 mai 2015

On a déjà expliqué la variation de température entrée et sortie, et on a ajouté dans la figure4-1-6 la variation de la température du point 16 (Température extérieure supérieure du mur). nous pouvons remarquer que l'allure de variation de la température (T16) reste supérieure que les deux températures (entrée et sortie). Ce qui nous montre que le mur donne la chaleur a l'air qui circule dans la serre

4-2 Partie 2 (convection forcer)

Nous présenterons dans cette partie les résultats relevés lors de notre deux journées de test le 07 et 08-06-2015.

L'axe des x de chaque figure est en fonction du temps pour pas de 10 minutes, le tableau suivant présente le temps local de site de Blida et leur minute sur la figure:

Tableau4.2: Temps local de site de Blida et leur minute sur le figure.

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temps (minute) | 0 | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 | 720 | 840 | 960 | 1080 | 1200 | 1320 | 1440 |
| Temps de site | 10:01 | 12:01 | 14:01 | 16:01 | 18:01 | 20:01 | 22:01 | 00:01 | 02:01 | 04:01 | 06:01 | 08:01 | 10:01 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temps (minute) | 1560 | 1680 | 1800 | 1920 | 2040 | 2160 | 2280 | 2400 | 2520 | 2640 | 2760 | 2880 |
| Temps de site | 12:01 | 14:01 | 16:01 | 18:01 | 20:01 | 22:01 | 00:01 | 02:01 | 04:01 | 06:01 | 08:01 | 10:01 |

Pour étudier la convection forcée, on ajouté un tube PVC de diamètre de 0,125 m et sa longueur est égale à la longueur de la chambre, placé au niveau de l'orifice supérieur et on a percé des trous au niveau des deux côtés du tube pour distribuer l'air chaud de façon régulière dans tous les points de la chambre. Mais l'utilisation principale de ce tube est de se débarrasser de l'excès de chaleur (la surchauffe) sachant que le tube termine dans un orifice à la paroi sud, s'ouvre et ferme manuellement ou automatiquement lorsque la température dépasse la zone de confort thermique.

Et on a mis

Pour la 1^{ère} journée d'essai de convection forcée (07-06_2015) on a mis les démarches suivantes:

- on a démarré le programme de l'enregistrement à 09:40h.
- la fermeture de la paroi arrière de la chambre à 10:30h.
- mis en marche le ventilateur à 10:37h et on a fixé leur vitesse a $v= 2,5$ m/s.
- on a débranché le ventilateur à 15:36h.

Pour la 2^{ème} journée d'essai (07-06_2015) on a fait le suivant:

- on a démarré le ventilateur à 10:40h et on a fixé leur vitesse a $v= 2$ m/s.
- on a débranché le ventilateur à 15:41h.

