

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

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

*Université Saad Dahleb, Blida-1*

*Faculté de Technologie*

*Département Des Énergies Renouvelables*

**Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de master**

**Spécialité : énergies renouvelables**

**Option : habitat bioclimatique**

**Thème :**

**INTÉGRATION D'UN MUR TROMBE DANS UN HABITAT**

**Présenté par :**

- Afghoul Rachid
- Temagoult Sid Ali

**Encadré par :**

- Dr. Kharchi Razika

**-Devant le jury :**

Nom et prenom	Grade	
-Mr Abd Elhadi Mohammed	Dr	président
-Mr Semmar Djafare	Pr	examineur
-Mr Lafri Djamel	Dr	examineur

**Année universitaire 2021/2022**

## ***Remerciements***

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

Nous tenons à remercier en premier lieu notre encadrant Dr. kharchi Razika, et nous remercier les membres de jury.

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

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

## **Dédicaces**

*Je dédie ce travail à mes parents*

*Mes frères Mohammed, Ahmed, Omar, Abdo*

*Mes sœurs HaKIMA, Samia*

*À mes chers amis*

*Amine, Hako, Didin, Monib ...*

*Mes amis dans la résidence Soumaa 3*

**Rachid**

## Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes parents*

*Mes frères Wahab , Redouan,*

*Mes sœurs Manal, Yasmin*

*À mes chers amis*

*Amine, Hako, Didin, Monib Issam Bennouna*

*Bilal Akram Mohammed Rachid Abdou Oussama*

*Mes amis dans la résidence Soumaa 3*

*Sid Ali*

## ملخص

يشكل قطاع البناء مصدر 45 ٪ من استهلاك الطاقة في الجزائر، لأنه يسعى دائما إلى تلبية احتياجات القاطنين في السياق الحالي، أكثر إثارة للاهتمام واستفادة. هدفنا هو استخدامه في المنازل. في قلب هذا الأخير، يمكن لجدار ترومب أن يلعب دوراً رئيسياً بفضل قدرته على التقاط حرارة الشمس وإعادتها بشكل موحد داخل المنزل، إنه أحد أكثر الأنظمة كفاءة للتدفئة السلبية للمساحات كجزء من هدفنا لدراسة وتقييم الراحة الحرارية وتحسين استهلاك الطاقة، قمنا بإجراء محاكاة باستخدام برنامج لتغطية الاحتياجات Trombe لتحديد احتياجات التدفئة ودمج جدار TRNSYS

## Résumé

Le secteur de la construction représente 45% de la consommation énergétique de l'Algérie, Parce qu'il cherche toujours à répondre aux besoins de ses occupants.

Dans le contexte actuel, l'énergie solaire est l'alternative la plus intéressante et la plus efficace.

Favorable. Notre objectif est de l'utiliser dans l'habitat. Au centre de ce dernier, le mur trombe Parce qu'il capte la chaleur du soleil et l'évacue de Réparti uniformément dans toute la maison, c'est l'un des systèmes les plus efficaces pour le Chauffage passif des locaux.

Dans le cadre de notre bute d'étudier et évaluer le confort thermique et optimiser la consommation énergétique on a fait une simulation avec logiciel TRNSYS pour définir les besoins de chauffage et intègre le mur de Trombe pour couvrir les besoins

## Abstract

The construction sector accounts for 45% of Algeria's energy consumption, Because it always tries to meet the needs of its occupants.

In the current context, solar energy is the most interesting and efficient alternative.

Favorable. Our goal is to use it in the habitat. In the center of the habitat, the wall spouts Because it captures heat from the sun and evacuates it from Distributed evenly throughout the house, it is one of the most efficient systems Passive heating of locals.

As part of our goal to study and evaluate the thermal comfort and optimize the energy consumption we made a simulation with TRNSYS software to define the heating needs and integrates the Trombe wall to cover the needs

# SOMMAIRE

Liste des tableaux .....	10
Introduction Générale : .....	11
<b>CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE ET ETAT DE L'ART .....</b>	<b>12</b>
1-2-Introduction : .....	13
1-3-Le mur Trombe- Michel : .....	13
1-4-Mur trombe : Avantages et Inconvénient.....	14
1-5-Etude bibliographique :.....	15
<b>CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS THERMIQUE ET MUR DE TROMBE.....</b>	<b>20</b>
2-1-Introduction : .....	21
2-2- L'architecture bioclimatique : .....	21
2-3-La conception bioclimatique : .....	21
2-4- L'orientation et l'implantation : .....	22
2-5-L'architecture et la forme : .....	23
2-6-La distribution intérieure : .....	23
2-7 Classification des bâtiments énergétiques efficaces.....	24
2-8- Le confort thermique : .....	25
2-9- Les six paramètres qui influents sur le confort thermique : .....	26
2-10-Facteur influant sur le confort thermique lié aux conditions climatiques :.....	26
2-10-1 L'ensoleillement : .....	26
2-10-2-Compositions du rayonnement solaire :.....	27
2-11-La température ambiante (ou de consigne) .....	29
2-12-La température des parois.....	30
2-13-Le mode chauffage.....	30
2 -13-1-La production de la chaleur .....	30
2-13-2 Les variations de températures .....	31
2-13-3-La distribution de la chaleur .....	32
2-13-4 L'humidité relative de l'air (hygrométrie).....	32
2-13-5 Les mouvements d'air .....	32
2-13-6 L'occupant.....	33
2-13-7 Le bon confort thermique .....	33
2-14 Etude de mur de trombe : .....	33
2-15 Description de mur trombe : .....	34
2-16 Principe du mur Trombe : .....	35
2-17 Fonctionnement de la paroi thermique en hiver : .....	35
2-18 Fonctionnement de la paroi thermique en été :.....	36

2-19 Calcul de l'inertie thermique.....	37
2-20 Circulation de la chaleur.....	37
2-21 Radiation .....	38
2-22 Masse thermique du mur trombe.....	38
2-23 Stockage thermique .....	39
2-23-1 Intérêt de stockage thermique : .....	39
2-23-2 Systèmes de stockage passif .....	40
2-23-3 Stockage par ballon d'eau : .....	41
2-23-4 Stockage par lit de galets : .....	42
2-23-5 Stockage par mur capteur : .....	44
2-24 Thermo circulation .....	45
2-25 Performance du mur trombe (nord de l'ALGERIE).....	48
2-26 Effet des dispositifs des protections solaires .....	48
3.1 Introduction : .....	51
3-2 Le site géographique : .....	51
3-3 Les caractéristiques météorologiques de Batna .....	52
3-3-1 La température : .....	52
3-3-2 Le rayonnement global : .....	53
3-4 Estimation des besoins en chauffage et climatisation .....	55
3-4-1 Présentation de TRNSYS.....	55
3-4-2 Application .....	56
3-5 Résultats obtenus.....	60
3-6- Analyse des résultats obtenus .....	62
3-6 Intégration de mur de Trombe dans le TRNSYS .....	63
CONCLUSION GENERAL .....	68

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : recherche bibliographique et état de l'art

FIGURE 1- 1: SCHEMA DE PRINCIPE D'UN MUR TROMBE-MICHEL.....13

## Chapitre II : Généralité thermique et mur de trombe

FIGURE 2- 1: ORIENTATION D'UNE MAISON ..... 22

FIGURE 2- 2 : LA VARIATION DE COMPACITE SUIVANT LA TAILLE, LA FORME ET LE MODE DE CONTACT  
DES VOLUMES CONSTRUITS ..... 23

FIGURE 2- 3: : LA DISTRIBUTION DES ESPACES DANS UNE MAISON BIOCLIMATIQUE . ..... 24

FIGURE 2- 4: LES PARAMETRES DU CONFORT THERMIQUE ET L'ÉCHANGE THERMIQUE DU CORPS  
HUMAIN ..... 26

FIGURE 2- 5: PARTIES INCIDENTES DU RAYONNEMENT SOLAIRE..... 27

FIGURE 2- 6: RAYONNEMENT SOLAIRE TRAVERSANT UN DOUBLE VITRAGE..... 29

FIGURE 2- 7: PRODUCTION DE LA CHALEUR..... 30

FIGURE 2- 8: CHAUFFAGE PAR RAYONNEMENT ..... 31

FIGURE 2- 9: LES MOUVEMENTS D'AIR ..... 32

FIGURE 2- 10 : L'OCCUPANT..... 33

FIGURE 2- 11: DESCRIPTION D'UN MUR TROMBE THERMIQUE ..... 34

FIGURE 2- 12: SCHEMA DE PRINCIPE DU MUR TROMBE..... 35

FIGURE 2- 13 : FONCTIONNEMENT HIVER..... 36

FIGURE 2- 14 : FONCTIONNEMENT EN ETE..... 37

FIGURE 2- 15: LA CONSOMMATION MONDIALE D'ENERGIE ..... 40

FIGURE 2- 16 : SCHEMA D'UNE INSTALLATION DE CHAUFFAGE SOLAIRE A EAU..... 41

FIGURE 2- 17 : SCHEMA D'UNE INSTALLATION DE CHAUFFAGE A AIR..... 42

FIGURE 2- 18 : SCHEMA D'UN LIT DE GALETS AVEC LE SENS D'ÉCOULEMENT DE L'AIR EN STOCKAGE  
ET EN DESTOCKAGE..... 43

FIGURE 2- 19 : SCHEMA SIMPLIFIE D'UN CHAUFFAGE SOLAIRE PASSIF A AIR UTILISANT UN MUR  
COMME STOCKAGE THERMIQUE (MUR CAPTEUR) ..... 44

FIGURE 2- 20 : SCHEMA ELECTRIQUE DU MUR ..... 46

FIGURE 2- 21 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE INTERNE DU LOCAL AVEC DEUX METHODES POUR  
L'EVALUATION DU FLUX ECHANGE PAR THERMO CIRCULATION ..... 47

FIGURE 2- 22 : INFLUENCE DE LA THERMO CIRCULATION SUR LA TEMPERATURE  
INTERNE DU LOCAL ..... 47

FIGURE 2- 23 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DU LOCAL EN HIVER ..... 48

FIGURE 2- 24 : EVOLUTION DE TEMPERATURE LA DU LOCAL EN ETE ..... 48

## Chapitre III : Simulation et résultats

FIGURE 3- 1 : LA WILAYA DE BATNA ..... 51

FIGURE 3- 2 : LE SITE DE MAISON ..... 52

FIGURE 3- 3 : LA VARIATION DE TEMPERATURE DURANT L'ANNEE A BATNA (METRONOME). ..... 52

FIGURE 3- 4 : LA TEMPERATURE JOURNALIERE MAX ET MIN ..... 53

FIGURE 3- 5 : RAYONNEMENT GLOBAL A BATNA(METRONOME) ..... 53



FIGURE 3- 6 : PLAN DE MAISON .....	54
FIGURE 3- 7 : DUREE D'ENSOLEILLEMENT A BATNA (METRONOME).....	54
FIGURE 3- 8 : CREATION D'UN NOUVEAU PROJET SUR TRNSYS .....	56
FIGURE 3- 9 : DESCRIPTION DU BATIMENT SUR TRNBUILD. ....	57
FIGURE 3- 10 : VARIATION DES PARAMETRES THERMIQUES, TRNBUILD.....	58
FIGURE 3- 11 : INTRODUCTION DU FICHIER METEO, TRNSYS.....	58
FIGURE 3- 12 : DEFINITION DES OUTPUTS. ....	59
FIGURE 3- 13 : TEMPERATURE AMBIANTE .....	60
FIGURE 3- 14 : BESOINS DE CHAUFFAGE.....	60
FIGURE 3- 15 : TAMB ET BESOINS DE CLIMATISATION .....	61
FIGURE 3- 16 : BESOINS DE CLIMATISATION.....	61
FIGURE 3- 17 : BESOINS EN CHAUFFAGE ET CLIMATISATION, .....	62
FIGURE 3- 18 : INTEGRATION DE MUR DE TROMBE DANS TRNSYS .....	63
FIGURE 3- 19 : CARACTERISTIQUE DE MUR .....	64
FIGURE 3- 20 : LES BESOINS DE CHAUFFAGE ET L'ENERGIE FOURNIE PAR LE MUR.....	64
FIGURE 3- 21 : TEMPERATURE D'ENTREE ET DE SORTIE DU MUR TROMBE .....	65
FIGURE 3- 22: ÉCLAIREMENT SOLAIRE A BATNA.....	66
FIGURE 3- 23: L'ENERGIE FOURNIE PAR LE MUR TROMBE .....	66

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre I : recherche bibliographique et état de l'art**

<b>TABLEAU 1- 1 : LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE MUR DE TROMBE .....</b>	<b>14</b>
---	-----------

### **Chapitre II : Généralité thermique et mur de trombe**

<b>TABLEAU 2- 1 : FLUX PAR THERMO-CIRCULATION.....</b>	<b>47</b>
--	-----------

## Introduction Générale :

"L'Algérie, compte tenu de sa position géographique, dispose de l'un des gisements solaires les plus élevés au monde", a précisé le CEREFÉ, précisant que "la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut même atteindre 3900 heures notamment dans les hauts plateaux et le Sahara". En se basant sur les cartes réalisées par le Centre de développement des énergies renouvelable (CDER) dans son Atlas des ressources ENR de l'Algérie, le Commissariat a ajouté que sur l'ensemble du territoire national, "l'énergie solaire globale reçue par jour sur une surface horizontale d'un mètre carré varie entre 5,1 KWh (~1860 KWh par an et par m<sup>2</sup>) au Nord et 6,6 KWh (~2410 KWh par an et par m<sup>2</sup>) dans le Grand Sud" [1]

En effet l'énergie thermique produite par voie solaire est une forme d'énergie très écologique sans émission de CO<sub>2</sub>. De ce fait la substitution des charbons, gaz naturel et autres énergies conventionnelles réduisent sans les effets désastreux des systèmes énergétiques classiques. En général, les systèmes de chauffage proposés sont compliqués et coûteux de fait de la préoccupation de leurs réalisateurs de les rendre complètement autonomes, c'est-à-dire de chauffer les maisons sans recours à une source auxiliaire d'énergie d'appoint durant les périodes d'insuffisance solaire [2].

Pour le chauffage d'une maison on a plusieurs modes :

- Le chauffage électrique
- Le chauffage fioul
- Le chauffage au gaz
- Le chauffage bois
- La pompe à chaleur

Notre projet porte sur un système solaire passif intégré à l'habitat ; avec un stockage faisant partie de l'enveloppe, ce qui rend le système pratique et écologique.

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

Chapitre 1 : recherche bibliographique et état de l'art

Chapitre 2 : généralité thermique et mur de Trombe

Chapitre 3 : simulation et résultat

**CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE  
ET ETAT DE L'ART**

## 1-2-Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter le mur de trombe et leur avantages et inconvénients et quelque recherche bibliographique

## 1-3-Le mur Trombe- Michel :

Il doit son nom au Professeur Félix Trombe, célèbre pour ses travaux sur les fours solaires, et à l'architecte Jacques Michel, qui ont tous deux participé à son élaboration.

Le mur Trombe-Michel est un système directement incorporé au mur d'une maison. Une des parties d'un mur extérieur est remplacé par du double vitrage derrière lequel est situé un mur de béton (le mur de béton se trouve donc dans la maison).

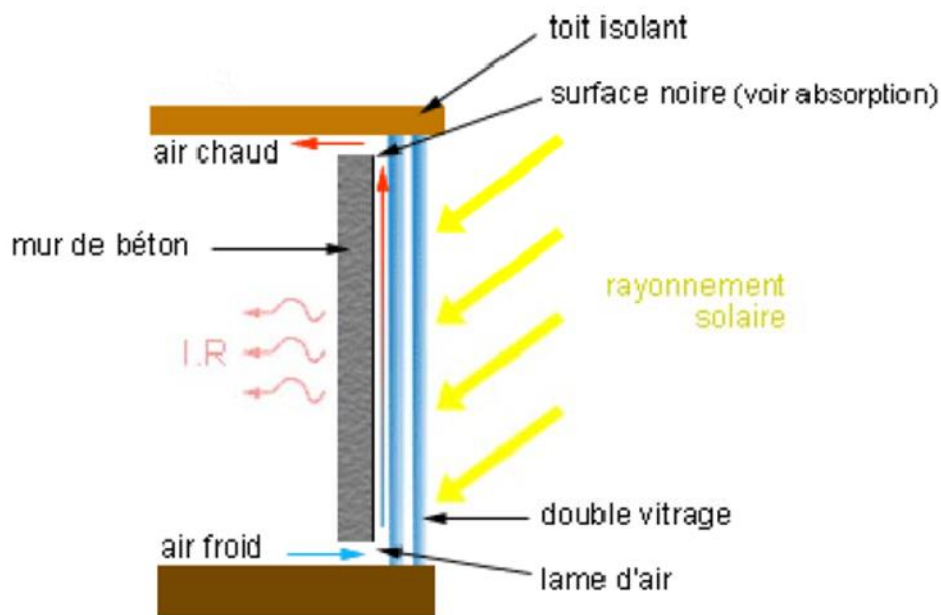


Figure 1- 1: schéma de principe d'un mur Trombe-Michel

C'est encore le principe de l'effet de serre qui est utilisé ; le mur capte la chaleur et en utilise une partie pour chauffer l'air situé entre le mur de béton et le double vitrage. L'air chaud étant moins dense que l'air froid, il monte. C'est cette circulation qui assure le chauffage la maison (dans la pièce, l'air froid est chassé par l'air chaud entre le mur et le double vitrage).

L'épaisseur du mur est telle qu'elle permet de conserver une partie de la chaleur absorbée durant le jour et de la restituer plus tard (la nuit par exemple). Donc le chauffage se fait :

-soit directement par l'air

-soit par rayonnement lent (infrarouge) : le mur transmet lui-même par rayonnement IR à l'air de la maison une partie de la chaleur qu'il a reçue du soleil.

## 1-4-Mur trombe : Avantages et Inconvénient

*Tableau 1- 1 : les avantages et les inconvénients de mur de Trombe*

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

Il est important de préciser que ces systèmes sont dans la plupart des cas complétés par un système d'appoint (résistance placée dans le chauffe-eau ou chauffage classique) afin de compléter si nécessaire les besoins énergétiques.

## 1-5-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 [3].

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) [4],**

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

### **K. Imessad et M. Belhamel (1999)[5]**

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

### **JibaoShen et all (2005) [6]**

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

### **Y Li et all (2007) [7]**

Un modèle mathématique pour simuler la circulation d'air, dans le canal solaire du système de mur Trombe solaire isolé, est proposé. Il est supposé que le vitrage est isotherme et la chaleur solaire absorbée par la paroi est transférée à l'air dans le canal avec un flux constant par convection naturelle. Les équations de masse, d'élan et de conservation d'énergie sont discrétisés et résolus en utilisant la méthode de contrôle de volume de différence finie. Une étude expérimentale de cheminée solaire a été utilisée pour valider le modèle mathématique proposé. Les différences entre les résultats prédits du flux d'air dans le mur solaire et ceux des données de mesure sont inférieures à 3,0% lorsque la largeur de mur solaire est de 0,2 m et la température de mur est inférieure à 50°C. Lorsque le mur est de 0,3 m de large, ces différences sont inférieures à 5,0%, la température de mur est inférieure à 50°C. Les champs de flux et de température sont produits et les résultats sont présentés en termes de distribution de température et de vitesse dans différentes parties du système. Les résultats montrent que le gain de chaleur solaire et la largeur de canal sont deux paramètres importants affectant le motif d'écoulement de l'air et le transfert de chaleur.

