

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des sciences de l'ingénieur
Département de génie mécanique



MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie mécanique

Option: applications des énergies renouvelables dans l'habitat

PERFORMANCES DU SYSTEME DE CHAUFFAGE PASSIF BARRA-COSTANTINI DANS LES CONDITIONS CLIMATIQUES DE L'ALGERIE

Présenté par :

BENAMAROUCH Mohamed Lamine

Sous la direction de :

Kh. IMESAAD

Maitre de Recherche 'A', CDER

Promoteur

Dj. SEMMAR

Professeur, USD Blida

Co-Promoteur

RESUME

L'habitat en Algérie ne répond pas aux exigences de confort en générale et thermique en particulier. Ce constat est renforcé par la non prise en charge, dans la conception de départ, de plusieurs critères comme une conception architecturale qui s'adapte au climat.

Ce travail présente une solution numérique au problème de la convection naturelle dans le cas du chauffage de bâtiments par un système solaire passif. Le système étudié est celui développé par le professeur O.A. Barra et qui nous semble bien adapté aux conditions climatiques de l'Algérie. La résolution numérique du modèle est basé sur les équations de conservation de la masse et de l'énergie est réalisée par la méthode des différences finies. Elle permet d'obtenir, en fonction du temps, les profils de températures de chaque composant du système. Le principe de fonctionnement du système est visualisé, les températures obtenues au niveau de la zone d'occupation sont adaptables à l'intervalle du confort thermique. Les résultats de simulation sont en bon accord avec ceux de la littérature.

ABSTRACT

In Alegria, habitation does almost not answer to the comfort demand, in particular the thermal factor. This observation is reinforced by the unsupported, in the original design, of several criteria's an architectural design which adapts to the climate.

This work aims at presenting the numerical solution to a natural convection problem concerning the use of a passive solar system for building heating purpose. The studied heating system has been developed by the professor O.A. Barra and seems us the best adapted to the Algerian climatic conditions. The numerical solution to the mathematical model - based on energy and mass conservation equations - is achieved by a finite difference method, which allows to determine the time-dependent temperature profile on each component. The principle of the system functioning is visualized. The temperatures obtained on the level of the occupation zone are adaptable to the interval of the thermal comfort. The results of simulation are in concord with those of the literature.

Mots clés: Convection naturelle - Chauffage passif - Energie solaire – Modélisation numérique - Mur Trombe.

REMERCIEMENT

Au terme de ce modeste travail, on tient d'abord à remercier en premier lieu ALLAH le miséricordieux qui nous a donné du courage et de la volonté avec lesquels ce mémoire a été achevé.

Mes gratitude vont aussi à mon Promoteur Monsieur IMESSAD Khaled, Maitre de Recherche 'A' au Centre de Développement des Energies Renouvelables. Ici on écrit ce que on devrait dire avant d'écrire : merci beaucoup monsieur de m'avoir guidé et suivi. A souligner que son aide a été d'une grande utilité dans la réalisation de mon travail.

Un grand merci à mon Co-Promoteur Monsieur SEMMAR Djaffar, professeur au Département Mécanique de l'Université de Blida, pour son aide et également pour sa gentillesse et sa modestie, ainsi qu'à Monsieur HAMID Abdelkader, professeur au Département Mécanique pour ses conseils et son soutien permanent.

Un grand merci à tous les enseignants de Département de Génie Mécanique qui ont contribué à notre formation.

Merci à mon collègue Dziri Mounir, ainsi qu'à mes amis de promotion, pour leur aide et leur soutien moral. Je n'oublierais pas tous les moments que nous avons traversés ensemble.

Mes vifs remerciements pour ma famille, en particulier mes parents qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable. Merci aussi à tous mes amis.

Je terminerais en remerciant tous ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

Résumé	
Remerciements	
Table des matières	
Liste des figures et des tableaux	
Liste des symboles et des abréviations	
Introduction générale	9
Chapitre I : ETAT DE L'ART ET GENERALITES	
1.1 introduction	10
1.2 Systèmes de chauffage passif solaire.....	10
1.2.1 Définition	10
1.2.2 Les systèmes à gain direct	10
1.2.3 Les systèmes à gain indirect.....	11
1.2.3.1 Les serres	11
1.2.3.2 Le mur trombe	13
1.2.3.3 Travaux sur le système barra-costantini	18
1.3 Généralités sur le transfert de chaleur	20
1.3.1 Les modes de transfert de chaleur	20
1.3.1.1 La conduction	20
1.3.1.2 La convection	20
1.3.1.3 Le rayonnement	21
1.3.1.3.1 Le rayonnement électromagnétique	21
1.4 Caractéristiques du climat en Algérie	23
1.4.1 Introduction	23
1.4.2 Les zones climatiques en Algérie	23
1.5 Système adopté	23
Chapitre II : MODELISATION MATHEMATIQUE	
2.1 Le système a adopté	24
2.2 Le locale étudié.....	24
2.3 Méthode de modélisation adoptée	25
2.3.1 Les hypothèses adoptées	25
2.4 Bilan Thermique	27
2.4.1 Premier vitrage	27