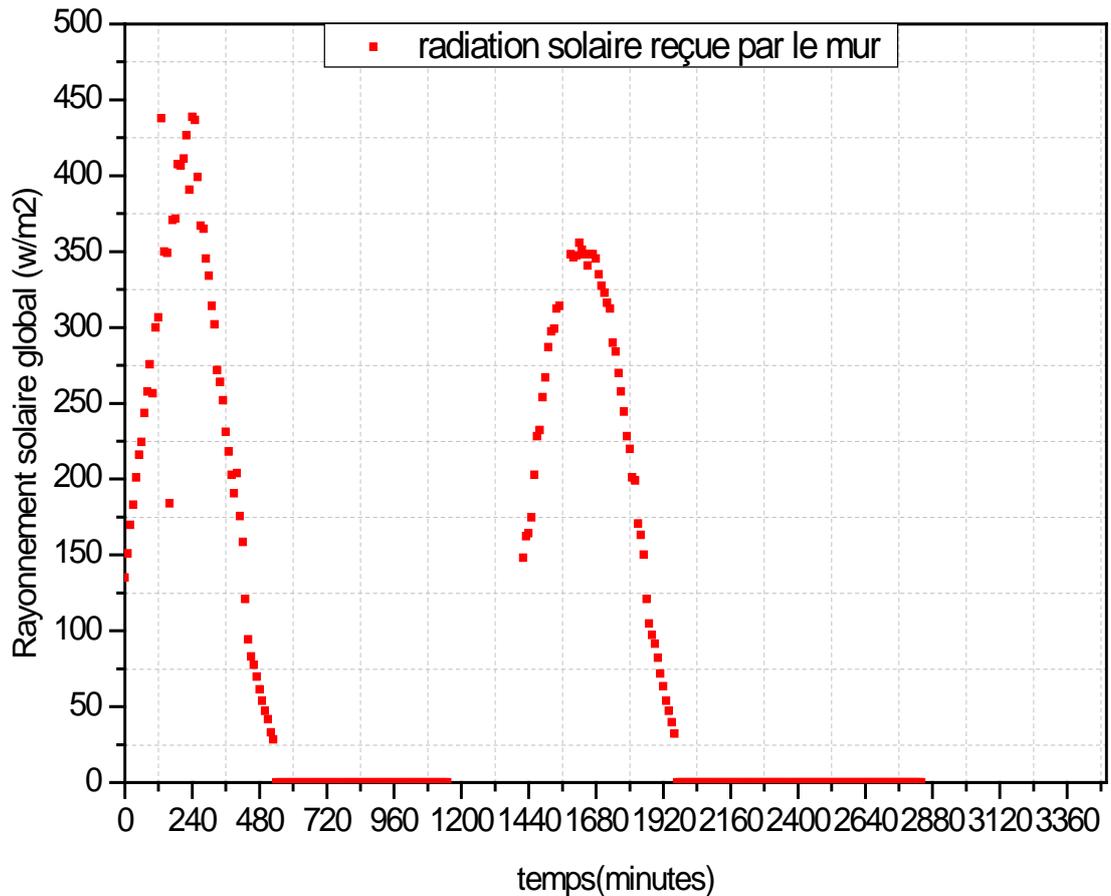


Figure4-2-1: variation de radiation solaire globale reçue par le mur pendant les deux journées 07 et 08-06-2015

La figure 4-2-1 montre les variations de rayonnement solaire, cette dernière atteint un maximum d'environ 438.67 W/m² entre 13:00h et 14:30h pour la 1^{ère} journée, et 355.66 W/m² entre 12:00h et 14:30h pour la 2^{ème} journée. Nous pouvons aussi remarquer que cette densité de flux commence à croître assez régulièrement depuis le démarrage de prendre les mesures à 10:00h et ce jusqu'à 14:00h environ pour la 1^{ère} journée et depuis 09:40h et ce jusqu'à 13:30h environ pour la 2^{ème} journée). Ensuite elle décroît régulièrement jusqu'à 18:51h (ou nous avons arrêté l'enregistrement de pyranomètre) pour la 1^{ère} journée, et jusqu'à 18:41h pour la 2^{ème} journée. On a constaté que le rayonnement direct n'atteint pas le mur après l'heure 17:40h environ.