### **ArvindChel et all (2007) [8]**

Cet article étudie la conservation de l'énergie, l'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> et de l'économie du réaménagement d'un bâtiment de stockage de miel avec le mur Trombe pour l'application de chauffage en hiver. Le potentiel de chauffage passif du mur Trombe pour un bâtiment de stockage du miel a été estimé en utilisant logiciel TRNSYS de simulation de bâtiment. Ce bâtiment de stockage du miel est situé à Gwalior (latitude : 26°14'N) en Inde. Pendant les mois d'hiver, la température de l'air de chambre du bâtiment tombe en dessous du rang de 18-27°C requis qui est approprié pour le stockage du miel. Ainsi, le rang de température de l'air de la chambre est maintenu 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 CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère provenant du bâtiment de stockage du miel. Par conséquent, cette étude de cas a été menée pour recommander le concept de chauffage passif aux intervenants du bâtiment de manière à conserver l'énergie requise pour le chauffage de l'air de la chambre. L'enquête a montré que la température de l'air de la chambre peut être facilement maintenue dans l'intervalle approprié pour le stockage du miel en utilisant un mur Trombe ventilé. Le travail expérimental a été réalisé pour le bâtiment existant sur une typique journée claire d'un mois dur, d'hiver, de Janvier pour valider les résultats de modèle TRNSYS du bâtiment actuel. L'analyse d'erreur statistique a montré un bon accord entre le modèle et les résultats expérimentaux. Cette enquête conclut qu'il existe un potentiel de conservation d'énergie jusqu'à 3312kWh / an et une réduction associée de CO<sub>2</sub> (33 tonnes / an) en utilisant un mur Trombe. En outre, le réaménagement de bâtiment est économiquement viable comme la période de récupération esseulement d'environ 7 mois.

### **M.K. Cherier et all (2008) [9]**

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) [10]**

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

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

### **L. Zalewski et all (2010) [11]**

Le but de cet article est de présenter les résultats d'une étude comparative de quatre types de mur solaire. Ces résultats ont été obtenus en utilisant un modèle de simulation numérique. Afin de valider

le modèle, une vaste étude expérimentale a été menée sur un mur solaire composite. La première partie de l'article est consacrée aux caractéristiques particulières des configurations des cartes murs solaires, suivis par une description de l'installation expérimentale, les mesures et l'étude des différents modes de transfert thermique nécessaire pour le modèle pour être validé. La troisième section commence par une brève présentation du principe utilisé pour développer ce modèle, en continuant avec la phase de validation. Le modèle est ensuite utilisé pour étudier l'efficacité des murs solaires dans des endroits différents et sous des conditions climatiques différentes. Ceci est suivi par une analyse de la façon dont ils libèrent la réserve d'énergie et leur performance durant le période d'été. Les résultats de cette étude sont fondamental pour aider les architectes ou chefs des projets à choisir la configuration la mieux adapté pour chaque type de bâtiment.

### **Basak Kundakci Koyunbaba (2011) ;[12]**

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

### **Fakhreddine Abassi et all (2014) [13]**

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 (CRTEn) de BorjCedria. Ce modèle a ensuite été adopté pour l'étude numérique de bâtiments typiques tunisiens. Les résultats de la simulation montrent qu'environ 77% de la demande totale de chauffage d'un simple bâtiment tunisien typique, non isolée, de 16 m<sup>2</sup>, peut être réalisé par un mur Trombe ventilé de 8 m<sup>2</sup>. Une réduction, des charges annuelles de chauffage, de 97% a été atteint par une zone mur

Trombe de 6 m<sup>2</sup> lorsque les murs extérieurs de bâtiment simple considéré étaient des doubles murs isolés par 5 cm de polystyrène expansé.

### **Xiaoqiang Hong, Wei He [14]**

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.

### **1-6 Conclusion :**

Parmi les nouveaux systèmes de chauffage celui qui est développé par le professeur Trombe qui comprend à disposer un mur en maçonnerie lourde orienté sud derrière un vitrage et le munir de deux orifices et qui consiste à chauffer l'air avec le soleil puis le diffuser dans un local. Un procédé technique en phase avec l'architecture bioclimatique, revisité aujourd'hui pour optimiser son efficacité

**CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS THERMIQUE ET  
MUR DE TROMBE**

## 2-1-Introduction :

Dans ce chapitre on va parler sur quelques généralités thermiques  
Et la Description et le fonctionnement de mur trombe en hiver et en été

## 2-2- L'architecture bioclimatique :

La conception architecturale bioclimatique s'inscrit dans la problématique contemporaine, liée à l'aménagement harmonieux du territoire et à la préservation du milieu naturel. Cette démarche, partie prenante du développement durable, optimise le confort des habitants tout en minimisant l'impact du bâti sur l'environnement. Cet ouvrage fait suite aux 2 premiers tomes du guide de l'architecture bioclimatique : "Connaître les bases" et "Construire avec le climat". Les connaissances précédemment développées sont appliquées, dans ce tome 3, aux contextes des climats chauds. L'approche bioclimatique intervient de façon interdépendante à tous les niveaux de la construction et de la vie du bâtiment. Après restitution des données physiques liées aux différents climats chauds, les modes de transferts énergétiques sont exposés ainsi que les paramètres techniques concrets qu'ils induisent dans la construction. Les critères de conception évoluent ensuite graduellement, de l'insertion du projet dans le site à son fonctionnement propre.  
[15]

## 2-3-La conception bioclimatique :

Dans l'architecture bioclimatique, la forme et l'orientation du bâtiment ainsi que le climat local, la topographie et le paysage existant sont pris en compte lors du processus de conception. Des techniques passives de refroidissement, de chauffage et d'éclairage sont également appliquées.

La conception bioclimatique s'adapte aux conditions environnementales du lieu plutôt que d'y travailler. L'utilisation d'isolation thermique, d'énergie renouvelable, de surfaces réfléchissantes et de couleurs pour l'ombrage ne sont que quelques-unes des techniques passives de chauffage, de refroidissement et d'éclairage appliquées dans l'architecture bioclimatique. L'intégration et le fonctionnement sans faille de ces techniques se traduiront par [16] :

- ✓ Consommation d'énergie réduite ;
- ✓ Développement durable ;
- ✓ Impact environnemental moindre
- ✓ Un confort optimal pour les occupants du bâtiment.

### 2-4- L'orientation et l'implantation :

L'objectif est de récupérer au maximum les apports solaires passifs en hiver et de les réduire en été pour respecter le confort d'été. la bonne règle le maximum de fenêtres sera orienté au sud.

Mieux vaut éviter les expositions directes est et ouest qui suivent la courbe du soleil qui occasionne le plus souvent des « surchauffes » et un inconfort visuel. Au nord, il faudra limiter les ouvertures afin de minimiser les déperditions thermiques du bâtiment. De manière générale il est conseillé de respecter un ratio de surface vitré environ 20% de la surface habitable répartie comme suit : 50% au sud, de 20 à 30% à l'est, 20% à l'ouest et de 0 à 10% au nord.

Cette règle est très importante car la bonne maîtrise des apports solaire peut représenter un gain gratuit de 15 à 20% de besoins d'énergie (réduction de la consommation). [16]



Figure 2- 1: orientation d'une maison [16].

## 2-5-L'architecture et la forme :

La compacité d'un bâtiment est mesurée par le rapport entre la surface des parois extérieures et la surface habitable. Plus ce coefficient est faible, plus le bâtiment sera compact. La surface de l'enveloppe étant moins importante, les déperditions thermiques sont réduites.

Elle varie suivant la forme, la taille et le mode de contacts des volumes construits. En effet, la mitoyenneté et l'habitat collectif favorisera la réduction des surfaces de déperditions une très bonne compacité. [16]

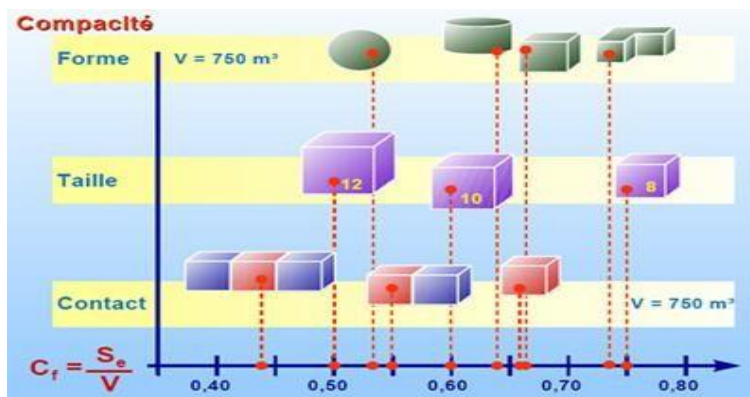


Figure 2- 2 : la variation de compacité suivant la taille, la forme et le mode de contact des volumes construits [16].

## 2-6-La distribution intérieure :

Le zonage d'un habitat permet d'adapter des ambiances thermiques appropriées à l'occupation et l'utilisation des divers espaces.

Au nord on aménagera des espaces non chauffés dits « tampons », type garage, cellier, couloirs... ils assurent une protection thermique et contribuent directement aux économies d'énergies et au confort des occupants. [16]

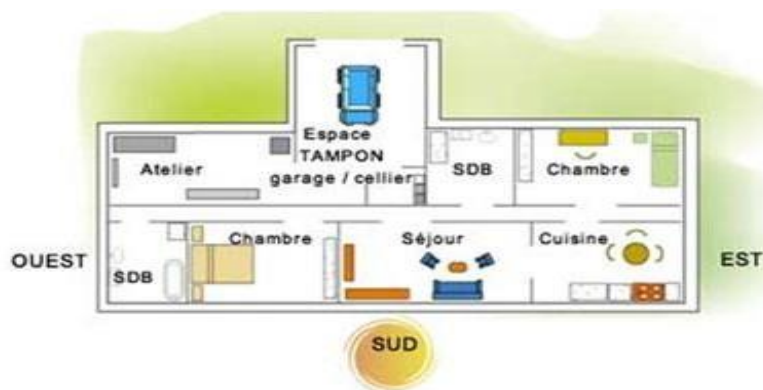


Figure 2- 3 : la distribution des espaces dans une maison bioclimatique [16].

## 2-7 Classification des bâtiments énergétiques efficaces

- **Bâtiment à basse consommation (basse énergie)** : Bâtiment ayant une basse consommation d'énergie pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage, l'eau chaude sanitaire et la ventilation. Pour obtenir cette basse consommation il est privilégié de mettre en place une bonne isolation thermique, une bonne étanchéité, ainsi qu'un mode de chauffage des plus adapté. Ce type de bâtiment ne comprend aucun moyen de production local d'énergie, sans toutefois l'exclure.

- **Bâtiment passif** : Bâtiment à très basse consommation, basé sur des systèmes de chauffage et rafraîchissement actifs, selon le Passiv-Haus Institut, un bâtiment passif produit au moins 70% de ses besoins en chauffage. Il est aussi caractérisé par une grande étanchéité à l'air et le contrôle de la ventilation, ainsi qu'une bonne isolation des murs et des fenêtres.

- **Bâtiment autonome** : Ce type de bâtiment est considéré comme étant énergétiquement indépendant, il produit lui-même la totalité de l'énergie dont il en a besoin et cela en ayant recours aux énergies renouvelables. Ces bâtiments peuvent aussi subvenir à leurs besoins en eau potable et cela en recyclant les eaux usées.

- **Bâtiment à zéro énergie** : Ce type de bâtiment produit autant d'énergie qu'il en consomme sur une période de temps. Il privilégie une production à partir d'énergie renouvelable.

- **Bâtiment à énergie positive** : Bâtiment producteur d'énergie (électrique et thermique), sa production dépasse sa consommation. Le surplus d'énergie peut être soit stocké ou bien injecté dans un réseau électrique pour être vendu.

- **Maison neutre en carbone** : Bâtiment dont le fonctionnement n'induit aucune émission de CO<sub>2</sub>. Une orientation, qui s'inscrit dans la démarche du protocole de Kyoto et qui vise à réduire la participation du bâtiment à l'accroissement de l'effet de serre. La démarche "zéro carbone" est



généralement associée à un mode de vie, cela englobe les modes de déplacement, voire les modes de consommation des occupants du bâtiment. L'une des conséquences de cette démarche est l'utilisation exclusive de ressources énergétiques renouvelables.

- **Bâtiment intelligent** : Le principe est d'utiliser la technologie pour une meilleure gestion de l'énergie, par exemple : des capteurs de température, de présence pour l'éclairage, etc. Cela permet ainsi d'éviter les consommations inutiles.
- **Bâtiment vert (écologique)** : Bâtiment à faible impact environnemental, par exemple les matériaux de construction (bois, argile, laine minérale). [17]

### 2-8- Le confort thermique :

Le confort thermique dans les environnements bâtis en général et plus précisément dans les environnements internes des logements collectifs est devenu une question quotidienne pour les architectes et les techniciens, ce qui a engendré de larges études dans la littérature scientifique, comme l'attestent Rizzo et al. (2004). Ce vieux concept a été discuté depuis les années 1930 (Taleghani et al. 2013), mais avant que nous abordions ce concept du confort thermique en général, il est impératif qu'il soit clairement défini, afin de pouvoir l'évaluer dans la présente recherche. À ce titre, plusieurs pistes de réflexion ont été menées par la littérature scientifique afin de pouvoir définir le confort thermique d'une manière bien précise. Conformément aux normes internationales (ASHRAE55 1992 ; ISO7730 1994), les chercheurs ont généralement défini ce concept comme la condition de l'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique (Fanger 1973 ; Hensen 1990 ; Castilla et al. 2014). De même, Prakash et Ravikumar (2015) sont arrivés à définir cette notion comme l'état de l'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique (Prakash et Ravikumar 2015). En effet, ces deux citations illustrent l'idée selon laquelle le confort thermique reste un aspect essentiel concernant la satisfaction des occupants envers leur environnement (Schellen et al. 2012). En outre, on trouve ainsi que d'autres chercheurs définissent le confort thermique d'une manière un peu différente. À titre d'exemple, Hensen (1991) signale que le confort thermique est un état dans lequel il n'y a pas d'impulsions qui conduisent à corriger l'environnement de l'occupant par son comportement.

## 2-9- Les six paramètres qui influents sur le confort thermique :

Le confort thermique est traditionnellement lié à 6 paramètres :

1. Le métabolisme, qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de  $36,7^{\circ}\text{C}$ . Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.
2. L'habillement, qui représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.
3. La température ambiante de l'air  $T_a$ .
4. La température moyenne des parois  $T_p$ .
5. L'humidité relative de l'air (HR)
6. La vitesse de l'air, qui influence les échanges de chaleur par convection. Dans le bâtiment, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas  $0,2 \text{ m/s}$ . [18]

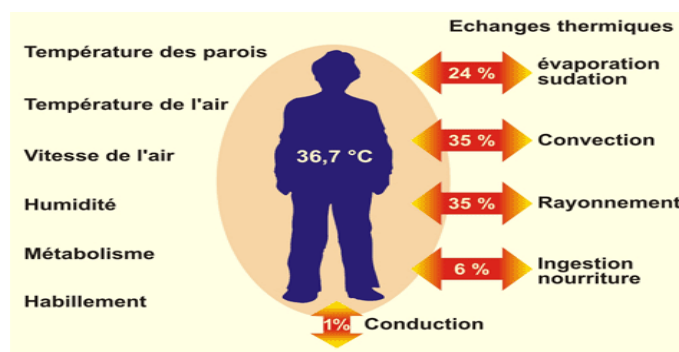


Figure 2- 4: les paramètres du confort thermique et l'échange thermique du corps humain [18]

## 2-10-Facteur influant sur le confort thermique lié aux conditions climatiques :

### 2-10-1 L'ensoleillement :

L'ensoleillement est un facteur climatique dont on a intérêt à tirer parti (de manière passive, via les ouvertures vitrées, ou de manière active pour produire de l'énergie) mais dont on doit aussi parfois se protéger pour éviter les surchauffes en été. [19]

- Il faut assurer un bon ensoleillement surtout le matin en hiver pour profiter de l'énergie solaire à travers la conductivité ; convection et rayonnement qui permet d'assurer un confort thermique et affecté l'hygiène.
- penser à démunir l'influence de l'ensoleillement sur la construction en été par l'utilisation de protections fixes (pare-soleil, vitrage réfléchissant, les porche, véranda, persiennes, les écrans végétaux et aussi les bâtiments voisins) et éviter l'éblouissement.
- Une température ambiante de 18 à 20 °C. Par exemple l'orientation sud bénéficie d'un ensoleillement maximal en hiver et minimale en été.

### 2-10-2-Compositions du rayonnement solaire :

- **Le rayonnement solaire** : Le rayonnement solaire est défini comme le déplacement de l'énergie sous forme de radiation solaire, cette radiation solaire transmet la chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques constituant ainsi le spectre solaire. Comme le rayonnement solaire traverse l'atmosphère terrestre, son intensité est diminuée et la distribution spectrale est modifiée par l'absorption, la réflexion et la diffusion. Le rayonnement global arrivant sur une surface se décompose en : [20]
- **Rayonnement direct** : le rayonnement direct issu directement du soleil qui est défini en intensité, en sens et en direction. Il peut donc être représenté sous forme vectorielle.
- **-Rayonnement diffus** : le rayonnement diffus issu de l'atmosphère (et du phénomène de diffusion) qui explique que l'on reçoit de l'énergie solaire sur terre (lumière et chaleur) même lorsque le soleil est caché par les nuages.
- **-Le rayonnement réfléchi** : qui correspond à la réflexion des rayonnements direct et diffus par le sol

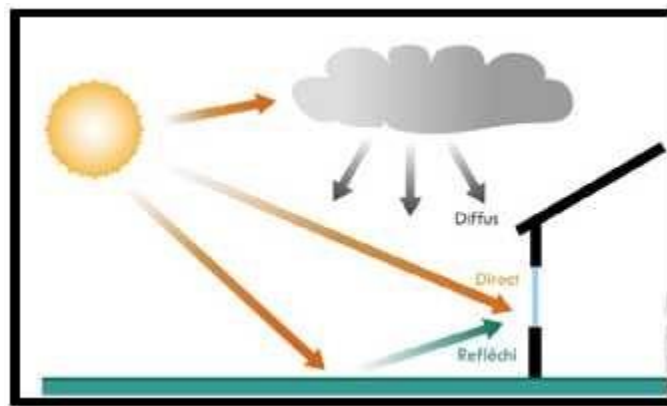


Figure 2- 5: Parties incidentes du rayonnement solaire

La qualité totale d'énergie arrivant sur une surface est appelée énergie globale (ou énergie incidente globale). Elle dépend principalement de [21] :

- l'intensité du rayonnement solaire et de la nébulosité.
- l'angle entre le rayonnement solaire direct et la surface de la paroi.
- la nature des surfaces avoisinantes.
- intensité du rayonnement solaire sur une paroi.
- le flux solaire intercepté par une paroi.