2.4.2 Deuxième vitrage	29
2.4.3 Absorbeur	30
2.4.4 Cheminée solaire	30
2.4.5 L'isolant	32
2.4.6 Le mur massif	33
2.4.7 La face interne du mur massif	34
2.4.8 Le plafond	34
2.4.9 Le plafond (conduite horizontale)	35
2.4.10 Plafond vers l'intérieure	37
2.4.11 Le plancher	38
2.4.12 Les murs (nord, ouest et est)	39
2.4.13 Local	39
2.5 Récapitulatif du modèle mathématique	41
2.6 Modélisation numérique	43
2.6.1 Linéarisation des équations	43
2.6.2 Conditions initiales	43
2.6.3 Résolution du système d'équations	43
Chapitre III : SIMULATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	
3.1 Introduction sur le logiciel (MATLAB)	44
3.2 Les particularités de MATLAB	44
3.3 Simulation et interprétation	45
3.4 Comparaison avec un local classique	49
Conclusion générale et perspectives	50
Références bibliographiques	
Annexe 1	
Annexe 2	

LISTE DE FIGURES

CHAPITRE 1 :

- Figure.1-1 Schéma de Fonctionnement d'une serre
- Figure.1-2 Maison Balcomb
- Figure.1-3 schéma d'un mur trombe
- Figure.1-4 La maison Baer
- Figure.1-5 Système à double capteur
- Figure.1-6 Système Barra–Costantini
- Figure.1-7 le système étudié par Luca buzzoni
- Figure.1-8 le modèle étudié par K. Imessad
- Figure.1-9 le spectre électromagnétique

Chapitre II

- Figure.2-1 la façade SUD du locale étudié
- Figure.2-2 Modélisation du système
- Figure.2-3 Bilan d'énergie au niveau de la première vitre
- Figure.2-4 Bilan d'énergie au niveau de la deuxième vitre
- Figure.2-5 Bilan d'énergie au niveau de l'absorbeur
- Figure.2-6 Bilan d'énergie au niveau de l'isolant
- Figure.2-7 Bilan d'énergie à l'intérieur du mur massif
- Figure.2-8 Bilan d'énergie sur la face interne du mur massif
- Figure.2-9 Bilan d'énergie sur le plafond vers l'extérieure
- Figure.2-10 Ecoulement dans le plafond
- Figure.2-11 Bilan d'énergie au niveau du plafond intérieure
- Figure.2-13 Bilan d'énergie au niveau du plancher
- Figure.2-14 Bilan d'énergie au niveau du mur

Chapitre III

- Figure.3-1 le rayonnement solaire sur une surface verticale pour 5 journées d'hiver
- Figure.3-2 Température extérieure pour 5 journées d'hiver
- Figure.3-3 Température de la première vitre

- Figure.3-4 Température de la deuxième vitre
- Figure.3-5 Température de l'absorbeur
- Figure.3-6 Température de la cheminée
- Figure.3-7 Comparaison entre (T2) et (T3)
- Figure.3-8 Température de l'air dans le plafond (Tf)
- Figure.3-9 Comparaison entre Tf et T2
- Figure.3.10 Le débit d'air dans la canalisation horizontale
- Figure.3-11 Température intérieure et extérieure
- Figure.3-12 Comparaison entre Tin et Tf
- Figure.3-13 Comparaison entre la température intérieure sans-avec système

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Tf	Température du fluide (°C)
Tin	Température du local (°C)
Te	Température extérieure (°C)
Tae	Température air ambiant (°C)
Tam	Température ambiante (°C)
Tsol	Température du sol (°C)
S	Surface de la paroi d'un locale (m ²)
Ad	Surface de la cheminée (m ²)
Av	Surface de l'orifice en haut (m ²)
Ac	Surface de passage de l'air (m ²)
hi	Coefficient de convection intérieure (w/m ² .°K)
he	Coefficient de convection extérieure (w/m ² .°K)
hr	La quantité d'énergie échangée par rayonnement entre deux surfaces (w/m ² .°K)
h0	Coefficient de convection entre les deux vitres (w/m ² .°K)
k	la conductivité thermique (w/m.°K)
Cp	Capacité calorifique (J/kg.k)
Lc	distance entre le vitrage et le mur massif (m)
DH	Le diamètre hydraulique (m)
P	le périmètre de l'orifice (plafond) (m)
F	facteur de forme entre deux surfaces
V	Le volume (m ³)
qe	Débit de renouvellement d'air (m ³ /h)
qs	Représente les gains réels par ensoleillement à travers une fenêtre
qr	Pertes de chaleur par renouvellement d'air (w)
qn	Les gains internes dus à la présence des occupants et à l'éclairage (w/m ²)
I	rayonnement solaire (J/m ²)
Imax	L'insolation maximale (J/m ²)
Vve	Vitesse du vent (m/s)
m	Débit massique (kg/s)