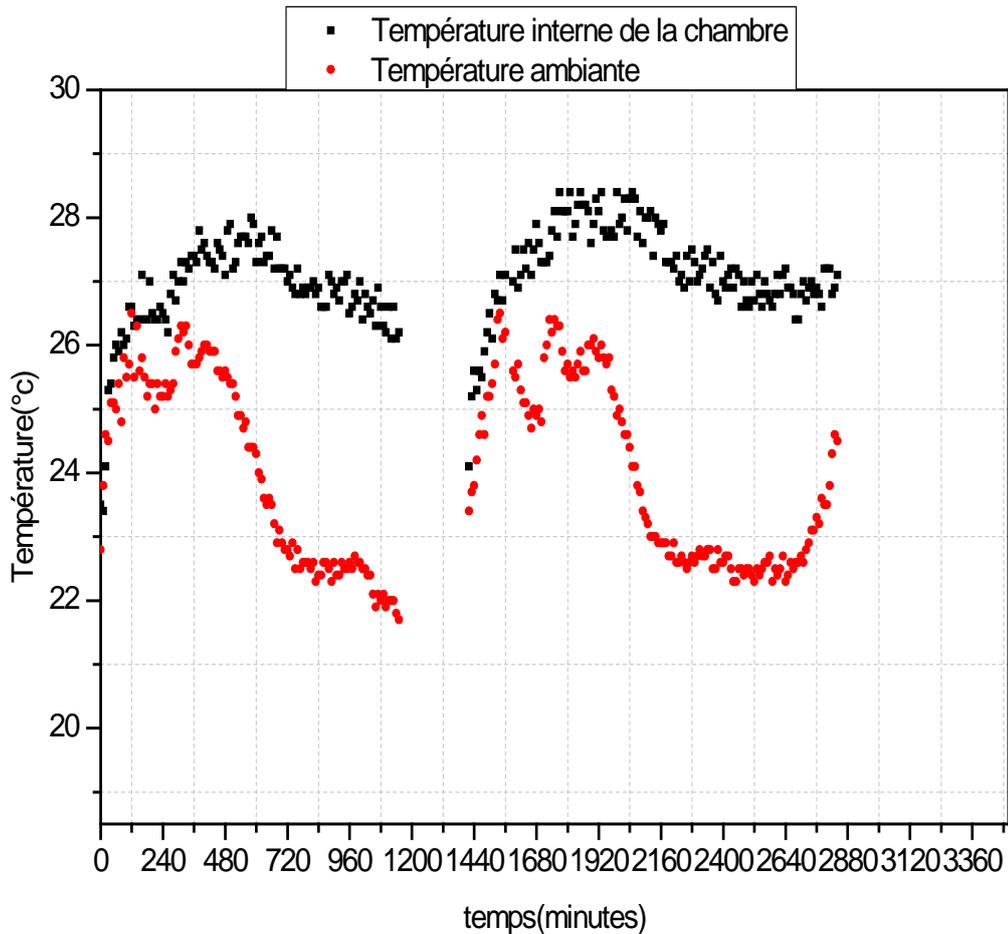


Figure 4-2-2: variation des températures intérieure et extérieure (ambiante) de la chambre (T08, T17)

La figure 4-2-2 montre la variation des températures intérieure de la chambre et ambiante, on peut remarquer que la température ambiante croit de 22,8 C° jusqu'à 26,3C° à 15:30h, puis se décroît jusqu'à la coupure du courant d'électricité ce qui a arrêté l'enregistrement sur l'ordinateur à 05:21h, tandis que la température de la chambre (23,5C°) se croître depuis la fermeture de la porte jusqu'à 28C° à 19:51h, puis se baisse un peu jusqu'à 26,1C° à 05:21h.

Nous pouvons remarquer une discontinuité des courbes entre 05:21 (coupure du courant d'électricité) et 09:47h où on a redémarré le programme, on a remarqué que la température ambiante augmente de 23,2°C jusqu' à 26,5°C (11:52h), ensuite elle décroît assez brusquement jusqu'à 24,7°C à 13:52h, puis on a remarqué entre 14:00h et 18:00h une turbulence de la température, puis elle baisse régulièrement jusqu'à 22,6°C à 00:00h pour rester presque constante jusqu'à 07:00h et après elle augmente régulièrement jusqu'à 24,5°C à 09:30h. Tandis que la température de la chambre (24,1°C) augmente régulièrement jusqu'à 28,4°C à 16:00h elle reste constante jusqu'à 22:00h, puis elle décroît pour atteindre 26,8°C.

D'après ces observations, on peut dire que le mur a chauffé la chambre, cette dernière a été bien isolée, l'augmentation de la température de la chambre est proportionnelle avec l'allure de rayonnement solaire, et l'écart de température entre la température de la chambre et la température ambiante atteint 5°C . Ce qui laisse dire qu'on a acquis une énergie importante pour le chauffage domestique.