**Les gains solaires :** Les gains solaires peuvent être des sources de surchauffes et d'éblouissement dans les bâtiments en saison chaude. Les contrôler permet d'améliorer le confort thermique et visuel en réduisant les surchauffes et les risques d'éblouissement, tout en assurant l'intimité. La modulation des gains de chaleur solaires entrant dans un bâtiment est permise par :

- L'orientation et la géométrie des ouvertures,
- Les dispositifs de protection solaire,
- Le contrôle des propriétés solaires et optiques des éléments opaques et transparents. [22]

**Influence des gains solaires :** Le rayonnement solaire effectif qui atteint la terre dépend du climat local, notamment de la nébulosité, et son intensité varie selon l'orientation et l'inclinaison de la paroi ensoleillée.

Le soleil peut contribuer au chauffage des bâtiments en hiver, par effet de serre, au droit des parois vitrées. Cependant, les gains solaires ne sont pas toujours utiles car en été, il convient de s'en protéger. La figure ci-contre illustre la quantité de rayonnement solaire qui traverse un double vitrage par ciel serein. On constate que les apports solaires sont maximaux sur la face SUD en hiver et en entre-saison. Par contre, ils sont maximums sur la face EST en début de journée et sur la face OUEST en fin de journée en été. Ces gains solaires en été provoquent des surchauffes.

Les ouvertures verticales orientées au sud offrent donc la meilleure capacité de régulation passive puisque celles-ci sont optimales dans le captage en hiver et durant l'entre-saison et que durant l'été elles captent moins de rayonnement solaire que celles orientées vers l'EST ou l'OUEST. [23]

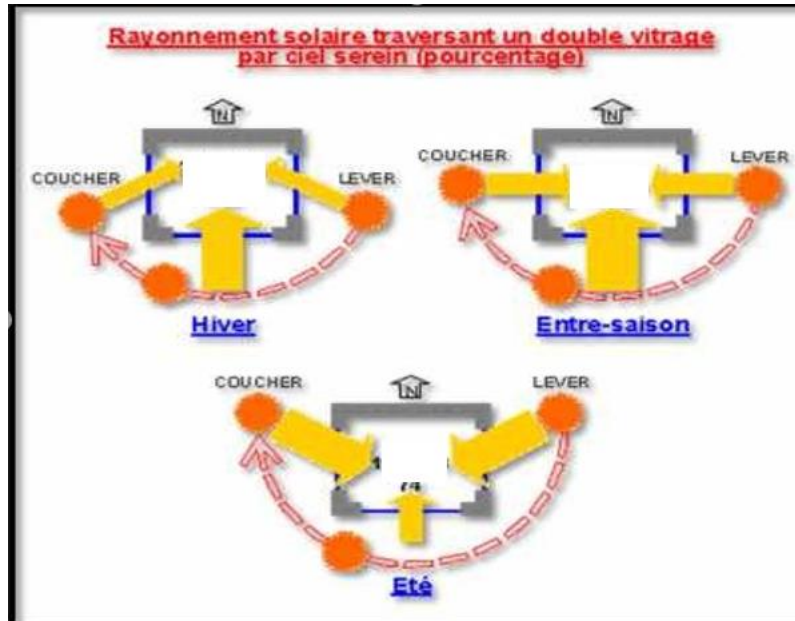


Figure 2- 6: Rayonnement solaire traversant un double vitrage

**Gains solaires par la fenêtre :** Selon la saison, les gains solaires seront à rechercher ou à éviter. En hiver, ils limitent la demande de chauffage, tandis qu'en été, ils risquent de provoquer une surchauffe. Pour du logement, on privilégiera les gains solaires hivernaux, tout en laissant une possibilité d'ombrage extérieur en été. On privilégiera donc de grandes ouvertures au sud. De plus, en façade Sud, une protection solaire efficace peut être réalisée par un auvent ou un balcon pour éviter la surchauffe en été. Cela ne diminuera pas les gains gratuits en hiver. Pour les protections solaires, l'idéal est de disposer d'éléments mobiles (volets, stores enroulables, etc.). Remarquons que les risques de surchauffe sont réels et peuvent être vécus très péniblement ; pour plus d'information sur les protections solaires. [24]

## 2-11-La température ambiante (ou de consigne)

C'est le premier critère qui vient à l'esprit, qui même s'il est déterminant, n'est pas le seul. Pour obtenir un confort thermique satisfaisant, il faut paramétrer une température de consigne suffisante. On a l'habitude de dire que la température ambiante de confort se situe entre 19°C et 20°C. Attention à ne pas surchauffer car passer de 20°C à 21°C entraîne une surconsommation d'énergie d'environ 7%. La nuit et en période d'inoccupation, cette température pourra être abaissée de 2 à 3°C grâce à la régulation du chauffage.

## 2-12-La température des parois

La température des parois a une grande influence sur la température ressentie. Pour calculer simplement la température ressentie, il faut faire la moyenne entre la température des parois et la température ambiante. Par exemple, pour une température d'ambiance de 20°C :

- Cas n°1 : Température de paroi de 16°C : la température ressentie sera de 18°C
- Cas n°2 : Température de paroi de 19°C : la température ressentie sera de 19,5°C

Pour une même température de consigne, le confort thermique sera insuffisant dans le cas 1 et satisfaisant dans le cas 2. Pour augmenter la température des parois, il convient d'isoler correctement son logement en limitant le plus possible les ponts thermiques. Il faut également mettre en place des vitrages performants dont la pose aura été soignée.

## 2-13-Le mode chauffage

### 2-13-1-La production de la chaleur

Dans le cas d'un chauffage par convection, l'air en mouvement est utilisé pour transférer la chaleur du système de chauffage vers les occupants. De fait, l'air chaud remonte et l'air froid reste au niveau du sol. En conséquence, il se crée une stratification de l'air (plus chaud en haut qu'en bas) qui provoque un inconfort thermique (froid aux pieds). De plus, le chauffage par convection tend à assécher l'air, ce qui peut être désagréable. On trouve parfois un humidificateur d'air accolé au convecteur pour limiter ce ressenti (réserve d'eau liquide). Aussi, les convecteurs peuvent accentuer la sensation de courant d'air qui provoque de l'inconfort et oblige à chauffer plus. Enfin, ces éléments de chauffage sont très chauds (autour de 90°C sur le corps de chauffe), ce qui peut poser des problèmes de sécurité chez les enfants. Les « convecteurs » (ou « grilles pains ») ou autres « soufflants » sont donc à éviter notamment quand les volumes à chauffer sont importantes.

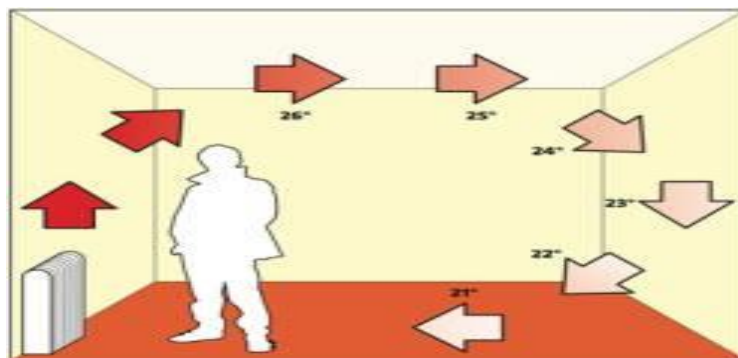


Figure 2- 7: production de la chaleur

Dans le cas d'un chauffage par rayonnement, ce sont des ondes infrarouges qui sont utilisées pour transférer la chaleur du système de chauffage vers les occupants. Il y a peu de stratification de l'air et le confort thermique est meilleur. Parmi les chauffages par rayonnement, on peut citer : le plancher chauffant, les poêles de masse (à restitution lente de la chaleur), les radiateurs électriques à inertie et les radiateurs à eau.

Il existe des modes de chauffage qui utilisent à la fois la convection et le rayonnement, ils apportent un confort thermique satisfaisant. On peut citer : les panneaux rayonnants et les poêles à granulés.

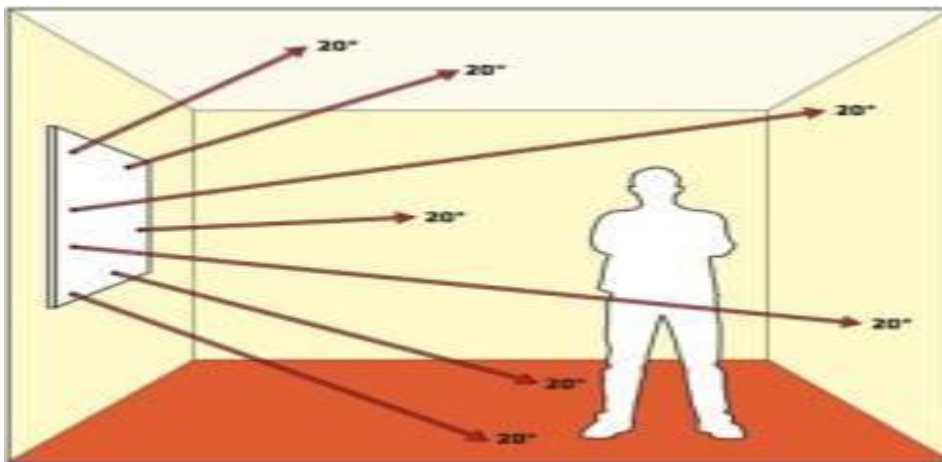


Figure 2- 8: chauffage par rayonnement

### 2-13-2 Les variations de températures

Le confort thermique est meilleur lorsque l'amplitude des températures est faible. On peut considérer qu'une amplitude de  $1^{\circ}\text{C}$  est acceptable. Par exemple, vous réglez la température de consigne à  $20^{\circ}\text{C}$ . Le chauffage va produire de la chaleur jusqu'à atteindre  $20.5^{\circ}\text{C}$ , puis ne se remettra en route qu'à  $19.5^{\circ}\text{C}$ . Pour lisser au mieux les températures, il faut mettre en place une régulation efficace. Dans les faits, tous les modes de chauffage ne sont pas capables d'une régulation si fine. Pour les poêles à granulés notamment, on accepte une amplitude de  $2^{\circ}\text{C}$ . En été, des protections solaires couplées à une forte inertie thermique évitent les surchauffes.

## 2-13-3-La distribution de la chaleur

Une bonne homogénéité de la température entre les pièces améliore le confort thermique. Cette harmonie est plus facile à atteindre lorsqu'il y a plusieurs émetteurs de chaleur (des radiateurs dans chaque pièce). Dans le cas d'un unique point chaud, comme un poêle à granulés, les températures sont moins homogènes. De ce fait, il faut limiter la surface chauffée par ces systèmes. A titre d'exemple, la Réglementation Thermique 2012 limite l'usage d'un poêle à granulés à une surface de 100m<sup>2</sup> afin d'obtenir une régulation correcte des températures.

## 2-13-4 L'humidité relative de l'air (hygrométrie)

Un taux d'humidité situé entre 40% et 60% permet un bon confort thermique. Avec un taux d'humidité élevé, on aura tendance à augmenter la température de consigne (surconsommation d'énergie). A l'inverse, on aura tendance à diminuer la température de consigne dans un environnement plus sec. (maisons RT 2012 notamment) mais il n'est pas recommandé de descendre en dessous de 40%. Pour réguler au mieux l'humidité, il est nécessaire de mettre en place une ventilation mécanique contrôlée

## 2-13-5 Les mouvements d'air

Les mouvements d'air accentuent les échanges de chaleur par convection. Par exemple, quand la météo affiche une température réelle de 0°C, la température ressentie peut être de -7°C sous l'effet du vent. L'homme perçoit les mouvements d'air à partir d'une vitesse de 0.2m/s (0,7 km/h). Pour éviter ces flux d'air, on peut mettre en place une ventilation mécanique qui assure une vitesse de l'air assez faible. Cette vitesse est plus difficile à gérer dans le cas d'une ventilation naturelle. Le choix du chauffage est également important (les convecteurs renforcent les mouvements d'air), de même qu'une bonne étanchéité à l'air du bâtiment, en particulier au niveau des ouvrants.

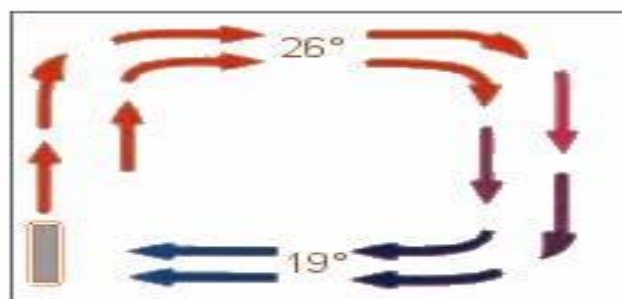


Figure 2- 9: Les mouvements d'air



## 2-13-6 L'occupant

En fonction de sa sensibilité, de son activité et de sa tenue, l'occupant va également avoir une influence sur le confort thermique. Plus l'occupant a une activité physique soutenue et plus il est habillé chaudement, plus la température de consigne pourra être faible. Porter des pulls en hiver est donc un bon moyen de faire des économies d'énergie ! La sensibilité de chacun est également à prendre en compte. L'âge est une variable importante de ce ressenti (jeunes enfants et seniors notamment)



Figure 2- 10 : L'occupant

## 2-13-7 Le bon confort thermique

En définitive, c'est l'occupant du logement lui-même qui est le plus apte à définir le « bon » confort thermique. Ce confort thermique résulte de nombreux paramètres comme les températures d'ambiance et des parois, les modes de chauffage, le taux d'humidité ou les mouvements d'air. Pour obtenir un confort thermique satisfaisant, il faut agir au niveau du bâti, des systèmes et des occupants. Au niveau du bâti, une isolation suffisante et des fenêtres performantes évitent le phénomène de parois froides et diminuent les mouvements d'air. Au niveau des systèmes, une température de consigne autour de 19-20°C couplée à une bonne régulation et l'utilisation d'une VMC hygroréglable améliorent le confort thermique, tout en limitant les consommations d'énergie. Enfin, au niveau des occupants, une tenue adaptée à la saison est indispensable. [25]

## 2-14 Etude de mur de 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 basé 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. Le mur Trombe est un système simple et intéressant de captage de l'énergie solaire. Il est constitué d'un mur vertical en maçonnerie lourde orienté vers les sud et muni de deux orifices permettant la circulation de l'air entre le local et la serre formée par la surface réceptrice du mur et le vitrage qui le précède. Le mur capteur transmet l'énergie solaire captée par deux moyens, une partie est transmise par conduction à travers le mur qui la restitue à l'intérieur du local par convection, alors que la deuxième partie se transmet par la circulation naturelle de l'air chaud se trouvant dans la cheminée solaire à travers les orifices. [26]

## 2-15 Description de mur trombe :

La paroi de stockage thermique est une construction composite, se compose d'une paroi thermique et une surface transparente (généralement en verre) sur la partie externe sur une distance de 3 cm à 12cm. La surface extérieure de la paroi est généralement peinte en noir afin de maximiser l'absorption du rayonnement solaire.

Des murs de stockage thermique, les murs massifs sont considérés comme ceux-ci, qui sont construits avec des blocs de béton ou en béton, des briques et des pierres. Pour l'occasion spéciale qui est construits pour contenir les navires en acier, en plastique ou de l'eau en béton sont appelés murs d'eau ou des bancs d'eau. Le fonctionnement de la paroi de stockage thermique a été étudié en détail en France. Professeur Félix Trombe (du centre de recherche C.N.R.S.) et l'architecte J.Michel, ont étudié un système de mur de stockage thermique avec des trous, connu sous le nom Trombe. Le mur qui a été appliqué en 1956 dans les premiers, expérimentaux, les maisons solaires à Odeillo sur Pyrénées françaises, sur une altitude de 1820 m. Sur la partie supérieure et la partie inférieure une partie du mur il y a des trous qui permettent la circulation de l'air. Le fonctionnement du système est basé sur l'effet de thermosiphon, et il est réalisé avec la circulation d'air entre le verre et la paroi, à travers les trous, et la différence de température. Le succès du système repose sur sa simplicité technologique, l'installation des contrôles thermiques, son efficacité et le faible coût relatif de la construction [28]

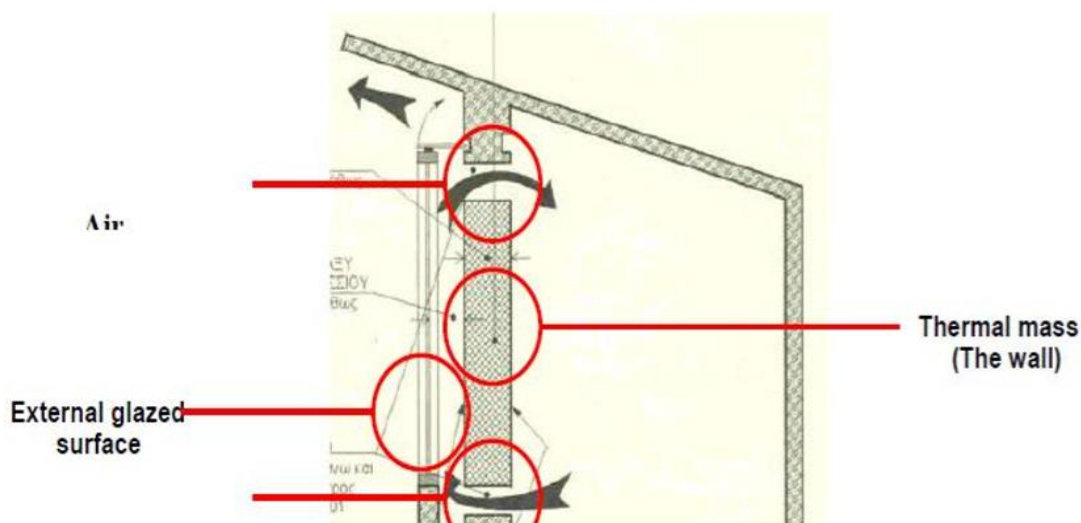


Figure 2- 11: Description d'un mur Trombe thermique

## 2-16 Principe du mur Trombe :

Il s'agit d'un vitrage suivi d'une lame d'air et d'un mur en béton. Des ouvertures hautes et basses sont réalisées dans le mur afin de créer une circulation d'air par thermosiphon entre la lame d'air et l'air du local à chauffer.