Critères grecs :

α_a	Absorptivité de l'absorbeur
α_v	Absorptivité du vitrage
β	Angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale (degrés)
β_i	Coefficient de dilatation thermique
τ	Transmissivité du vitrage
ρ_v	Masse volumique du vitrage (kg/m^3)
ρ_a	Masse volumique de l'absorbeur (kg/m^3)
ρ_b	Masse volumique du brique (kg/m^3)
ρ_n	Masse volumique de l'isolant (kg/m^3)
ρ_{bet}	Masse volumique du béton (kg/m^3)
ϵ_v	émissivité du vitrage
ϵ_a	émissivité de l'absorbeur
ϵ_b	émissivité du brique
ϵ_n	émissivité de l'isolant
ϵ_{bet}	émissivité du béton
μ_b	la viscosité dynamique à la température moyenne du fluide (pa.s)
μ_s	la viscosité dynamique à la température de la paroi (pa.s)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8}) ($W.m^{-2}.K^{-4}$)
g	Constante gravitationnelle (m/s^2)
ρ_f	Masse volumique de l'air (kg/m^3)
μ	la viscosité dynamique de l'air (pa.s)
k_f	la conductivité thermique de l'air ($w/m.^{\circ}K$)

Nombres sans dimension :

Nu	nombre de Nuselt
Re	nombre de Reynolds
Ra	nombre de Rayleigh
Pr	nombre de Prandtl
Gr	nombre de Grashof

1. introduction générale

Les bâtiments occupent une bonne superficie de la planète et sont primordiaux pour la société. Cependant, les humains sont vraiment loin d'être confortables lorsqu'ils sont à l'intérieur d'un bâtiment sans aucun système pour le chauffer ou le refroidir. C'est donc la raison pour laquelle les systèmes de chauffage, de ventilation et d'air climatisé existent. Ceux-ci permettent aux personnes de travailler ou de bien de faire toute autre activité dans un climat confortable peu importe les conditions climatiques à l'extérieur. Par contre, ces appareils doivent utiliser beaucoup d'énergie et cette consommation d'énergie peut être très coûteuse.

L'efficacité énergétique des bâtiments est donc un aspect primordial pour la planète, puisque les habitants de celle-ci doivent vivre avec un certain minimum de confort. Comme les bâtiments sont responsables d'une grande partie de la consommation d'énergie dans le monde, améliorer leur efficacité a donc pour faire face aux défis énergétiques du futur, on fait de plus en plus appel aux énergies renouvelables. Celles-ci sont tout-à-fait inépuisables et ne sont généralement pas polluantes pour l'environnement.

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 à la suite de la signature du protocole de Kyoto, protocole qui prévoit notamment une baisse de 5.2% des émissions de gaz à effet de serre des pays riches sur la période 2002-2012 par rapport à 1990. [1]

L'évolution des réglementations thermiques montre clairement une volonté de réduire les besoins en chauffage des bâtiments. Il en est de même pour les bâtiments passifs dont le concept est d'utiliser au maximum les apports solaires et les apports internes pour chauffer le bâtiment.

Plusieurs concepts ont été élaborés afin d'utiliser l'énergie solaire pour ensuite la transformer en énergie utile. Ces concepts sont généralement divisés en deux catégories : la première utilise l'énergie solaire pour produire directement de l'électricité, tandis que la deuxième transforme le rayonnement du soleil en énergie thermique qui pourrait chauffer et climatiser une maison, et c'est le principe de travail des systèmes de chauffage passif.

CHAPITRE 1 :

ETAT DE L'ART ET GENERALITES

1.1 Introduction :

Ce premier chapitre est consacré à des rappels qui sont en l'occurrence le bagage scientifique utile et nécessaire pour développer notre étude. On s'intéresse particulièrement :

- Aux systèmes de chauffage passif qui existent, et les travaux déjà faits dans ce contexte.
- A l'état de l'art basé sur des articles scientifique sur des études à propos d'un système de chauffage passif nommé **mur trombe** et son développement à travers le temps pour améliorer la performance de ce dernier.
- Aux différents modes de transfert de chaleur qui se manifestent dans ce type de systèmes.
- Aux caractéristiques du climat algérien et la variation des zones climatiques.

1.2 Systèmes de chauffage passif solaire :

1.2.1 Définition :

Les systèmes passifs représentent les systèmes qui reposent sur la conception et la construction adéquates d'un bâtiment afin d'obtenir un gain direct de chaleur solaire. Ils n'utilisent pas d'autres sources d'énergie que les sources naturelles du soleil et du vent.

L'objectif principal de système solaire passif est d'arriver à un confort thermique hivernal, estival et un confort lumineux.

Les systèmes de chauffage solaire passif peuvent être classés en deux catégories : systèmes à gain direct et systèmes à gain indirect.