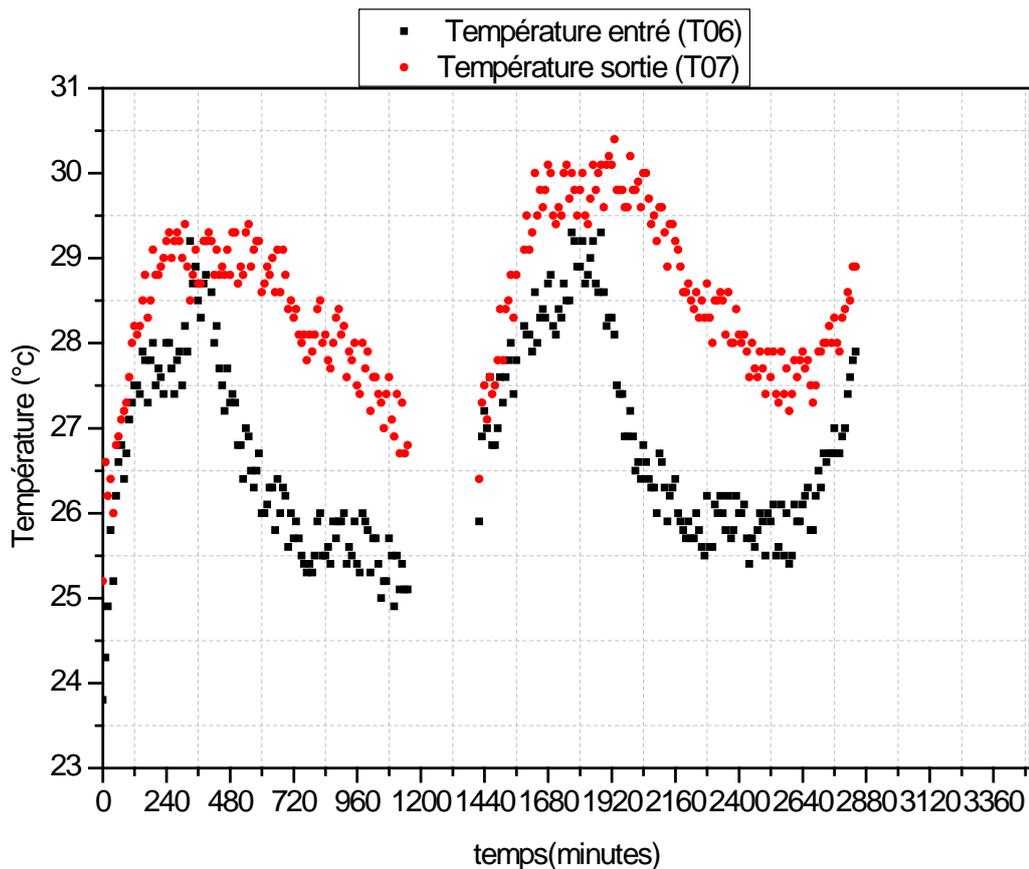


Figure4-2-3: variation de la température à l'entrée et à la sortie du mur capteur.

La figure 4-2-3 montre les variations des températures à l'entrée et à la sortie de l'air de la serre, on peut remarquer que l'écart entre les deux températures se dévoile à 12:50h jusqu'à s'éliminer à 15:41h après avoir débranché le ventilateur à 15:36h, puis se reprend le dévoiler depuis 17:11h jusqu'à la coupure du courant d'électricité. Le même phénomène de 1^{ère} journée se fait la 2^{ème} journée. La deuxième remarque c'est que l'écart entre 12:50h et 15:41h a atteint le maximum de $1,6^{\circ}\text{C}$ pour la 1^{ère} journée et il a atteint $1,5^{\circ}\text{C}$ pour la 2^{ème} journée, par contre après qu'on a débranché le ventilateur l'écart a atteint le maximum de $2,5^{\circ}\text{C}$ à minuit

pour la 1^{ère} journée et de 2,9C° pour la 2^{ème} journée à minuit. D'après ça on peut remarquer que l'écart pendant la nuit est supérieur de l'écart pendant la journée, ceci s'explique par l'effet du ventilateur qui a pris la chaleur de mur et chauffé l'air de la chambre (prendre une grande chaleur en peu de temps), et pour l'écart de la nuit est plus grand par rapport à la journée parce que le mur a été chauffé pendant les heures ensoleillé, il chauffe l'air entre le vitrage et le mur ce qui engendre une circulation naturelle (thermocirculation).