L'air chauffé dans la lame d'air pénètre par les ouvertures supérieures dans la pièce. Il se refroidit au contact de l'air du local et, une fois rafraîchi, revient par les ouvertures inférieures dans la lame d'air. En l'absence de rayonnement solaire, le flux convectif s'inverse pouvant provoquer un refroidissement accéléré de la pièce. Pour éviter cela, il est alors nécessaire de disposer des clapets à fermeture manuelle ou automatique. [27]

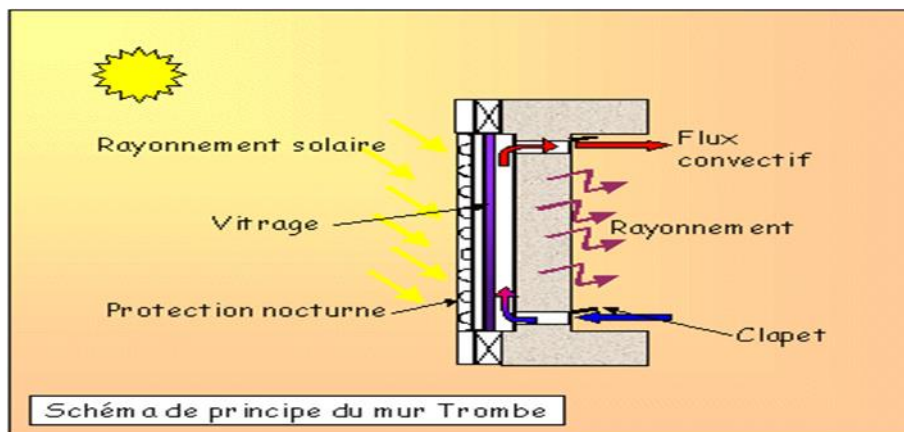


Figure 2- 12: Schéma de principe du mur Trombe

## 2-17 Fonctionnement de la paroi thermique en hiver :

Le concept de la paroi thermique est lié à la paroi du thermosiphon, dans lequel l'air chaud qui est entre le verre et le mur est en train de changer avec l'air généralement plus frais qui se trouve dans l'espace derrière le mur. Le procédé qui est suivi est le suivant : Pendant la journée, quand le soleil frappe la surface transparente ; le rayonnement solaire traverse le verre et atteint la surface sombre de la paroi. Une partie de la chaleur produite est absorbée par le mur et est rayonnée à l'intérieur, tandis que le reste est se trouver piégé dans l'espace entre le verre et le mur. Selon la deuxième loi de la thermodynamique partie de la chaleur produite est consommée sur le chauffage de l'air plus froid qui est entre le verre et le mur et l'air plus chaud à tendance à se soulever. Jusqu'à présent, le processus est similaire pour tous les types de murs solaires (masse, l'eau, les murs de Trombe).

L'innovation du mur Trombe est qu'il a été conçu avec des événements dans la partie supérieure et la partie inférieure de la paroi pour permettre à l'air de circuler. La circulation de l'air est basée sur le mouvement de l'air chaud qui sort de la ventilation supérieure à l'espace derrière le mur. En même temps, refroidisseur d'air par les événements inférieurs tend à combler le vide d'air créé.

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

[29]

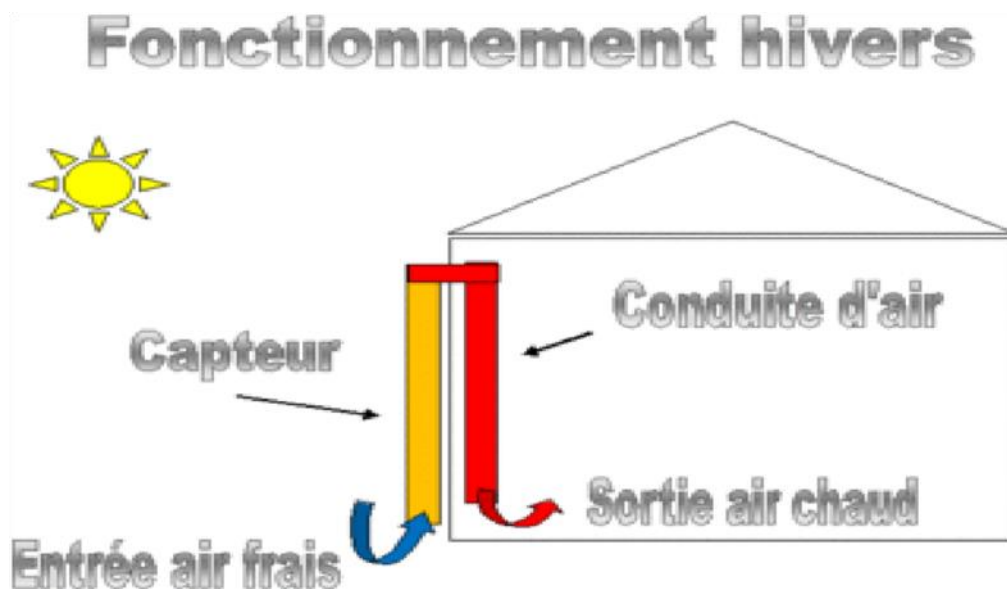


Figure 2- 13 : Fonctionnement hiver

### 2-18 Fonctionnement de la paroi thermique en été :

La plupart des systèmes solaires passifs pourraient être désactivés pendant l'été, ou fonctionnent au verso ; fournir de refroidissement au lieu de chauffage. Par conséquent, la paroi thermique, avec ou sans événements, (mur de masse) offrent la possibilité de refroidissement en été, opérant à cet effet de trois façons :

- Fournir ombrage et pratiquement la suppression de la possibilité de stockage thermique. Cela pourrait se produire à la fois de masse ou d'un mur Trombe.
- Retrait de l'air chaud en ouvrant les grilles supérieure et inférieure du vitrage de la paroi thermique.
- La création d'un flux d'air qui pourrait être généré par l'ouverture de l'orifice supérieur du vitrage et l'orifice inférieur de la paroi. De telle sorte qu'il crée l'effet de "cheminée solaire". En enlevant l'air entre le vitrage et le mur, une faible pression d'air, il crée qui aspire l'air intérieur à l'extérieur. [29]

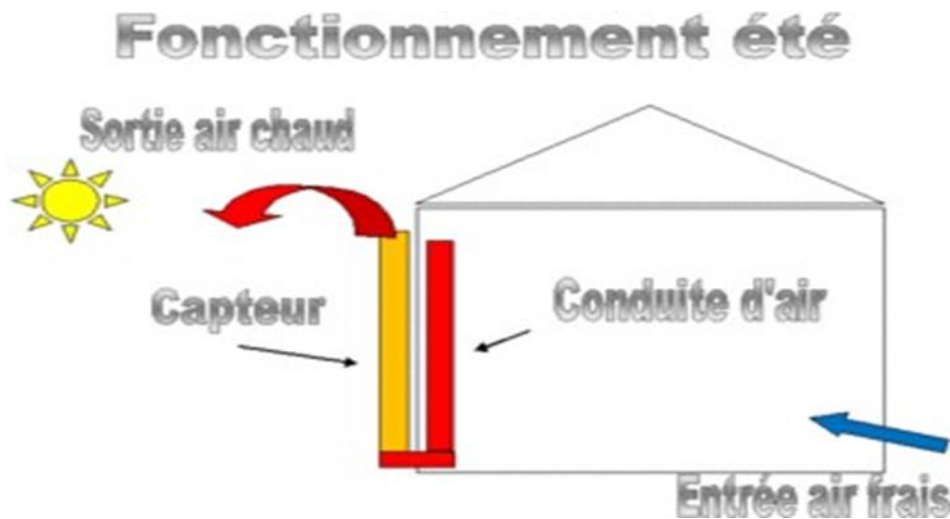


Figure 2- 14 : fonctionnement en été

### 2-19 Calcul de l'inertie thermique

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

Ce phénomène est très intéressant dans l'habitat :

Les murs épais et massifs permettent de réguler la température sur un cycle de 24h, mais aussi à l'échelle des saisons, de vivre toute l'année dans une ambiance thermique confortable et relativement constante.

Lors des pics de chaleur (ou de froid), la température intérieure ne varie pas, ou très peu.

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

### 2-20 Circulation de la chaleur

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

Où :

V : vitesse d'écoulement d'air (m/s)

d : densité de l'air (kg / m<sup>3</sup>)

C<sub>p</sub> : chaleur spécifique de l'air (kJ /kg .K)

T<sub>so</sub> : température de sortie d'air (K)

T<sub>e</sub> : température d'entrée d'air (K) [30]

## 2-21 Radiation

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

Où :

e : Facteur d'émission des murs intérieurs

σ : Stefan-Boltzmann constant (20.41×10<sup>6</sup> kj/h<sup>2</sup>k<sup>4</sup>)

T<sub>f</sub> : Température de la surface intérieure de la paroi Trombe

T<sub>ref</sub> : Température moyenne des parois (surface des murs à l'intérieur ) [30]

## 2-22 Masse thermique du mur trombe

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

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

Analytiquement :

- 60 cm de béton : 14 – 16 heures

- 45 cm de béton : 11 – 12 heures

- 37 cm de béton : 9 - 10 heures

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

Un autre facteur important de la transmission de la masse thermique est le coefficient d'émissivité de la surface interne. [30]

## 2-23 Stockage thermique

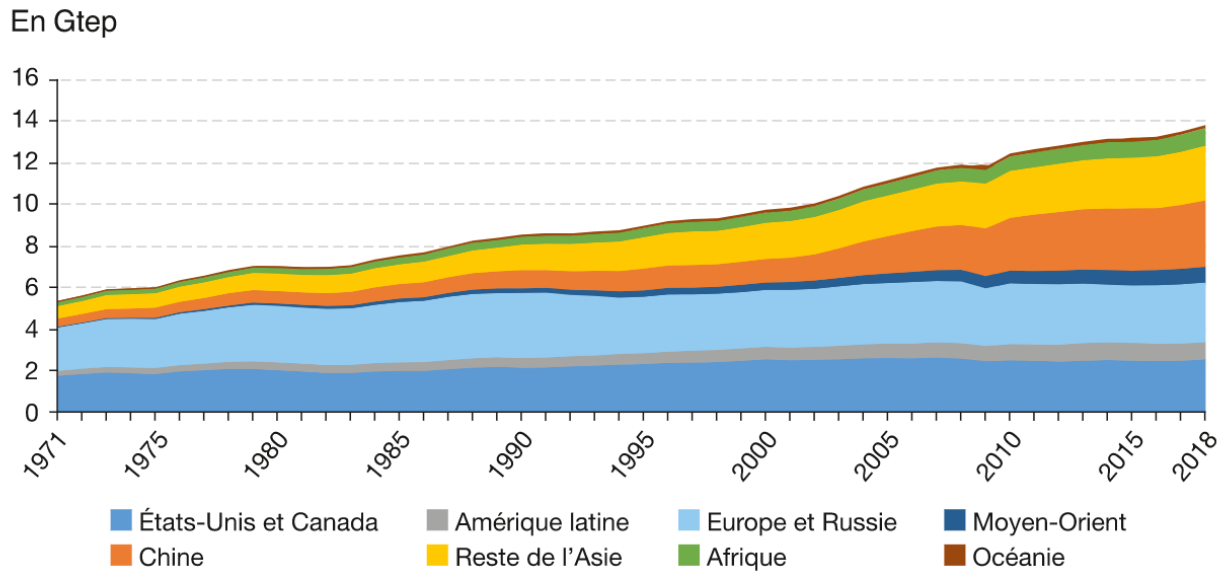
### 2-23-1 Intérêt de stockage thermique :

Basé sur un certain nombre de technologies qui stockent l'énergie thermique dans les dépôts de stockage d'énergie pour une utilisation ultérieure. L'énergie stockée dans l'équation de la demande d'énergie est utilisée entre le jour et la nuit. Le stock de chaleur peut être stocké à une température plus élevée (plus chaude) ou plus basse (plus froide) que la température ambiante. Une des utilisations de l'énergie stockée aujourd'hui est la production de glace ou d'eau refroidie ou de solutions solubles la nuit ou l'eau chaude, qui est ensuite utilisée dans des environnements froids ou chauds pendant la journée. Par exemple le stockage de chaleur dans les Plancher et pour le réchauffer.

Le développement économique, aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement est directement lié à l'énergie. Ainsi, la demande énergétique mondiale augmente constamment ce qui est du à l'accroissement rapide de la population et l'augmentation du niveau de vie. La figure 2-7 donne un aperçu de l'évolution de la consommation mondiale en énergie primaire pour des années entre 1971 et 2012. Entre 1973 et 2012, la consommation d'énergie dans le monde a presque doublé (+ 92%). Cette évolution est due à la consommation des pays anciennement industrialisés, représentés par le groupe des pays de l'OCDE, et des nouvelles économies qui sont en forte croissance [31].

La Chine, exemple des nouveaux pays industrialisés, a vu sa consommation d'énergie plus que tripler de 1990 à 2008. Sa part dans la consommation mondiale a doublé et elle est passée de 7,5% à 16,4%. La consommation de l'Afrique a augmenté de 50% de 1990 à 2008, mais elle est restée marginale dans la consommation mondiale (environ 5,7% pour plus de 15% de la population mondiale) [32].

La solution de ces problèmes mentionnés ci-dessus est donc de stocker la chaleur produite par l'énergie solaire lorsque celle-ci est en excès. Le stockage thermique est reconnu comme facile à utiliser et combine de hauts rendements, de grandes capacités de stockage et des faibles coûts [34].



*Figure 2- 15: la consommation mondiale d'énergie [33]*

Il permet d'atteindre l'objectif de production à 100% en énergie issue du solaire et de rendre la production de la chaleur constante et indépendante de la disponibilité du rayonnement solaire. De plus, il constitue un aspect important des centrales solaires et permet de prolonger au maximum leur période de fonctionnement et augmenter leur facteur de capacité.

### 2-23-2 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 [35].

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'air<sup>1</sup>. 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 [35] :

- ballon d'eau
- lit de pierres
- mur porteur.

## 2-23-3 Stockage par ballon d'eau :

Le schéma de principe d'une telle installation est donnée à la figure 2-15. 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 [35].

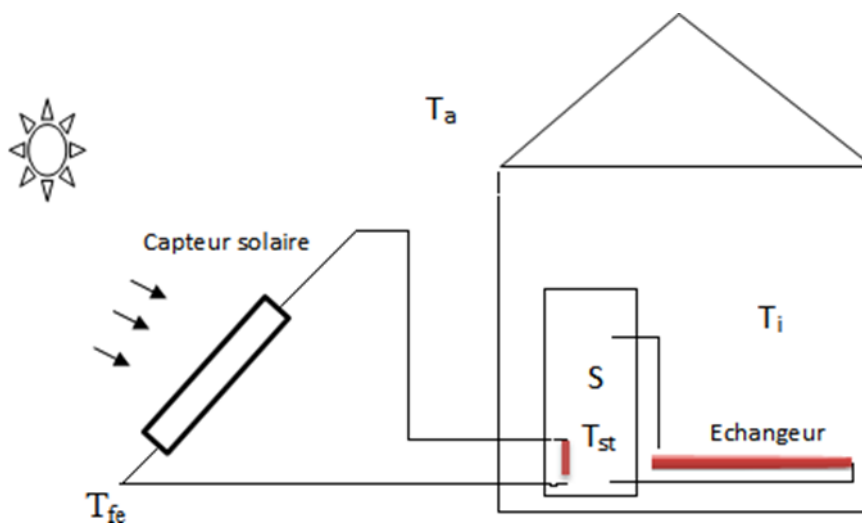


Figure 2- 16 : Schéma d'une installation de chauffage solaire à eau.

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.

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  $T_{\text{min}}$  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  $T_{\text{max}}$  (70° par exemple). Dans certains configurations, on peut être amené à rejeter une partie de l'énergie solaire qui ne peut être stockée.

### 2-23-4 Stockage par lit de galets :

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

Le schéma de principe d'une telle installation est donné ci-dessous.

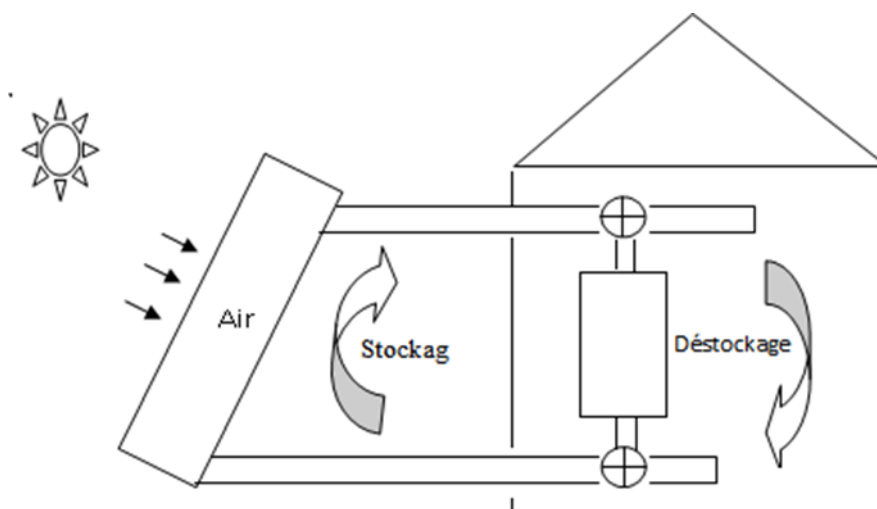


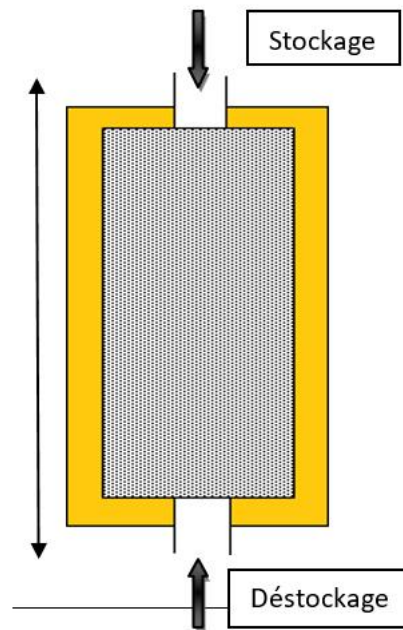
Figure 2- 17 : Schéma d'une Installation de chauffage à air

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 [35]:

-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 m<sup>2</sup> de capteurs convient. La longueur L ne doit pas être trop importante à cause des pertes de charge. Les grandeurs habituelles vont de 1 à 3m.



*Figure 2- 18 : Schéma d'un lit de galets avec le sens d'écoulement de l'air en stockage et en déstockage*

- Quand au débit d'air qui circule dans les capteurs, un déstockage. Valeur de 40 m<sup>3</sup>/h et par m<sup>2</sup> 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.