1.2.2 Les systèmes à gain direct :

Ces systèmes sont basés sur l'aménagement d'espaces vitrés orientés vers le sud. L'énergie lumineuse du soleil entre à travers les vitres et se projette directement ou indirectement sur les parois de la pièce et sur les meubles.

Cette énergie est absorbée puis libérée sous forme de chaleur. Le stockage thermique est réalisé par des planchers en béton et par des cloisons dimensionnées en conséquence, si les surfaces vitrées reçoivent plus d'énergie que les masses thermiques ne peuvent stocker, l'espace habitable peut devenir trop chaud.

Pour limiter les apports de chaleur pendant l'été, des systèmes d'occultation sont à prévoir.

1.2.3 Les systèmes à gain indirect

Dans ces systèmes, l'énergie solaire est stockée dans une masse thermique entreposée entre un vitrage et le local à chauffer. De par son taux d'ensoleillement en hiver comme en été, une façade orientée vers le sud reste la plus recommandée pour la mise en place de ces dispositifs.

Parmi les systèmes développés dans ce sens figure :

1.2.3.1 Les serres

Une serre bioclimatique est un espace tampon vitré et accolé à la maison, orienté sud et non chauffé. Elle communique avec la maison par des fenêtres ou des baies vitrées au rez de chaussé mais aussi à l'étage pour faire circuler la chaleur où on le souhaite.

En ce qui concerne son fonctionnement, une serre solaire utilise simplement les **rayons du soleil** de manière passive pour se réchauffer. Elle fonctionne donc grâce à l'effet de serre, d'où son nom. Les rayons du soleil chauffent l'air de la serre et celle-ci peut alors le transmettre dans la maison.

Le principe du chauffage avec une serre repose sur la sélectivité du verre vis à vis du rayonnement solaire, par sa transparence aux rayonnements de faibles longueurs d'ondes, et son opacité aux rayonnements de grandes longueurs d'ondes.

Les rayons du soleil émis à une température élevée (5800 °K) sont composés de radiations de courtes longueurs d'ondes. Ces dernières traversent la vitre, et se projettent sur les parois opaques qui se chauffent et vont émettre un rayonnement de grande longueur d'onde.

Le rayonnement, ainsi piégé, cède une partie de son énergie aux murs en contact avec la maison, et qui à leurs tours vont la restituer à l'air ambiant des pièces adjacentes.

Le stockage de l'énergie récupérée peut se faire soit dans une maçonnerie lourde capable de garder l'énergie calorifique pour la restituer un certain temps plus tard, soit dans d'autres matériaux qui peuvent jouer ce rôle d'éléments stockeurs déphaseurs.[2]

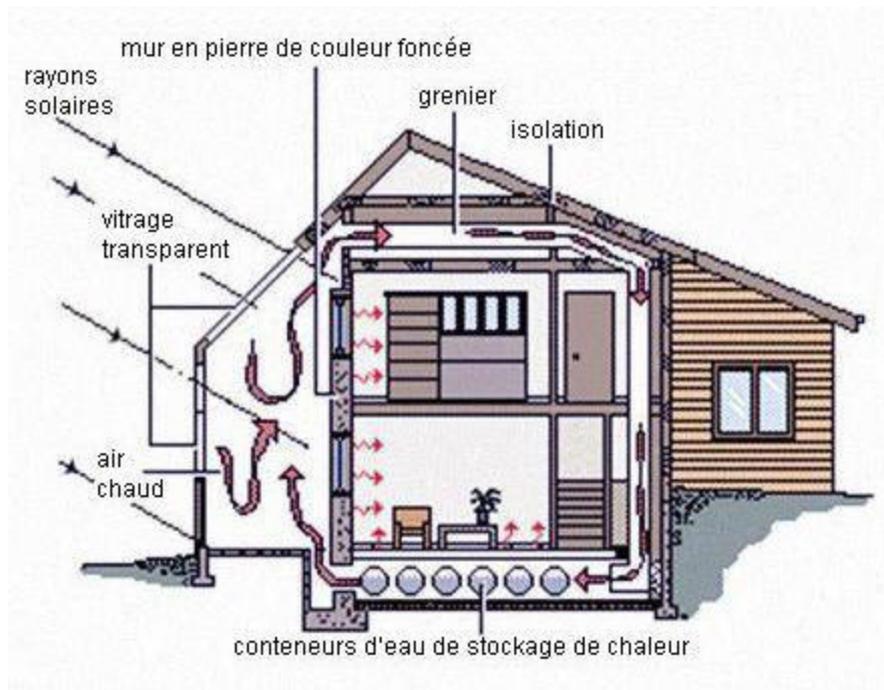


Fig.1-1 : Schéma de Fonctionnement d'une serre

La maison Balcomb en est un bon exemple (Fig.1-2), elle fût conçue et construite en 1975 à Santa Fe au nouveau Mexique par Wayn et Susan Nichols [3].

Le stockage est réalisé par des lits de pierre disposés dans le sol de telle manière que la chaleur soit cédée naturellement au local.