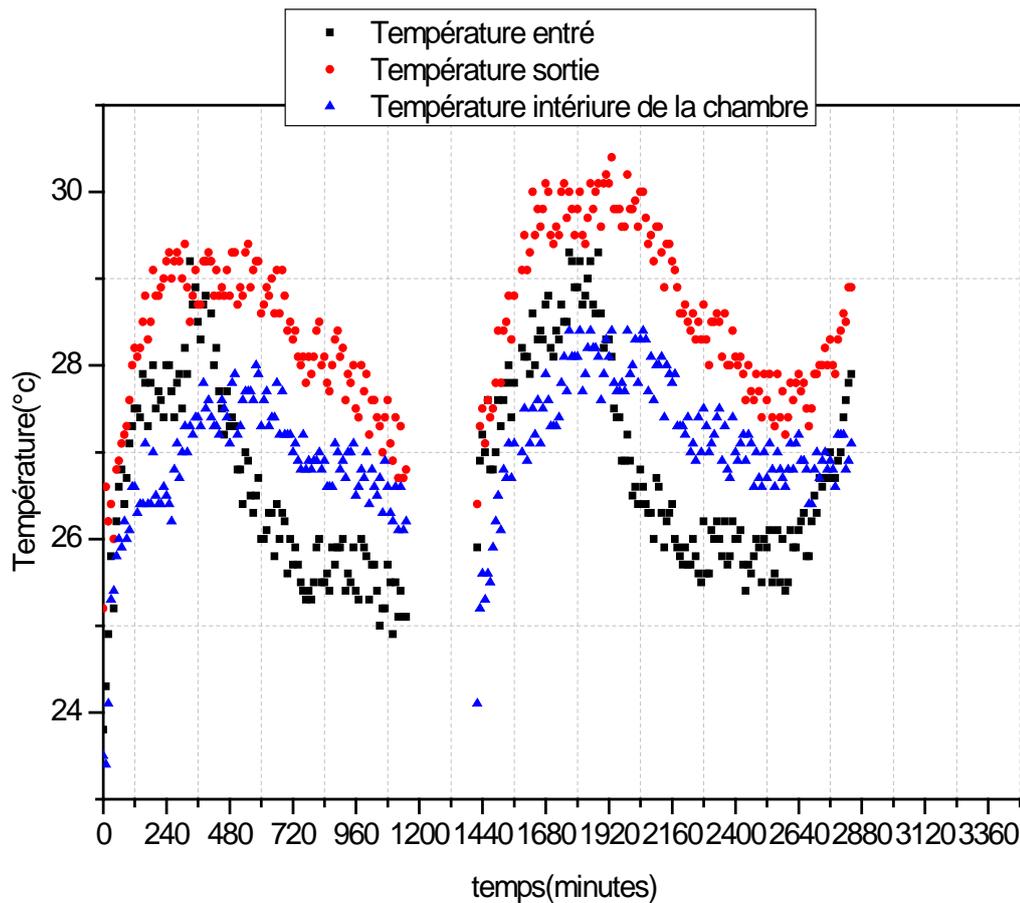


Figure4-2-4: variation des températures entré et sortie et intérieure de la chambre.

La figure 4-2-4 montre les variations des températures à l'entrée et à la sortie et l'intérieur de la chambre, nous pouvons remarquer qu'il y a une régularité dans la formation des trois courbes de sorte que dans la journée la courbe de la température de la chambre est en bas puis arrive en dessus la courbe de l'air entrant puis arrive en dessus la courbe de l'air sortant et après 18:00h il se produit clairement un changement entre la courbe de T06 et la courbe de T08 (pendant la nuit), ça nous montre qu'il y a une stratification des températures de l'air dans la chambre (le thermocouple de T08 est pendu au milieu de la chambre).