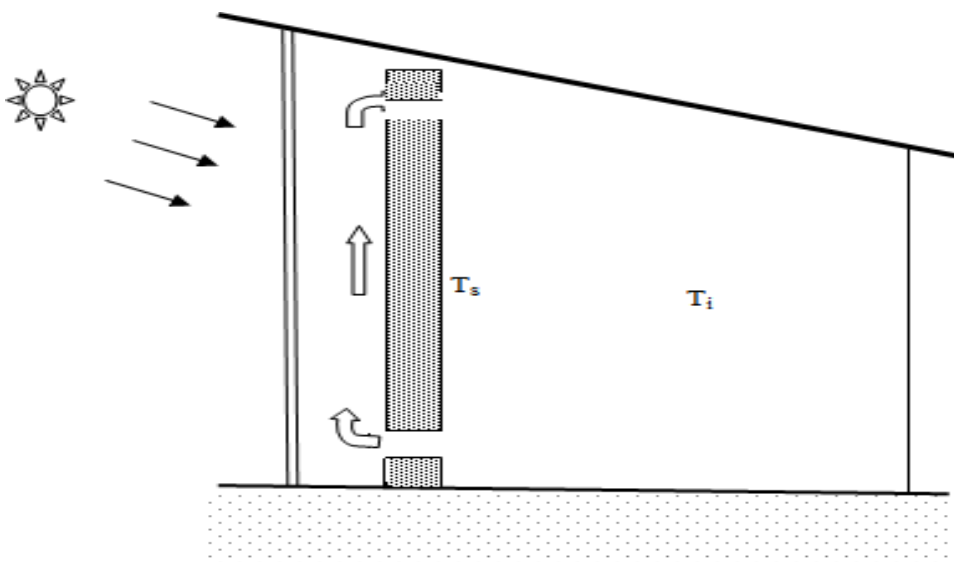
Le coefficient d'échange de chaleur entre les galets et l'air peut être caractérisé par un coefficient volumique, noté  $h_v$  (en W/m<sup>3</sup>.k), dont une expression expérimentale a pu être donnée par Lof et Hawley en 1948 [35] :

$$h_V = 650 \left( \frac{\rho_f V}{S D_g} \right)^{0,7} \quad (2.3)$$

Avec :  $\rho_f$       masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)  
            $V$         débit volumique de l'air (m<sup>3</sup>/s)  
            $S$         section droite du stockage (m<sup>2</sup>)  
            $D_g$       diamètre moyen des galets (m)

**2-23-5 Stockage par mur capteur :**

Une autre possibilité de stockage de l'énergie solaire est d'utiliser la structure même de l'habitation, comme par exemple un mur en béton (figure 2-18). 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 2- 19 : 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 [35]

## 2-24 Thermo circulation

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

Le mur collecteur transmet l'énergie solaire collectée par deux moyens, une partie est conduite par conduction à travers le mur et renvoyée à l'intérieur du local par convection. La seconde partie est transmise par la circulation naturelle de l'air chaud trouvée dans la cheminée solaire à travers les ouvertures. Le débit de cet air peut être calculé à partir de la relation suivante : [36]

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

Avec :

m : débit massique (Kg/s)

$A_d$  : surface du canal ( $m^2$ )

H : distance entre les orifices (m)

g : constante gravitationnelle ( $m/s^2$ )

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

$T_{in}$  : température d'entrée (K)

C : chaleur spécifique (J/Kg.K)

Deux approches différentes pour le calcul de température le long de la cheminée solaire ont été utilisées. Les deux résultats expérimentaux ont été tirés d'un essai en Toscane en Italie sur un local qui présente les caractéristiques suivantes : [37]

Surface du mur Trombe : 32.5  $m^2$

Epaisseur du mur Trombe : 60  $cm$

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

Volume de la pièce : 244  $m^3$

### Première approche :

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT_m}{dt} = hc \cdot (T_1 - T_m) + hc \cdot (T_g - T_m) \quad (2.5)$$

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

[38]

Avec :

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

$T_1$  : température de la vitre (K)

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

### Deuxième approche :

La variation de  $T_m$  est supposée être non linéaire [28]

$$T_m = T_{in} + \left( \frac{2 \cdot T_{in} - (T_1 - T_g)}{2} \right) \cdot \left( -\frac{m C_p}{2 \cdot h_c \cdot A} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot h_c \cdot A}{m C_p}\right) - 1 \right) \quad (2.6)$$

Avec :

$A$  : surface du mur trombe ( $m^2$ )

Afin de recommander celle qui se rapproche le mieux avec la réalité, nous avons

Procédé à un travail de simulation, le modèle analogique est représenté sur la figure 2-16.

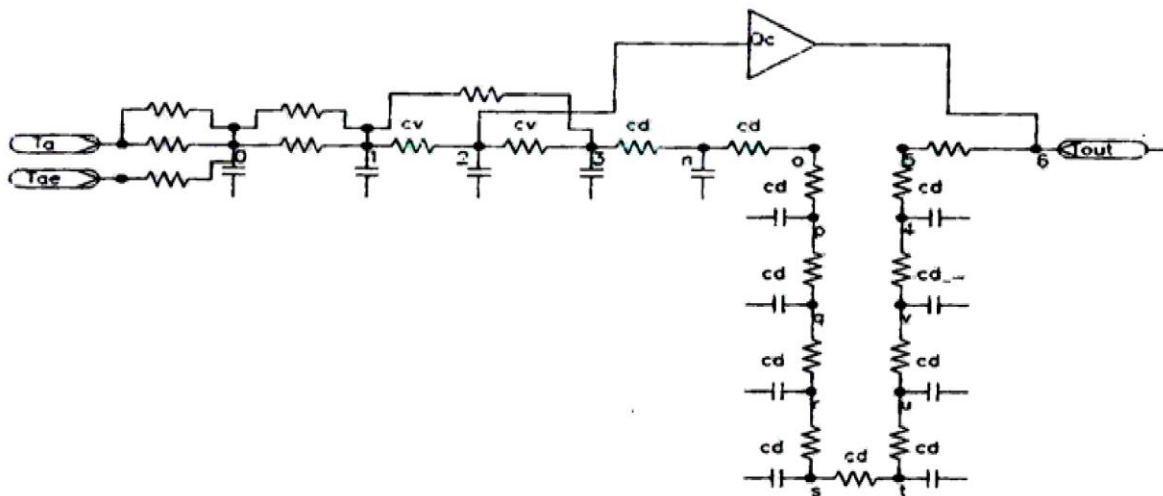


Figure 2- 20 : Schéma électrique du mur [39]

Il en ressort d'après la figure-2-20 (dessus) que l'approche théorique considérant une variation linéaire de la température le long de la cheminée solaire surestime le débit échangé au cours du cycle

thermique est différent du deuxième et la valeur donnée par le second débit est proche du résultat réel

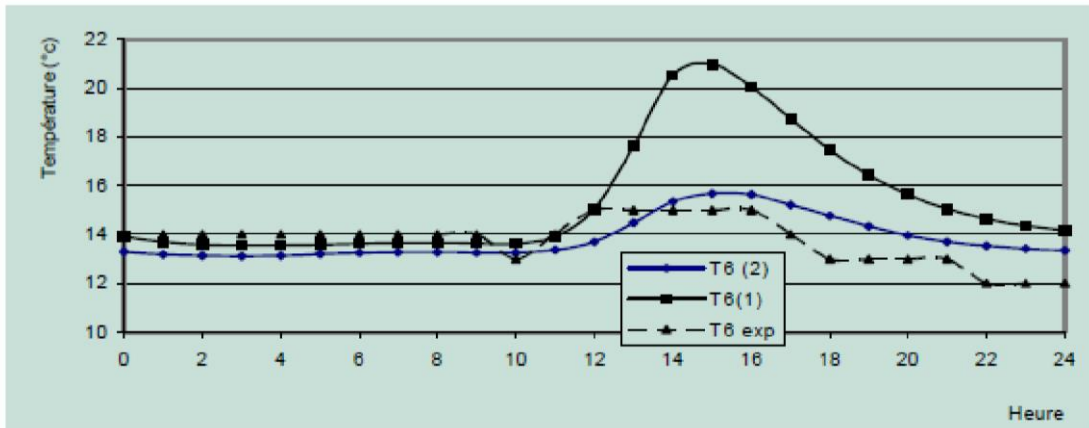


Figure 2- 21 : Evolution de la température interne du local avec deux méthodes pour l'évaluation du flux échangé par thermo circulation [40]

Tableau 2- 1 : Flux par thermo-circulation

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

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

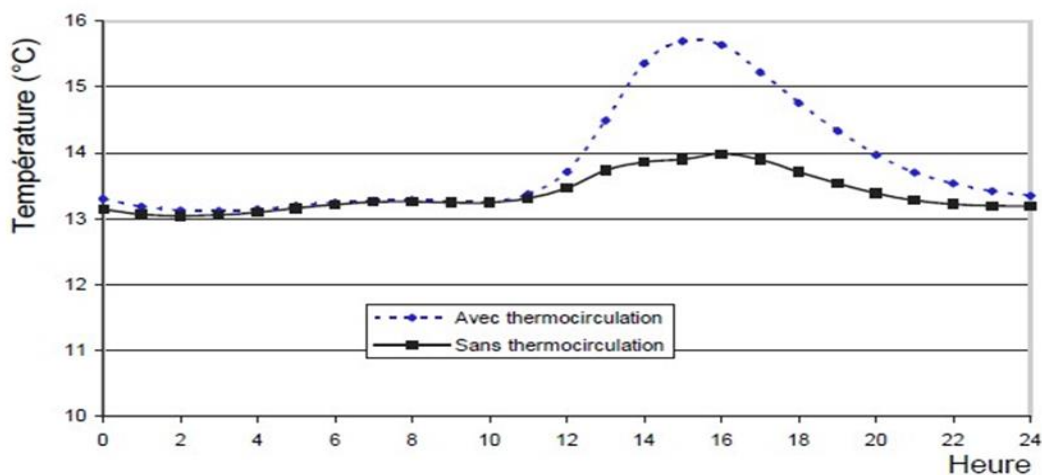


Figure 2- 22 : Influence de la thermo circulation sur la température interne du local

## 2-25 Performance du mur trombe (nord de l'ALGERIE)

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

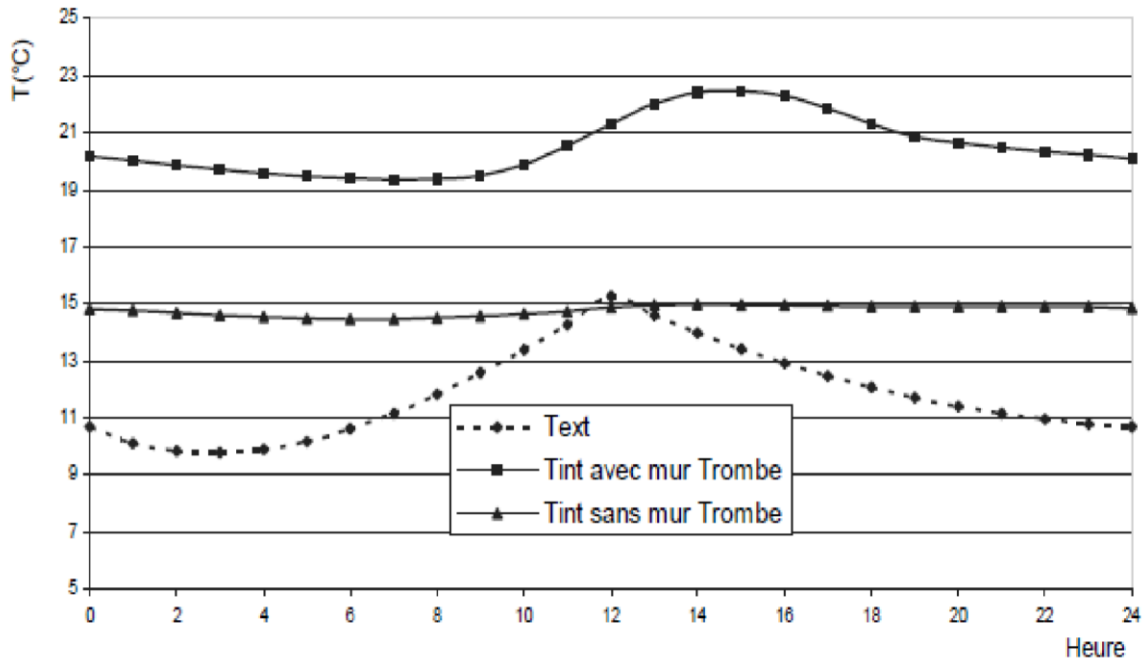


Figure 2- 23 : Evolution de la température du local en hiver [40]

## 2-26 Effet des dispositifs des protections solaires

Pour maintenir le local frais pendant les journées chaudes d'été il est nécessaire de prévoir une

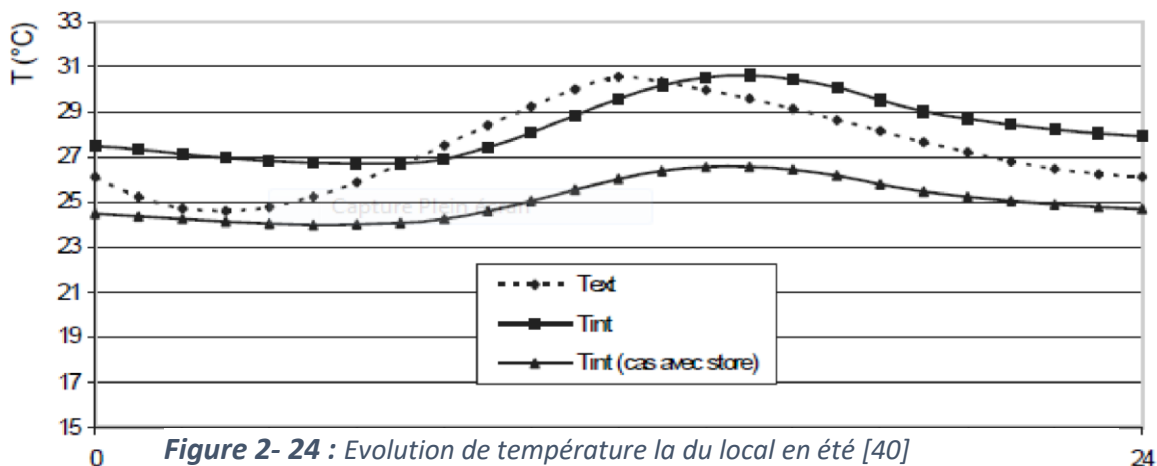


Figure 2- 24 : Evolution de température la du local en été [40]

re



protection solaire, la figure 2.23 montre que la mise en place de store vénitien peut diminuer la température intérieure du local d'environ 3 °C

### 2-27 Conclusion :

. Le mur Trombe se compose d'une partie en béton devant laquelle on dispose un vitrage en laissant une lame d'air. Il possède des ouvertures en haut et en bas pour faire circuler l'air. Les rayons solaires traversent la vitre afin d'être absorbés par le mur, peint dans une couleur sombre pour une meilleure absorption. Le mur se réchauffe et émet un rayonnement infrarouge ne pouvant traverser le vitrage : la chaleur est piégée entre le mur et la vitre. On utilise alors le mur différemment selon les saisons et la période de la journée :

- **La nuit** : l'ouverture supérieure est fermée afin d'éviter que de l'air intérieur chaud vienne se refroidir dans la lame d'air pour retourner ensuite dans le domicile.
- **Durant les mois d'hiver** : l'air froid rentre dans le mur par les ouvertures du bas, grâce à un mouvement de convection. Il se réchauffe, monte puis retourne dans la maison via les ouvertures supérieures.
- **Pendant les périodes chaudes** : pour que le logement ne soit pas en surchauffe, l'air chaud est évacué la nuit en ouvrant le clapet supérieur tout en fermant celui inférieur

Pour faciliter l'utilisation du mur Trombe, on peut **automatiser la fermeture et l'ouverture des clapets**. On conseille également d'ajouter des volets isolants, automatiques de préférence, pour protéger thermiquement ce mur afin de diminuer la surchauffe en été et les pertes de chaleur en hiver.

## CHAPITRE III : SIMULATION ET RÉSULTATS

## 3.1 Introduction :

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

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

Dans ce travail nous étudions un local situé dans la ville de Batna coordonnées géographiques de Batna Latitude : 35.55, Longitude : 6.17 35° 33' 0" Nord, 6° 10' 12" Est, Altitude Minimale 900 m, Maximale 1 036 m, Moyenne 968 m

## 3-2 Le site géographique :

Batna est une commune du Nord-Est de l'Algérie, située dans la région de l'Aurès. La ville dépend administrativement de la wilaya de Batna dont elle est le chef-lieu. Elle se trouve à 435 km au sud-est d'Alger et à 113 km au sud-ouest de Constantin.

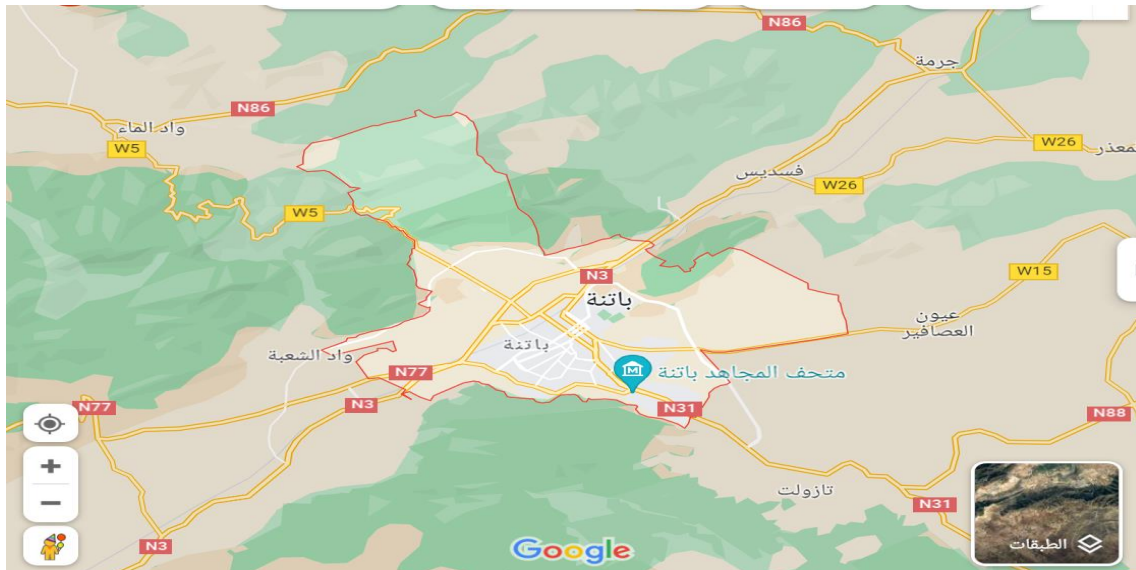


Figure 3- 1 : la wilaya de Batna



Figure 3- 2 : le site de maison

## 3-3 Les caractéristiques météorologiques de Batna

### 3-3-1 La température :

La saison très chaude dure 2,9 mois, du 11 juin au 8 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 28 °C. Le mois le plus chaud de l'année à Batna est *juillet*, avec une température moyenne maximale de 33 °C et minimale de 18 °C.

La saison froide dure 3,9 mois, du 17 novembre au 15 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 14 °C. Le mois le plus froid de l'année à Batna est *janvier*, avec une température moyenne minimale de 0 °C et maximale de 10 °C

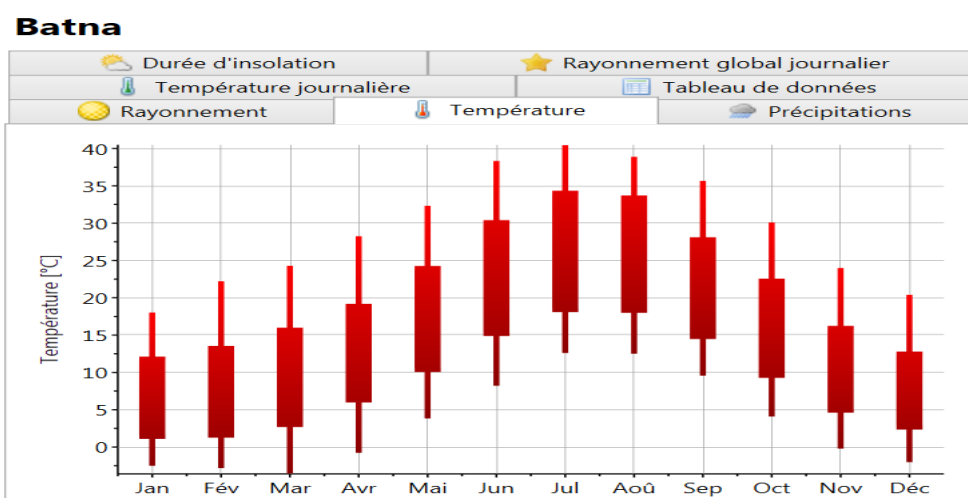


Figure 3- 3 : la variation de température durant l'année à Batna (métronome).