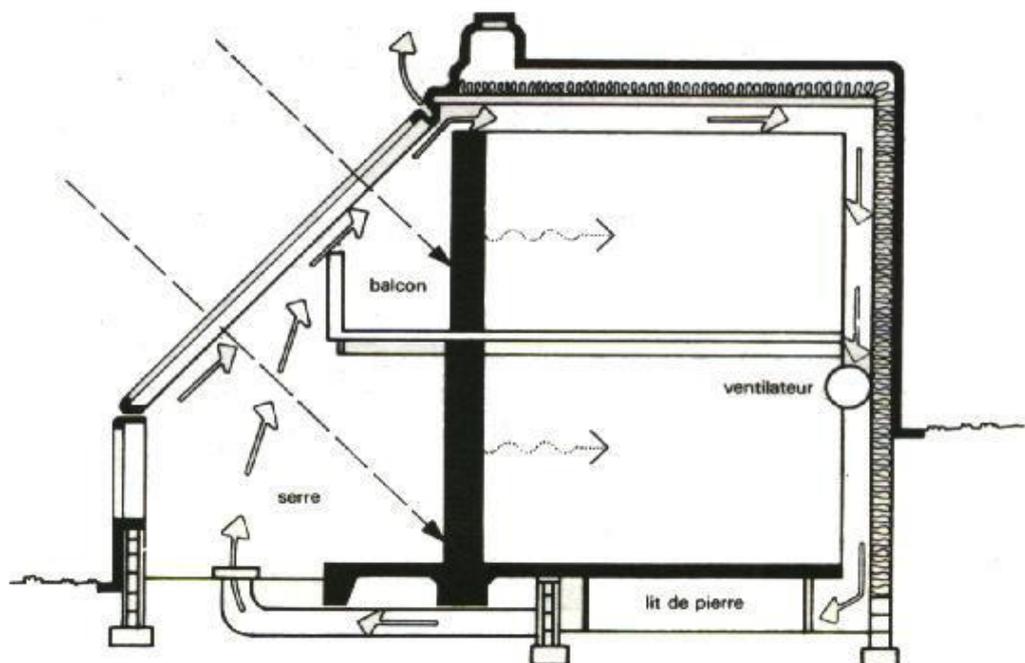


Fig. 1-2 : Maison Balcomb

Partant du même principe, des galets de pierre peuvent être entreposés verticalement, entre les cloisons de la maison. L'air chaud est acheminé par des ventilateurs soit directement à l'intérieur de la pièce soit dans le volume de stockage, ce dernier doit être régulièrement surveillé car à cause de l'humidité il peut être le siège de développement de certains champignons.

1.2.3.2 Le mur trombe

Une technique assez simple consiste à faire passer l'air ambiant de la pièce par convection naturelle dans une cavité. Les rayons solaires traversent tout d'abord une paroi vitrée et chauffent ensuite le fluide qui circule dans la cavité.

Le rayonnement non utilisé est emmagasiné par une surface absorbante possédant une grande inertie thermique et est ensuite restitué dans la pièce par radiation et convection. Le mur massif comporte également deux orifices. La première est située en bas pour permettre au fluide de pénétrer dans la cavité tandis que l'autre est placée dans la partie haute afin que l'air chauffé puisse sortir et retourner dans la pièce.

Des clapets sont placés aux orifices afin de contrôler la circulation de l'air. Ceux-ci bouchent les orifices lorsque l'air n'est pas assez chauffé pour fournir un apport de chaleur dans la pièce et aussi pour éviter que la thermo-circulation s'inverse. Le fluide chaud et le rayonnement absorbé par la masse sont utilisés pour chauffer la pièce.

Ce système s'appelle le mur de Trombe ou le mur solaire avec vitrage et est illustré par la figure (Fig. 1-3) Celui-ci a été inventé par Félix Trombe en 1956.

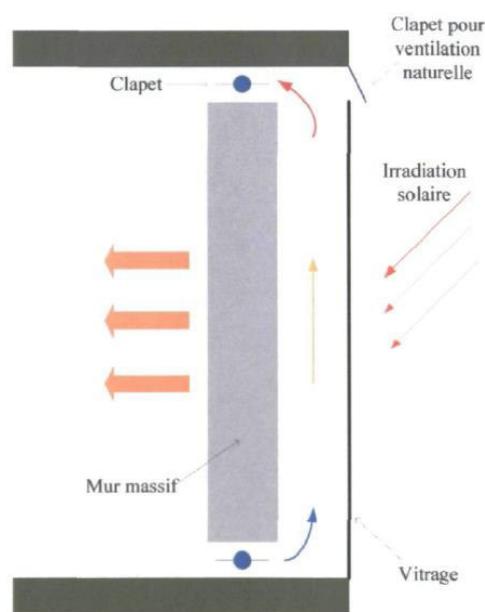


Fig. 1-3 : schéma d'un mur trombe

A l'usage du mur Trombe des inconvénients ont été notés, comme une surchauffe pendant les journées ensoleillées, et une mauvaise répartition de la chaleur à l'intérieure de l'habitation.