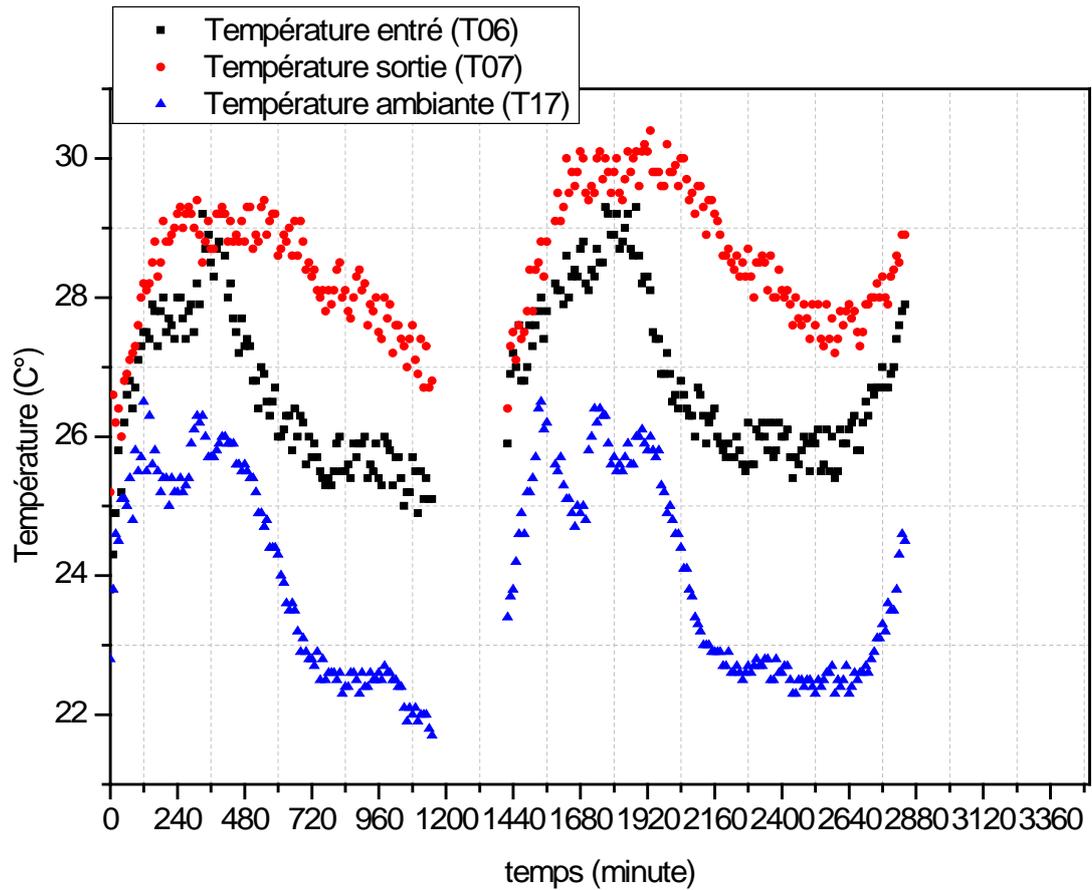


Figure4-2-5: variation des températures entré et sortie et ambiante.

La figure4.2.5 montre les variations des températures entrée et sortie et ambiante du système, on peut remarquer que les variations de ces températures proportionnelles avec la variation de rayonnement solaire. Mais toujours la température ambiante est plus petite que les deux autres températures entrée et sortie.