## Batna

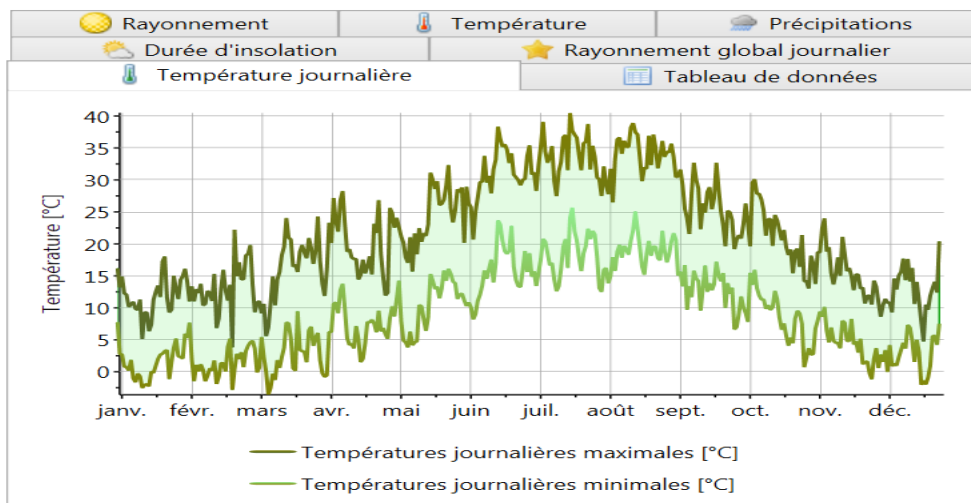


Figure 3- 4 : la température journalière max et min

### 3-3-2 Le rayonnement global :

Le rayonnement global mensuel à Batna est représenté sur la figure, on remarque que la valeur maximale vaut 250[KWh/m<sup>2</sup>] au mois de Juillet et la valeur minimale se situe en mois de novembre avec 80[KWh/m<sup>2</sup>]

## Batna

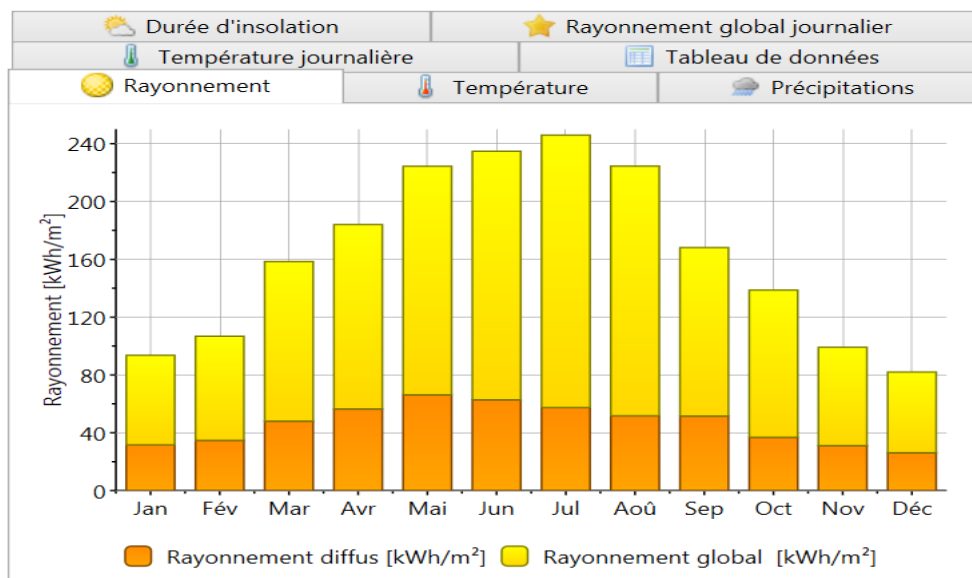


Figure 3- 5 : rayonnement global à Batna(métronome)

# SIMULATION ET RÉSULTATS

## Batna

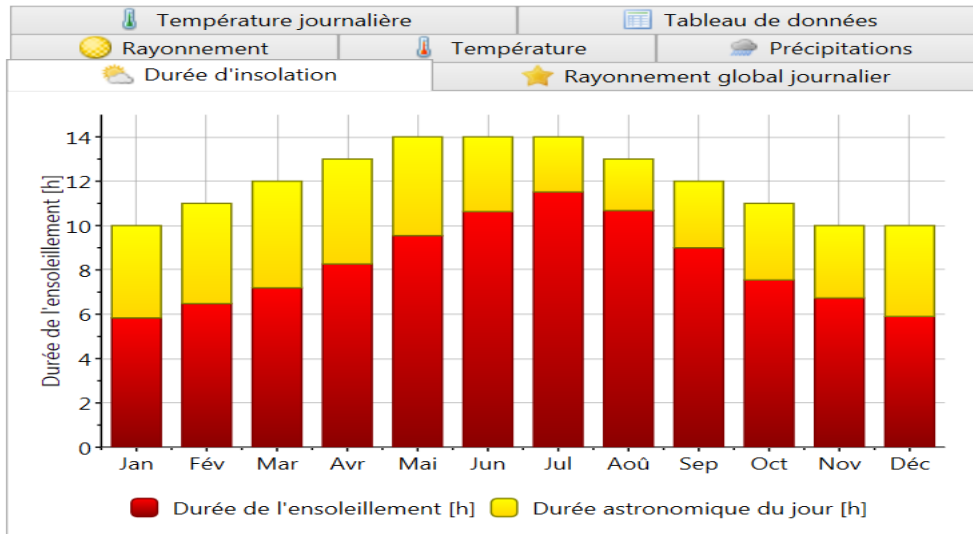


Figure 3- 6 : durée d'ensoleillement à Batna (métronome)

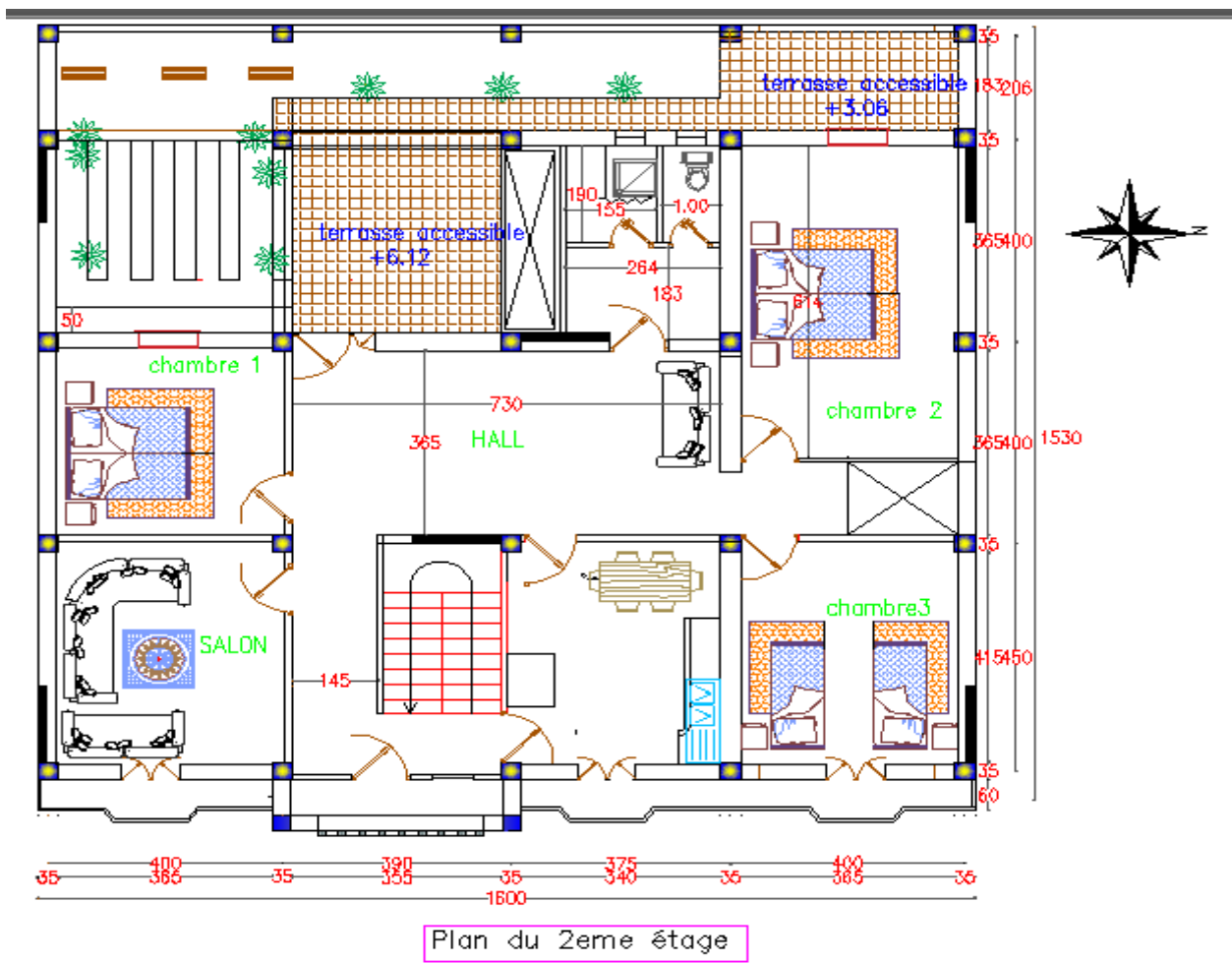


Figure 3- 7 : Plan de maison

## 3-4 Estimation des besoins en chauffage et climatisation

Le calcul des besoins énergétiques en chauffage et climatisation est effectué à l'aide du logiciel de simulation thermique dynamique des bâtiments « TRNSYS 16 »

### 3-4-1 Présentation de TRNSYS

TRNSYS (TRaNsient System Simulation) est l'un des logiciels de simulation thermique dynamique, les plus utilisés par les chercheurs et ingénieurs du monde entier. Destiné principalement aux domaines des énergies renouvelables et du bâtiment, il permet de modéliser un bâtiment dans le but d'étudier son comportement thermique et cela en tenant compte de plusieurs paramètres (l'enveloppe du bâtiment, son inertie, son implantation géographique, les apports thermiques, le comportement des occupants et du climat local, etc.). Le logiciel est divisé en deux parties initiales :

- TRNBuild : Permet de rentrer les caractéristiques du bâtiment (zones, parois, apports internes, débits de ventilation. . . )

**Simulation Studio** : Représente l'interface de calcul qui permet de modéliser l'environnement du bâtiment (climat, apports solaires, autres données d'entrée) ainsi que d'obtenir les résultats de la simulation.

#### Les avantages du logiciel :

- Modulaire : Possibilité de simuler des nouveaux composants, des systèmes et des concepts énergétiques très variés.
- Innovant : Géométrie 3D intégrée pour la modélisation thermique des bâtiments.
- Il permet aussi d'utiliser en complément des logiciels et options tels que METEONORME, Multitop langage W

## 3-4-2 Application

- **Création du projet** : La première étape consiste à définir les différentes zones de l'habitat (chambre, cuisine, salon, etc.), leurs dimensions ainsi que l'orientation du bâtiment.

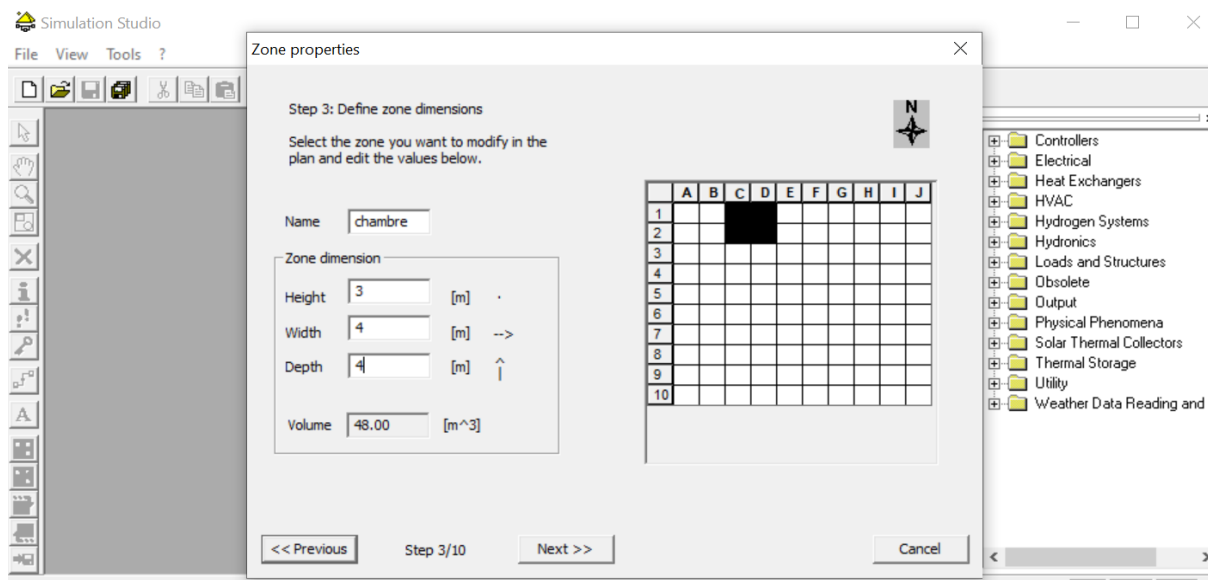
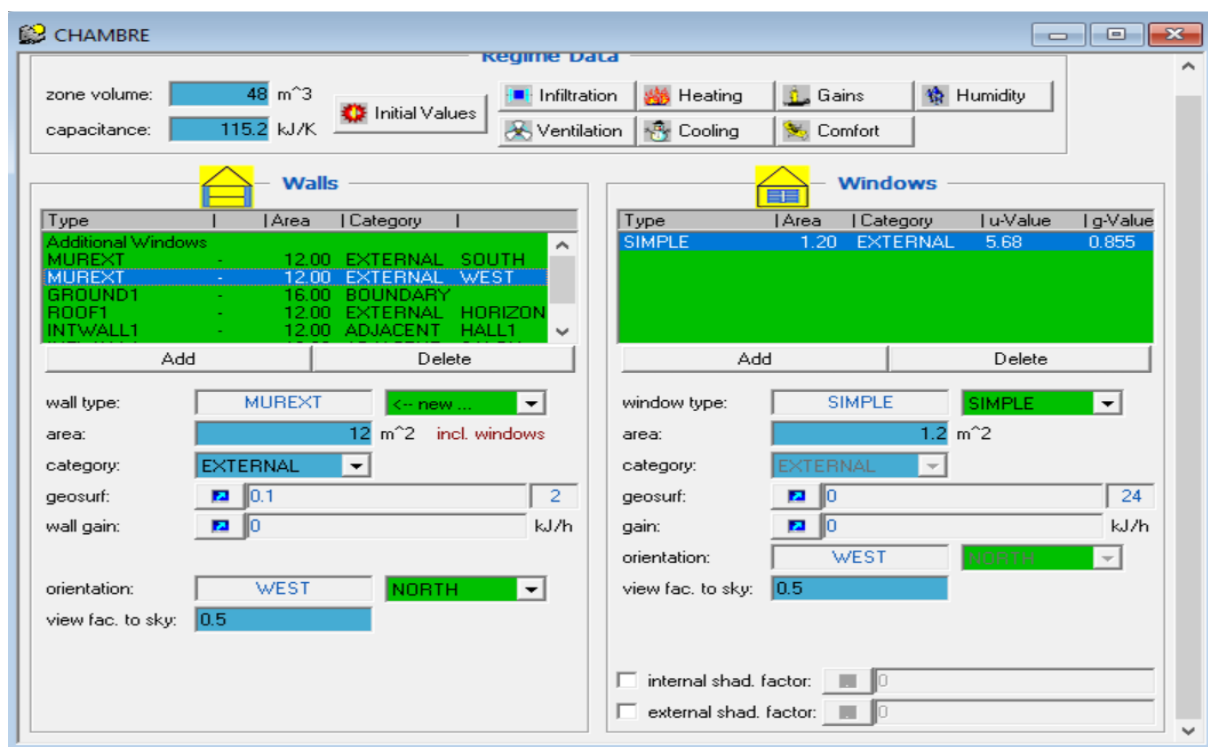


Figure 3- 8 : Création d'un nouveau projet sur TRNSYS

- **Définition de l'habitat sur TRNBuild** :

Définition des différentes caractéristiques de l'habitat sur TRNBuild, à savoir : les murs, la toiture et le sol, ainsi que leurs compositions, orientation respective et le type de vitrage utilisé, etc.