Le Laboratoire d'Energétique Solaire d'Odeillo a tenté dans une étude de pallier à ces inconvénients en disposant à l'intérieur du mur capteur des cavités à sections en forme de parallélogrammes remplis d'eau. Cette technique a l'avantage d'améliorer le transfert de chaleur vers l'intérieur tout en augmentant le pouvoir de stockage calorifique du mur. [4]

James Baer a conçu un système assez proche du mur Trombe, à la différence près qu'il a utilisé des bidons métalliques remplis d'eau à la place de la maçonnerie.

Une maison prototype a été construite à Corrodes au Nouveau Mexique utilisant 56 bidons superposés de 220 litres chacun (Fig. 1-4).

Un panneau réfléchissant en aluminium est disposé de façon à être rabaisé durant les journées d'hiver pour profiter du rayonnement solaire réfléchi, et à être relevé la nuit pour éviter les pertes thermiques vers l'extérieur. En été, l'opération est inversée pour éviter l'insolation le jour et profiter des échanges avec l'extérieur la nuit. [2]

L'utilisation de l'eau comme masse thermique est intéressante vu qu'elle a une meilleure capacité calorifique comparée à des éléments en maçonnerie tout en étant bon marché. Néanmoins un tel système présente quelques inconvénients. Il est difficilement adaptable à des constructions déjà bâties et pose le problème du choix des récipients pour résister à la corrosion.

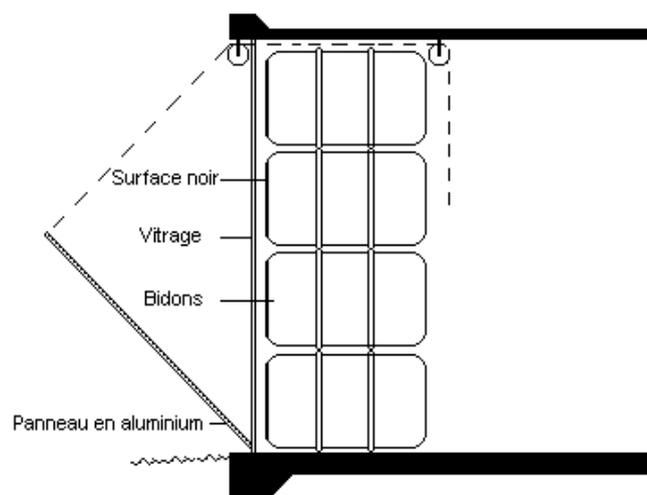


Fig. 1-4 : La maison Baer

H.Manz, P.W.Egolf, P.Suter et A.Goetzberger [5] ont mené une étude dans laquelle ils utilisent un mur extérieur composé d'un vitrage, et d'un matériau à changement de phase qui à la fois possède une grande capacité calorifique ainsi que certaines propriétés optiques.

Le mur capteur permet aux rayons solaires visibles de le traverser, participant ainsi à l'éclairage naturel, alors que les rayons solaires non visibles sont absorbés et transformés en énergie calorifique.

B.Peuportier et J.Michel [6] ont mené une étude sur un dispositif composé de capteurs solaires disposés sur la toiture et munis d'un système de contrôle. Quand la température à l'intérieur des capteurs devient supérieure à la température ambiante, le système se déclenche et permet à l'air chaud de circuler. Pour éviter les surchauffes, un thermostat ferme les orifices quand la température ambiante atteint une certaine valeur fixée par les habitants.

Dans un autre dispositif, l'énergie solaire récupérée dans un capteur orienté sud est transférée à un capteur orienté nord à travers des canaux situés dans le plafond et le plancher. Le but de ce concept n'est pas de chauffer directement les locaux, mais plutôt d'augmenter la température de l'air au contact des murs extérieurs, de manière à réduire les pertes de chaleur (Fig. 1-5).