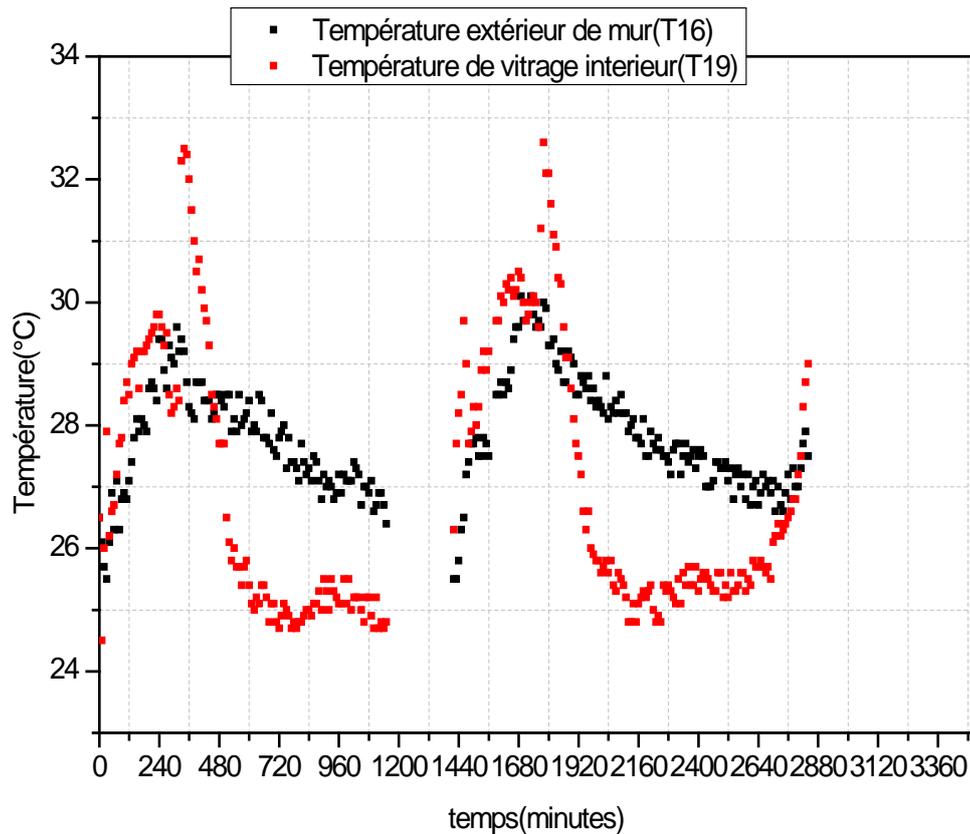


Figure4-2-6: variation des températures de vitrage intérieur et de face extérieure de mur:

La figure4-2-6 montre la variation de température de vitrage intérieure et de face extérieure de mur. Nous pouvons remarquer que pendant les heures ensoleillées (le rayonnement direct atteint le vitrage) la température de vitrage intérieure est supérieure par rapport à la température de façade extérieure du mur surtout entre 14:00h et 16:00h; par contre pendant les heures non ensoleillées (la nuit) la température de vitrage intérieure est plus petite par rapport à la température de façade extérieure du mur. On peut expliquer ça par l'effet de serre qui engendre pendant les heures ensoleillées, mais pendant la nuit le mur est plus chauffé que le vitrage. On constate qu'il y a une relation entre l'effet de serre et le rayonnement solaire.

Conclusion:

L'utilisation de l'énergie solaire dans le bâtiment doit être un des axes primordiaux de recherche en Algérie qui présente un potentiel d'énergie solaire assez considérable, dans l'étude qui a été présentée le mur Trombe paraît comme une solution intéressante pour l'économie de l'énergie.

Dans ce travail, nous avons présenté les résultats d'une première étude expérimentale d'un mur TROMBE classique à l'université Saad Dahleb Blida. Ceci a été en partie possible grâce à la mise en œuvre d'un dispositif expérimental à échelle réduite sollicité par des conditions climatiques réelles.