*Figure 3- 9 : Description du bâtiment sur TRNBuild.*

- **Spécification des paramètres thermiques du bâtiment :**

Détermination des valeurs initiales de la zone (température, HR), taux d'infiltration, gains (nombre d'occupants, appareils électriques, etc.), chauffage, climatisation, ventilation, humidité et confort thermique. Nous considérons les paramètres suivants :

Température initiale de la zone : 20°C

Humidité relative initiale de la zone : 50%

Température désirée dans la zone (chauffage) : 16°C

Température désirée dans la zone (climatisation) : 26°C

# SIMULATION ET RÉSULTATS

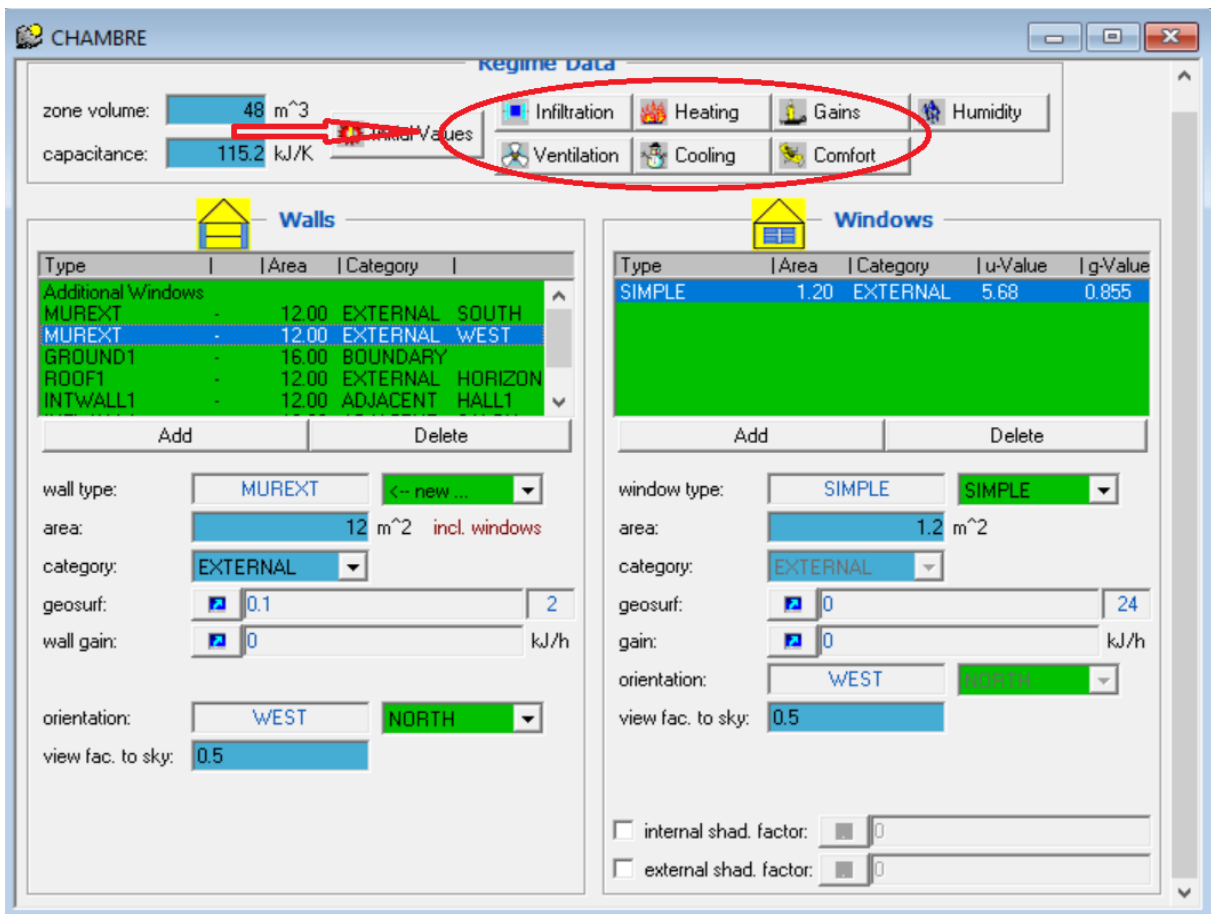


Figure 3- 10 : Variation des paramètres thermiques, TRNBuild

- Introduction du fichier météo :

TRNSYS permet d'importer les données météorologiques du site à partir de METEONORME

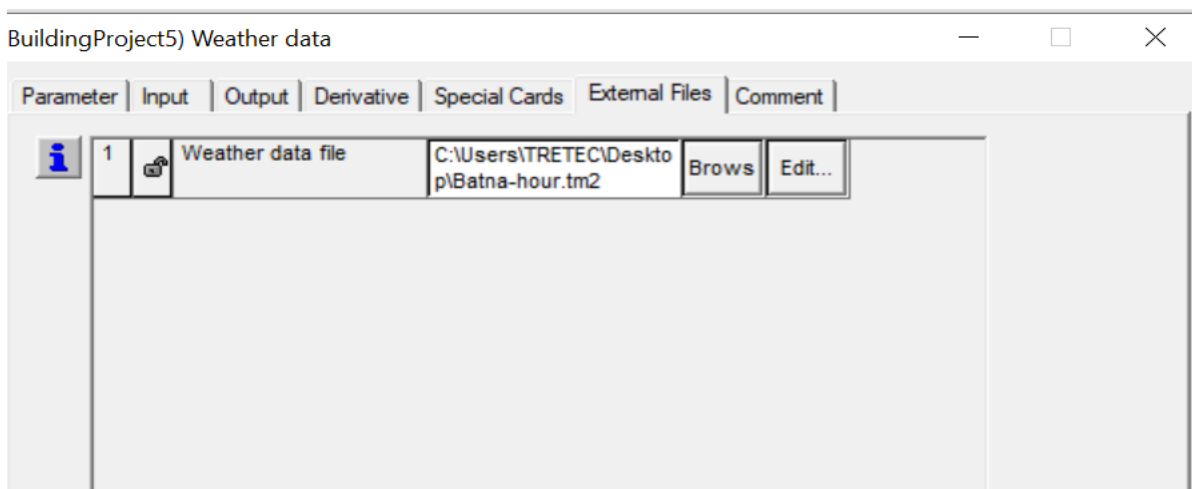


Figure 3- 11 : Introduction du fichier météo, TRNSYS.

- **Définition des Outputs :**

Les Outputs désirés sont définis sur simulation studio, ces résultats sont par la suite affichés sous formes de graphes et tableaux. Dans notre cas, nous cherchons à définir les besoins en chauffage et en climatisation d'où le choix de QCOOL (besoin en climatisation) et QHEAT (besoin en chauffage).

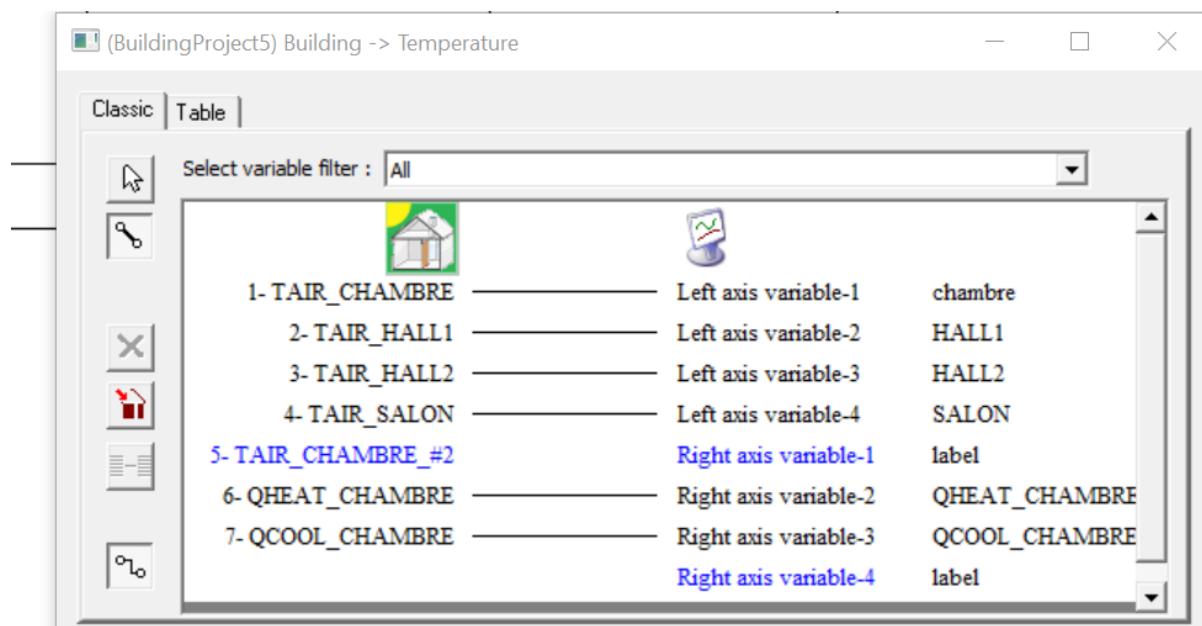


Figure 3- 12 : Définition des Outputs.

La dernière étape consiste à lancer la simulation à partir de l'interface Simulation Studio. Les résultats sont obtenus dans un document externe

## 3-5 Résultats obtenus :

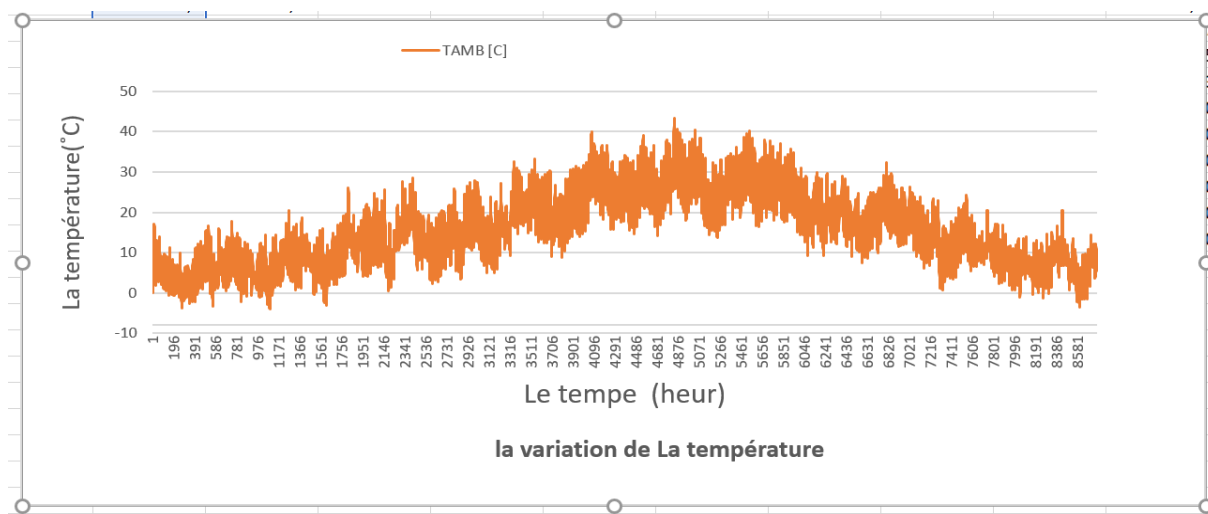


Figure 3- 13 : température ambiante

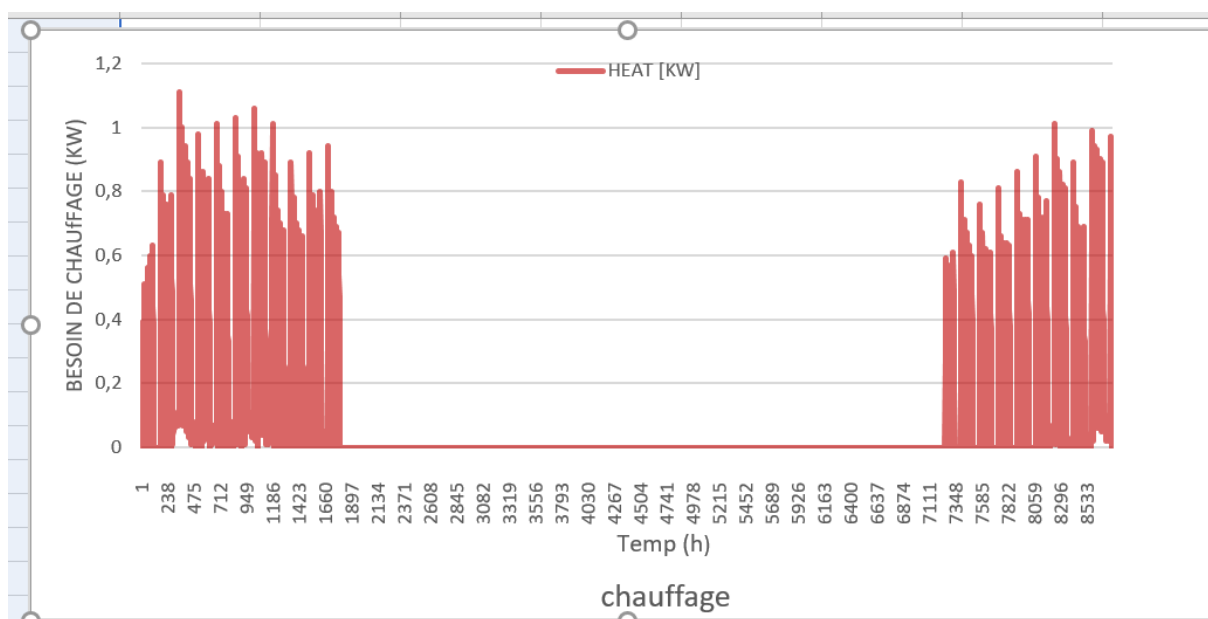


Figure 3- 14 : besoins de chauffage

# SIMULATION ET RÉSULTATS

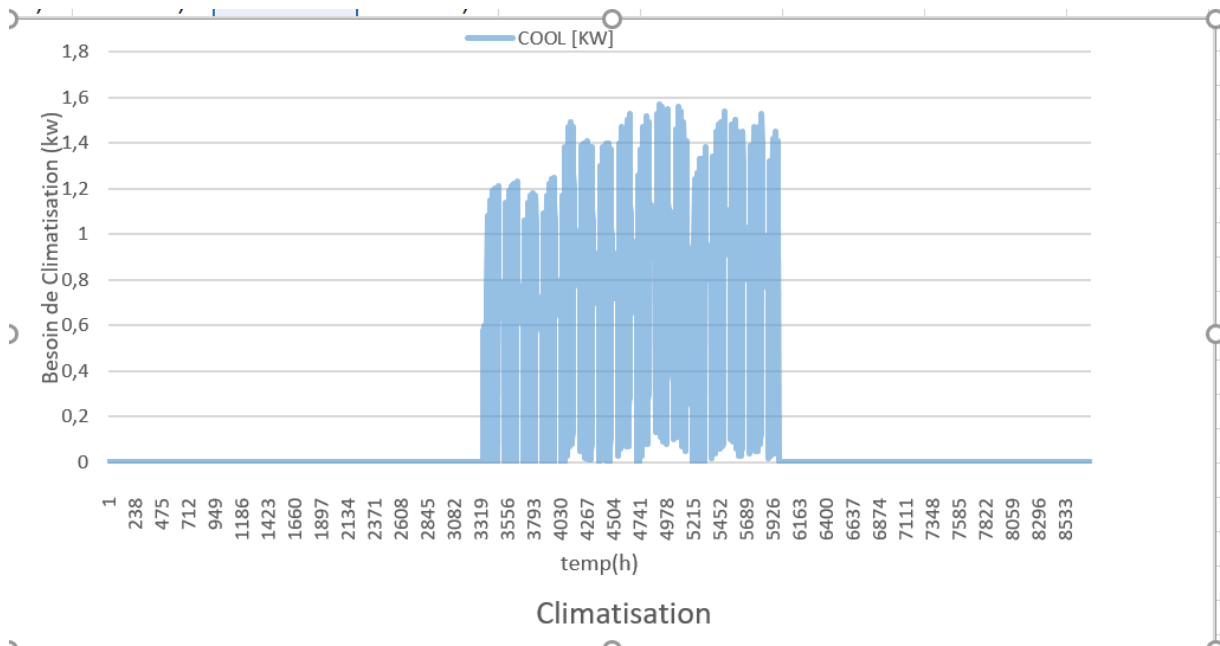


Figure 3- 16 : besoins de climatisation

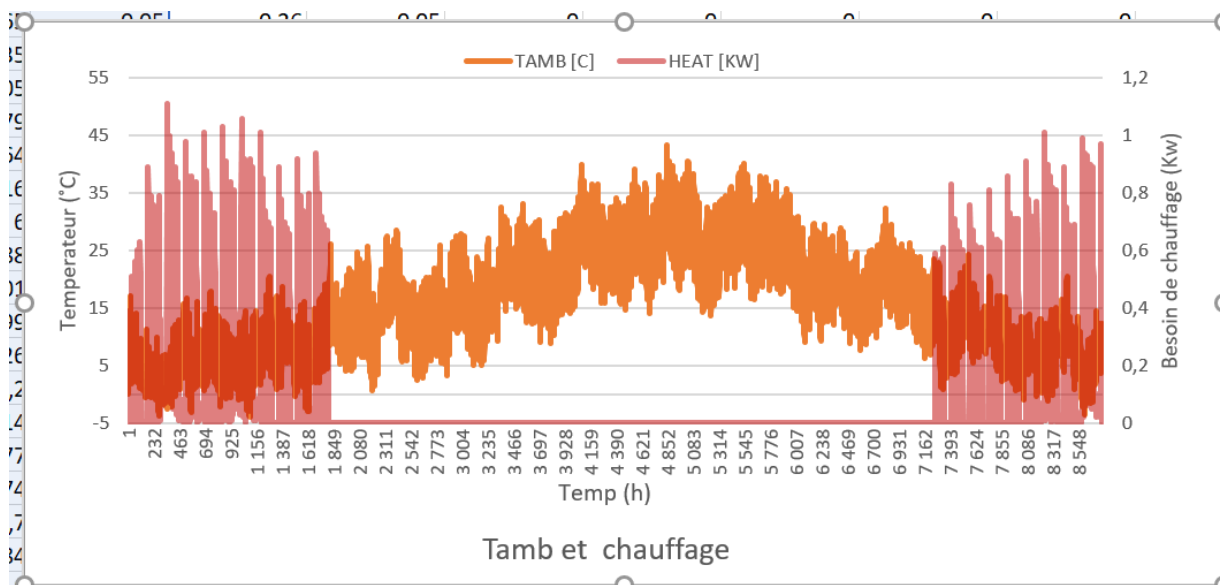


Figure 3- 15 : Tamb et besoins de climatisation

Quand la température elle est basse dans l'hiver on voit que les besoins de chauffage augment jusqu'au 1kw et en été quand la température elle est élevée on n'a pas des besoins

Quand la température élever dans l'été on voit que les besoins de climatisation augment jusqu'au 1,5 kW et en hiver quand la température elle est basse on n'a pas des besoins climatisation

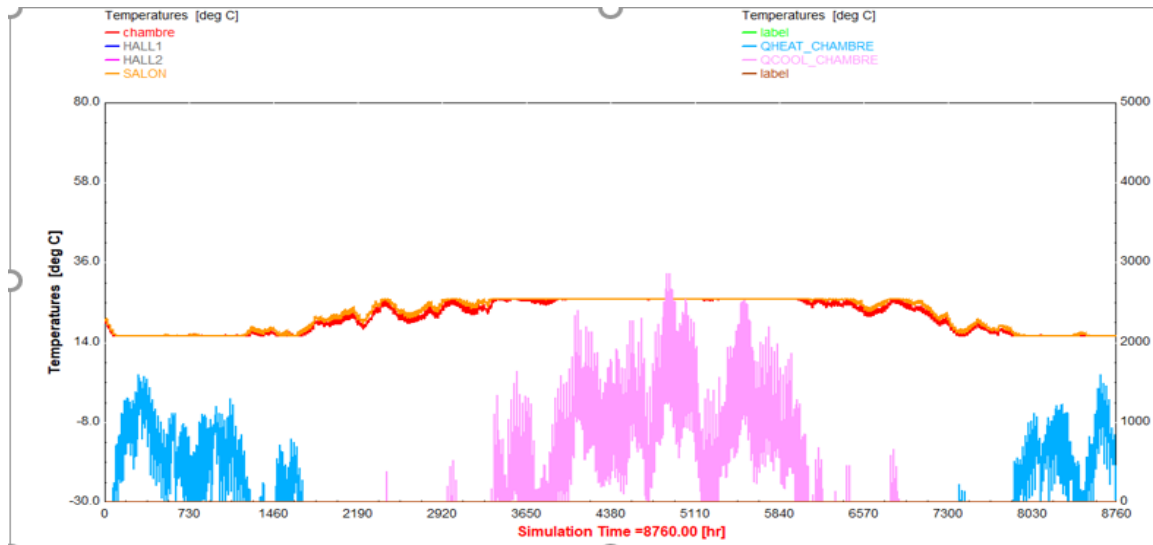
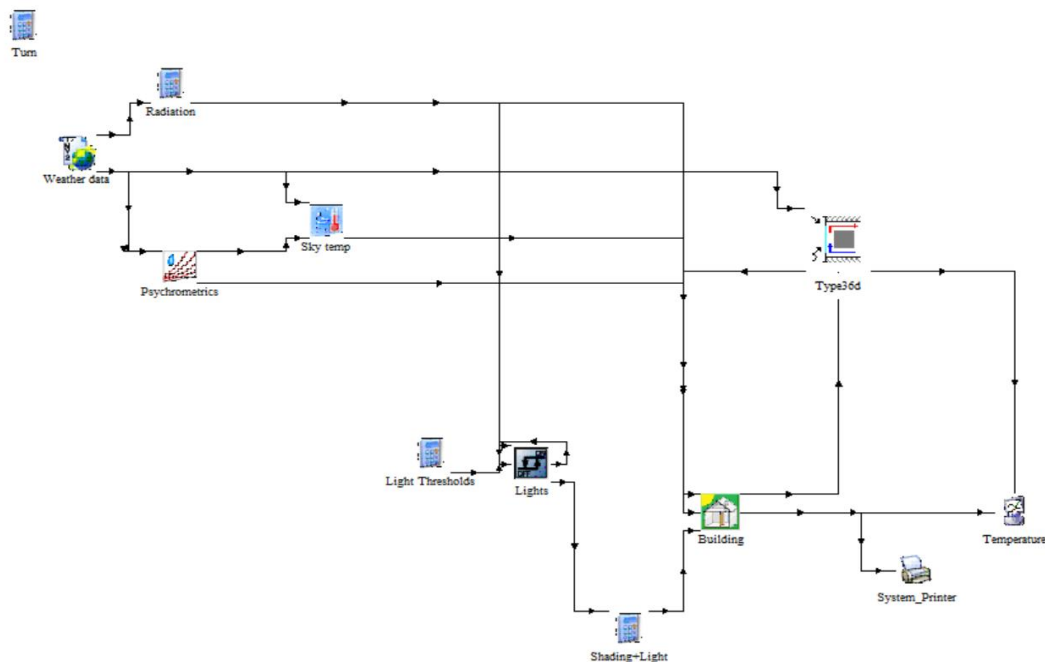


Figure 3- 17 : Besoins en chauffage et climatisation,

### 3-6- Analyse des résultats obtenus

La figure 3-18 montre la variation des besoins en chauffage et climatisation, en fonction de la température à l'intérieur de l'habitat pendant l'année. En période chaude, dès que la température monte en dessus de 26°C, les besoins en climatisation augmentent. En période froide, les besoins en chauffage augmentent dès que la température de la zone descend en dessous de 16°C

## 3-6 Intégration de mur de Trombe dans le TRNSYS



*Figure 3- 18 : Intégration de mur de Trombe dans TRNSYS*

**Teype 36 :** Un mur de stockage thermique est essentiellement un capteur solaire à haute capacité directement couplé à la pièce. Le rayonnement solaire absorbé atteint la pièce par l’un ou l’autre des deux chemins. Un chemin est la conduction à travers le mur. À partir du surface intérieure du mur, l’énergie est convectée et irradiée dans la pièce. La deuxième voie est la convection de la surface chaude de la paroi externe à l’air dans l’espace. L’air ambiant qui circule dans l’espace est chauffé et transporte de l’énergie dans la pièce. La paroi perd également de l’énergie par conduction, convection et rayonnement à l’environnement à travers les couvercles de vitrage.