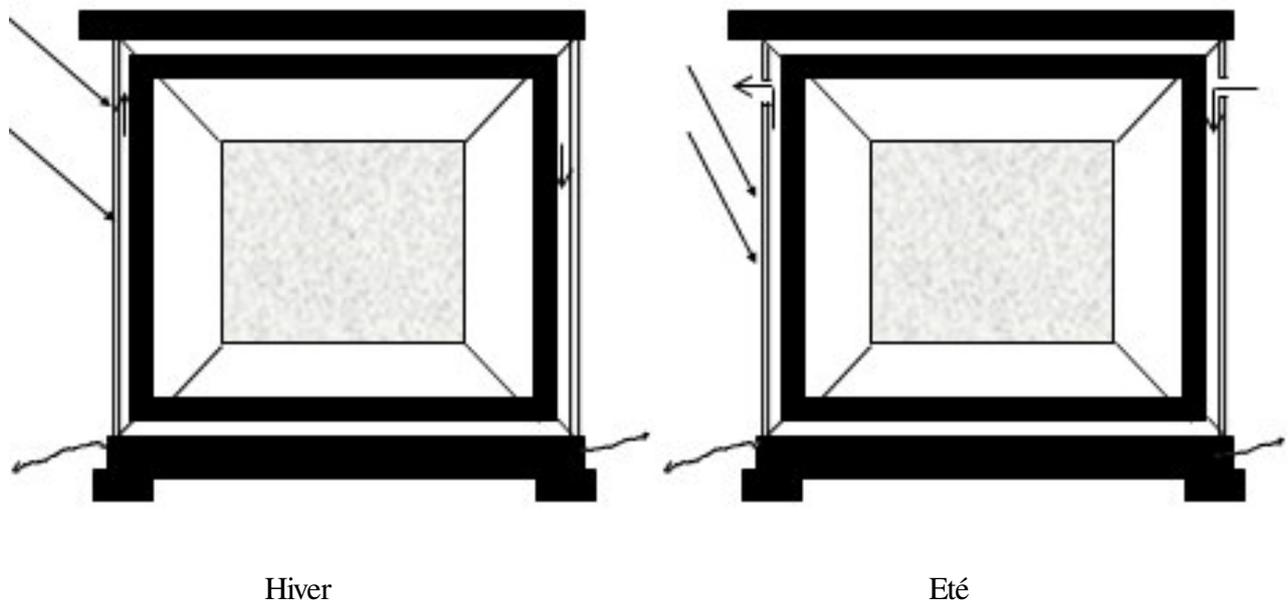


Fig. 1-5: Système à double capteur

A la suite d'études en architecture et sur les fluides dynamiques en convection naturelle, menées par le professeur O.A.Barra et le thermicien T.Costantini, un système original de chauffage passif dans le bâtiment a été développé (Fig. 1-6). Le système de captation est basé sur les techniques d'un capteur à air. Un absorbeur de couleur noire est disposé entre le vitrage et le mur de manière à profiter d'une double circulation naturelle. [7]

Durant les journées d'hiver, l'air dans les deux canaux situés de part et d'autre de l'absorbeur se chauffe au contact de celui-ci, remonte naturellement, et pénètre dans des canaux situés dans le plafond. Une partie de la chaleur est absorbée par le plafond pour être restituée, pendant la nuit par convection et rayonnement, alors qu'une deuxième partie est injectée directement sous forme d'air chaud à travers des orifices. Cette technique a l'avantage d'offrir une bonne répartition de la température à l'intérieure de la pièce.

En été, le système peut participer au rafraîchissement et éviter les surchauffes. L'air est aspiré par des ouvertures se trouvant sur la façade Nord, il rafraîchit l'intérieur et est évacué vers l'extérieur par des volets se trouvant dans la partie haute du vitrage.