Une chambre à échelle réduite a été réalisée, un mur TROMBE classique placé à la face sud de la pièce. La disposition des thermocouples à différents niveaux dans le mur et dans la cellule, nous a permis de mieux apprécier la variation de la température du mur et de l'air entre la chambre et la serre. En regard des résultats expérimentaux, on pourrait tirer les conclusions suivantes:

- on pense qu'il y a présence du phénomène de thermocirculation, sachant que la hauteur entre les deux orifices est de 0.83m, le diamètre de chaque orifice est de 0.125m et la distance mur-vitrage est de 0.05m.
- Le mur en béton chauffe la chambre suivant deux échanges thermiques: échange par convection naturelle et échange par conduction de la face extérieure du mur vers la face intérieure, ensuite convection entre la face intérieure et l'air de la chambre.
- On présume que la répartition de température suivant la hauteur du mur est presque uniforme, par contre celle suivant l'épaisseur du mur est importante.
- L'isolation de la chambre a été bien choisie, ce qui nous montre que le polystyrène est un bon matériau pour l'isolation des bâtiments.

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

- ✓ une étude comparant le stockage d'énergie sensible d'un matériau classique avec le stockage d'énergie d'un matériau à changement de phase.
- ✓ une étude comparant le fonctionnement du mur Trombe à un seul vitrage, avec le fonctionnement du mur Trombe à double vitrage.

- ✓ Faire des mesures pour d'autres distances mur-vitrage, et comparer de nouveau les résultats. On pourra ainsi trouver la distance optimale entre le mur et le vitrage interne, qui nous permet de recueillir le maximum d'énergie.

Références bibliographiques

- [1] A. Khedim, L'énergie solaire Utilisation thermique et photovoltaïque, Editions ANEP, ISBN: 9947-21-230-0, Dépôt légal: 1105-2005.
- [2] J. Bernard, Energie Solaire, Calculs et optimisation, Ellipses Edition marketing S.A 2011
- [3] K. Imessad et M. Belhamel, Evaluation des Performances d'un Mur Trombe, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Alger.
- [4] 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)
- [5] F. SAM, Réhabilitations Thermique d'un Local Dans une Zone Aride –Cas de GHARDAIA- Thèse de Magister, université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, 2012.
- [6] E. TASDEMIROGLU et all, The Performance Results of TROMBE-WALL Passive systems Under Aegean Sea Climatic Conditions, Solar Energy 181-189. 1983.
- [7] K. Imessad et M. Belhamel, Evaluation des Performances d'un Mur Trombe, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah, Alger, *Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 195-198.*
- [8] Jibao Shen et all, Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls, Energy and Buildings 39 (2007) 962–974.
- [9] Y Li et all, STUDY ON THE AIR MOVEMENT CHARACTER IN SOLAR WALL SYSTEM, University of Technology, 2007, Beijing, 100022, China
- [10] M. Akermi, Contribution à l'étude d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau et application aux sites de TIARET et ADRAR, Thèse de Magister, Ecole Doctorale Energies renouvelables, Université Abou Baker Belkaid, TLEMCEM
- [11] Arvind Chel et all, Energy conservation in honey storage building using Trombe wall, Energy and Buildings 40 (2008) 1643–1650.
- [12] M.K. Cherier et all, Etude des Performances Thermiques d'un Mur Trombe, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, B.P, 88, ZI, Garet Taam Ghardaïa (2008).

- [13] Zohir YOUNSI et all, 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] F Abbassi et all, Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisianbuilding configurations, Centre de Recherches et des Technologies de l’Energie (CRTEN), PB 95, Hammam Lif 2050, Tunisiaa, Energy and Buildings 80 (2014) 302–308.
- [17] X Hong et all, Three-dimensional simulation on the thermal performance of a novel Trombe wall with venetian blind structure, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China, Energy and Buildings 89 (2015) 32–38
- [18] Jean-François SACADURA
, Initiation aux transferts thermique, Technique et documentation, Edition Lavoisier, Paris (1978).
- [19] 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.
- [20] WH Ball, Communication présentée à la réunion générale annuelle, Institut du génie du Canada, publiée à l'origine en septembre (1967).
- [21] Solution Béton, Inertie thermique et confort d’été , in revue construction moderne n°103, France (2000).
- [22] A. De. HERDE, A. EVRARD, Béton et utilisation rationnelle de l’énergie, Bulletin publié par : FEBELCEM – Fédération de l’Industrie Cimentière Belge (2005).
- [23] 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).