# SIMULATION ET RÉSULTATS

(BuildingProject5) Type36d

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Mode	4	-			More...
2	Wall height	3	m			More...
3	Wall width	4	m			More...
4	Wall thickness	0.3	m			More...
5	Wall conductivity	5	kJ/hr.m.K			More...
6	Specific capacitance of wall	3000.0	any			More...
7	Wall solar absorptance	0.7	-			More...
8	Wall emittance	0.8	-			More...
9	Glazing emittance	0.1	-			More...

Figure 3- 19 : Caractéristique de mur

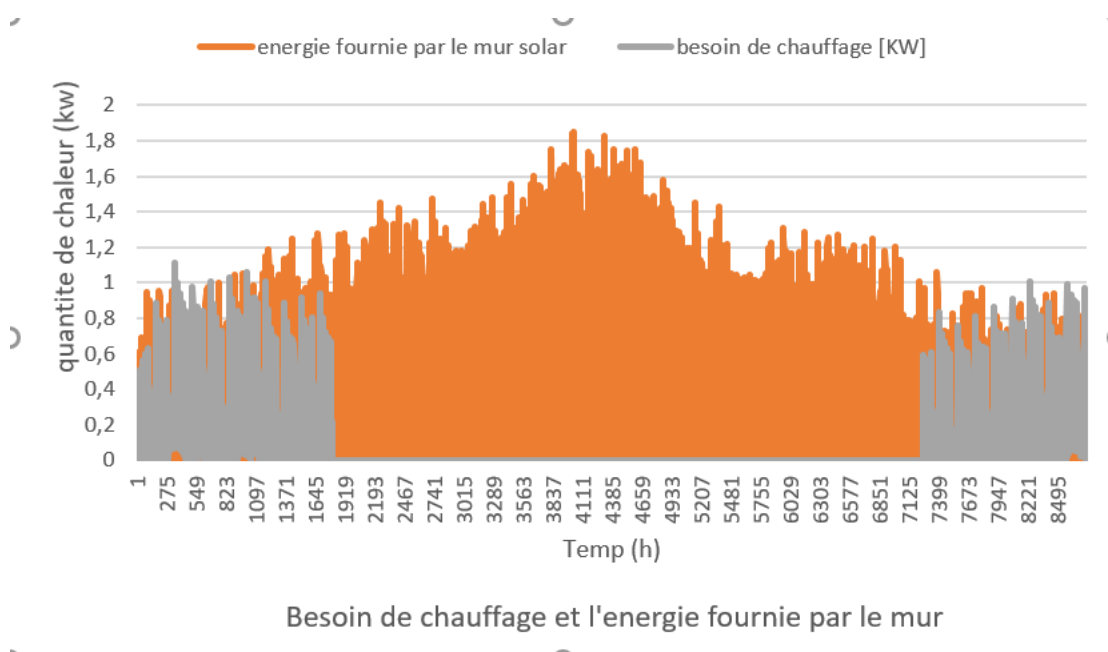
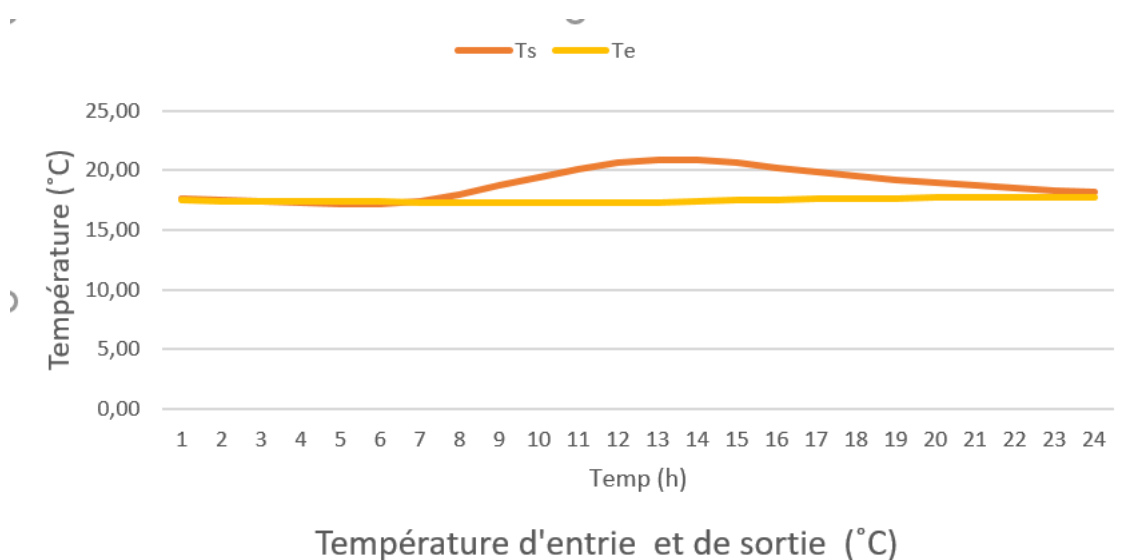


Figure 3- 20 : les besoins de chauffage et l'énergie fournie par le mur



Dans la figure 3-20 nos résultats montre que le mur trombe que nous avons intégré couvre nos besoins de chauffage en hiver,

Pendant l'été, nous pourrions installer des protections solaires, ou alors penser à une ventilation pour rafraîchir la paroi



**Figure 3- 21** : température d'entrée et de sortie du mur Trombe

Dans cette figure qui représente la variation de la température d'entrée et de sortie de mur trombe en fonction de temps on voit que les températures d'entrée et de sortie sont égales dans la nuit et après le lever de soleil on remarque que la température de sortie augmente jusqu'au 21°C à cause de mur de trombe qui capte la chaleur et chauffer l'air.

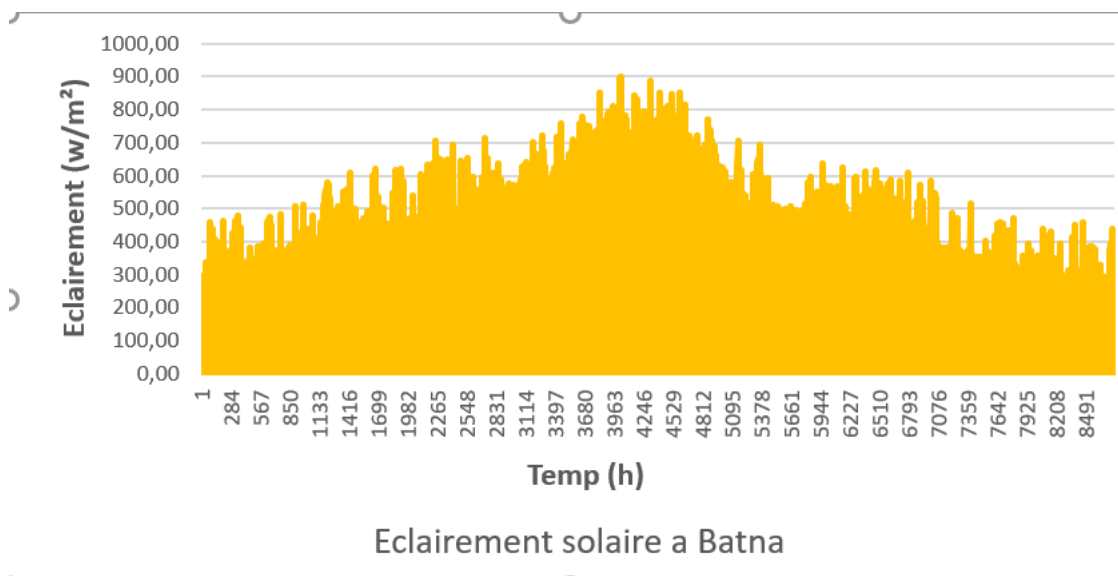


Figure 3- 22: Éclairement solaire à Batna

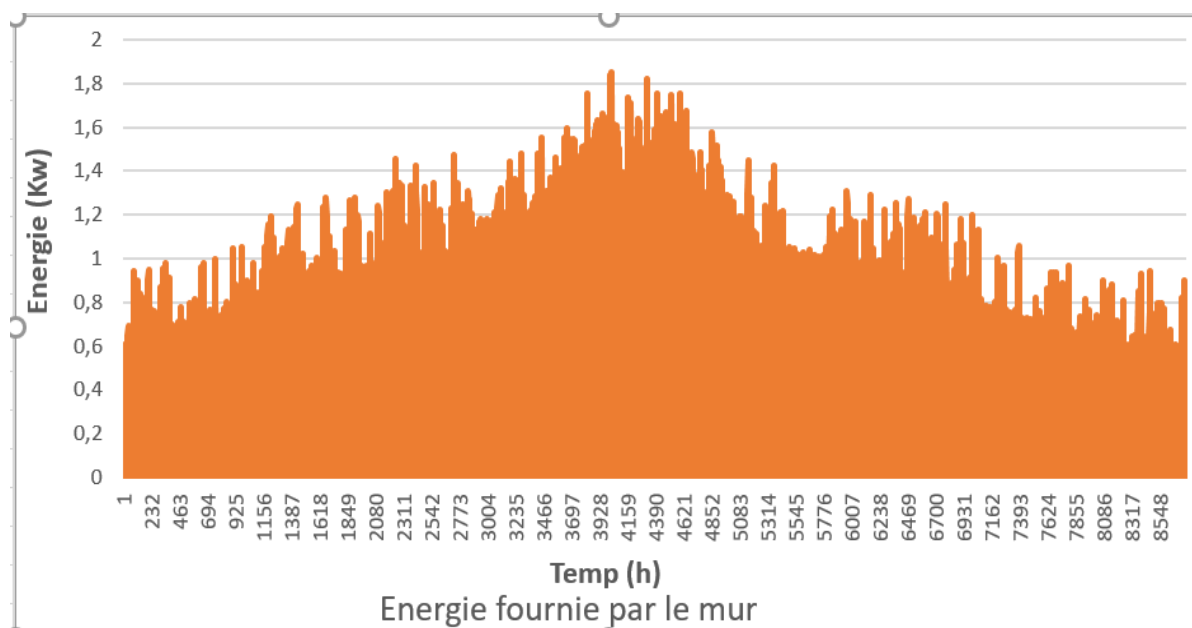


Figure 3- 23: L'énergie fournie par le mur Trombe

L'évolution de l'énergie du Mur Trombe évolue de la même façon que l'éclairement solaire, vu le principe de fonctionnement du Mur Trombe.

**Pendant l'été on propose :**

- Fournir ombrage
- Retrait de l'air chaud en ouvrant les grilles supérieure et inférieure du vitrage de la paroi thermique.
- La création d'un flux d'air (une ventilation) qui pourrait être généré par l'ouverture de l'orifice supérieur du vitrage et l'orifice inférieur de la paroi. De telle sorte qu'il crée l'effet de "cheminée solaire". En enlevant l'air entre le vitrage et le mur, une faible pression d'air, il crée qui aspire l'air intérieur à l'extérieur.

**3-7 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a calculer les besoins de chauffage et climatisation a l'aide de logiciel TRNSYS et intégré un mur Trombe pour couvrir les besoins de chauffage

### CONCLUSION GENERAL

Le mur trombe également appelé mur trombe – Michel est particulièrement adapté aux constructions bioclimatique dans le but est de limiter les besoins en chauffage et d'utiliser de manière optimale les ressources énergétique propres.

Dans ce travaille Nous avons utilisé un chauffage passif par la technique d'un mur Trombe dans une maison à Batna pour ça nous avons utilisé une simulation par logicielle TRNSYS  
Ces travaux de simulation ont permis d'obtenir les besoins de chauffage et climatisation et l'énergie fournie par le mur.

Sur la base de ces données nous avons comparé les deux graphes (besoins de chauffage et l'énergie fournie par le mur) ce qui nous a montré que le mur fournie une énergie qui couvre nos besoins on hiver.

En été le mur trombe entrainerait une surchauffe du logement pour éviter ça on a proposé de -  
Fournir ombrage et crie une ventilation.

- [1] : <https://www.cerefe.gov.dz/fr/>
- [2] : Y. Himri, A. BoudgheneStambouli, and B. Draoui, “Prospects of wind farm development in Algeria,” *Desalination*, vol. 239, no. 1–3, pp. 130–138, 2009.
- [3] : JibaoShenet all, Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls, *Energy and Buildings* 39 (2007) 962–974.
- [4] : E. TASDEMIROGLU ET all, The Performance Results of TROMBE-WALL Passive systems Under Aegean Sea Climatic Conditions, *Solar Energy* 181-189. 1983.
- [5] : A. Zerrouki, ‘Expérimentation d’un Capteur Solaire à Air avec Absorbeur en Forme de Persiennes pour une Utilisation en Architecture’. Thèse de Magister, Centre d’Etudes Nucléaires et Solaires, 1986.
- [6] : DTR C3.2/4 'Document Technique Réglementaire, Règlementation Thermique Algérienne du Bâtiment', CNERIB, 2016.
- [7] : ArvindChelet all, Energy conservation in honey storage building using Trombe wall, *Energy and Buildings* 40 (2008) 1643–1650.
- [8] : M.K. Cherier et all, Etude des Performances Thermiques d’un Mur
- [9] : Trombe, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, B.P, 88, ZI, GaretTaam Ghardaïa (2008).
- [10] : 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.
- [11] : 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.
- [12] : 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.
- [13] : 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, HammamLif 2050, Tunisiaa, *Energy and Buildings* 80 (2014) 302–308.
- [14] : Habitation rurale à forte performance énergétique, CDER

- [15] : Liébard, Alain ; De Herde, André ; de MYTTENAERE, Krystel ; KANENE, C. Guide de l'architecture bioclimatique, Tome 3: Construire en climats chauds. (2001) (ISBN:978-2-913620-08-7)
- [16] : M. s. Djaafar, «5» chez cours de l'architecture passive, université de Blida 01 Saad dahleb, 2022
- [17] : S THIERS. « Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive Stéphane Thiers To cite this version ». In : HAL Id (2009), p. - 00004692, 256,
- [18] : <https://www.effinergie.org>
- [19] : Guide « La thermique du bâtiment » Sover
- [20] : Hervé LAMY (SNFPESA) « La protection solaire dans les bâtiments à basse consommation », Édition 1, Février 2012
- [21] : Pierre Merlin et Françoise Choay, dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, seconde édition, Paris 2009
- [22] : Carnet pratique, « les protections solaires », venez consulter un architecte du CAUE
- [23] : Évolution de l'habitat - Créer son blog en ligne : [http://blog.crdp-versailles.fr/technolanacelle/public/5\\_Chap\\_1\\_-\\_FICHE\\_2\\_ressource.pdf](http://blog.crdp-versailles.fr/technolanacelle/public/5_Chap_1_-_FICHE_2_ressource.pdf)
- [24] : Robertson. K, Athienitis. 'Solar Energy for Buildings' A, 2007. En ligne
- [25] : <https://conseils-thermiques.org/contenu/confort-thermique.php>
- [26] : Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 195-198 Evaluation des Performances d'un Mur Trombe
- [27] : <http://www.eco-sud.com/wp-content/uploads/2011/04/Mur-trombe-murcapteur.> (mars 2011)
- [28]: Bioclimatic design of buildings K. Tsipiras page 213
- [29] : Conception bioclimatique des bâtiments K. Tsipras Page 214)
- [30]: Bioclimatic design of buildings K. Tsipiras (page 213).
- [31]: Connaissance des énergies, <http://www.connaissancedesenergies.org/>,
- [32] : Mahfoudi,N. Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider de Biskra)
- [33] calculs SDES, d'après les données de l'AIE
- [34]: A. Laghzaoui, D. Peerhossaini. Stockage de chaleur : énergie solaire et autres applications écoles des mines de douai.
- [35] : J. Bernard, Energie Solaire, Calculs et optimisation, Ellipses Edition marketing S.A 2011
- [36] : WH Ball, Communication présentée à la réunion générale annuelle, Institut du génie du Canada, publiée à l'origine en septembre (1967).

[37] : A. Zerrouki, 'Expérimentation d'un Capteur Solaire à Air avec Absorbeur en Forme de Persiennes pour une Utilisation en Architecture'. Thèse de Magister, Centre d'Etudes Nucléaires et Solaires, 1986.

[38] Développer une architecture bioclimatique méditerranéenne.

[39] : A. Akbarzadeh, W.W.S. Charters and D.A. Lessbi, 'Thermocirculation Characteristics of a Trombe Wall Passive Test Cell', Solar Energy, Vol. 28, N°6, 1982

[40] : Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 195-198 Evaluation des Performances d'un Mur Trombe.