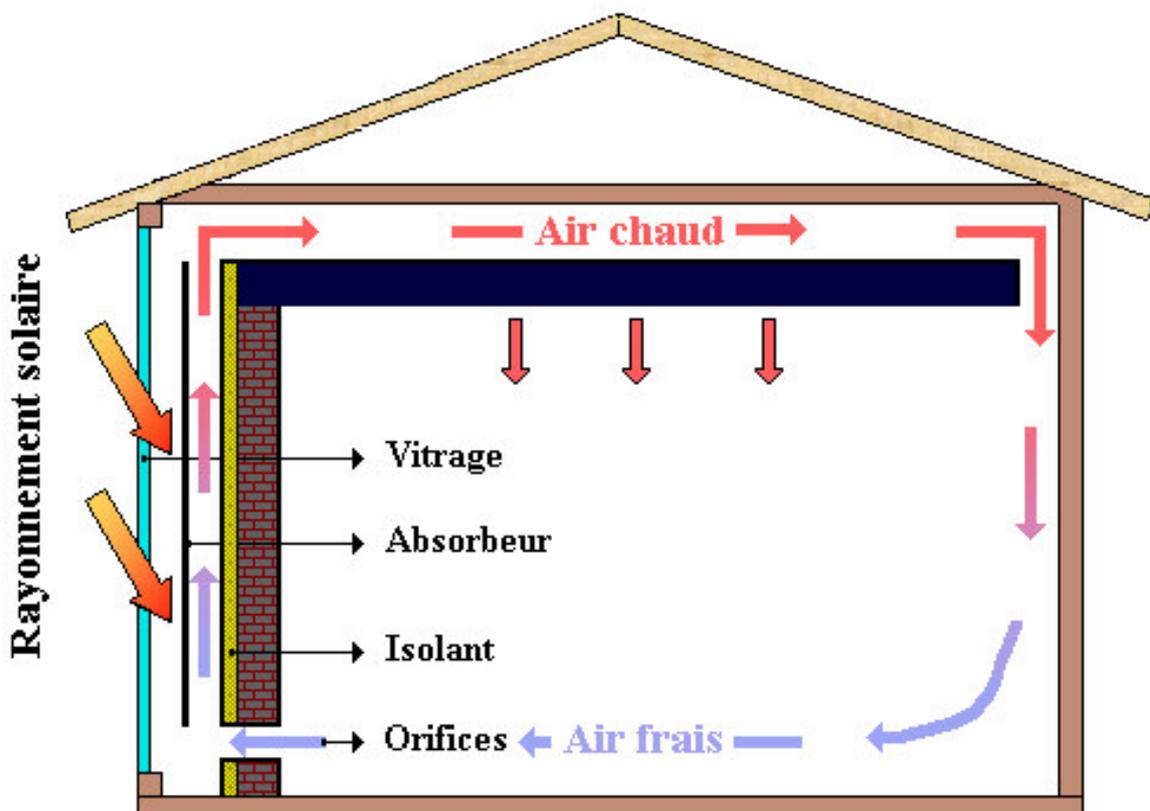


Fig. 1-6 : Système Barra–Costantini

De nombreuses autres études ont été menées pour améliorer la performance de chauffage du mur solaire avec vitrage. **Shen et al.** [8] font une étude numérique sur un mur de Trombe classique et aussi sur un mur de Trombe composite qui contient un mur isolant de plus (afin de réduire les pertes thermiques) pour ensuite faire la comparaison entre les deux.

Ils font un circuit de résistances thermiques pour chacun d'eux et résolvent ceux-ci avec la méthode des différences finies et aussi avec TRNSYS™, un programme qui permet de simuler la performance des systèmes thermiques. Shen et al, obtiennent comme résultat que le mur de Trombe composite a des températures moins élevées que le mur solaire normal, car la résistance thermique du premier est plus grande. **Ji et al.** [9], Quant à eux, ont aussi tenté des expériences et des simulations sur un mur de Trombe amélioré dans une pièce qui comportait des façades thermo-isolantes. Le système amélioré comportait sur son mur absorbant, une mince couche d'isolant en acier noir. Ils ont divisé le mur en plusieurs couches et ils ont aussi utilisé la méthode des différences finies pour calculer les taux de transfert de chaleur. Il a été conclu dans cet article que le mur de Trombe amélioré pouvait maintenir une température ambiante plus élevée que le mur solaire classique, ce qui prouve que grâce à une mince couche d'isolant, la valeur de la chaleur transférée aux façades thermo-isolantes peut être plus élevée et l'efficacité du système est également améliorée. **Zohir younissi et all.** [10], ont mené une étude expérimentale 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 une étude **M.K. Cherier.** [11], ont présentés également les performances énergétiques de la paroi à partir de bilans fluxmétrique ou enthalpique, Cet article se concentre donc sur l'étude théorique d'un mur Trombe lors de son application sur l'architecture de l'enveloppe d'un habitat.

Fakhreddine Abbassi et all. [12], dans cette étude, un modèle numérique d'un système de mur Trombe a été développé avec le 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 Borj Cedria. Ce modèle a ensuite été adopté pour l'enquête numérique de bâtiments typiques tunisiens. La première partie de l'étude a montré que la surface du mur-trombe joue un rôle important sur l'efficacité énergétique. Et dans la deuxième partie une étude paramétrique a été élaborée.

Mai Thi Do, Louis Gosselin. [13] L'objectif principal de cette étude était d'optimiser le mur solaire avec vitrage, afin de minimiser la charge de chauffage et de climatisation dans un bâtiment.

Pour atteindre cet objectif, un modèle numérique a été réalisé dans le logiciel MATLAB™ permettant de simuler le comportement thermique du système et de déterminer la charge de chauffage et de climatisation requise pour maintenir les conditions intérieures confortables dans un bâtiment résidentiel, des études paramétriques ont été faites afin d'étudier l'influence de différents paramètres du système sur la performance de celui-ci et de trouver les valeurs optimales. L'étude considère une période d'un an et utilise des données météorologiques pour la ville de Québec (Canada).

1.2.3.3 Travaux sur le système barra-costantini :

Luca Buzzoni [14].présente dans son travaille une solution numérique au problème de la convection naturelle dans un système de chauffage passif. Le système étudié (barra-costantini) est une variante du système Trombe-Michel. La principale différence consiste en une isolation de la paroi sud, deux « canaux » solaires séparées par une plaque métallique minces, jouant le rôle d'un collecteur, et un stockage thermique au-dessus du plafond des pièces à chauffées. (fig. 1-7)

La résolution numérique du modèle simple basé sur les équations de la conservation de la masse et de l'énergie est réalisée par la méthode des différences finies. Elle permet d'obtenir, en fonction du temps, les profils de la température de chaque composant du système, ainsi que les vitesses d'air dans les canaux.

Une comparaison du modèle avec des données expérimentales est réalisée. Il a trouvé un accord très satisfaisant. Les flux énergétiques en fonction du temps sont également fournis pour le système étudié, et comparés à ceux correspondant au cas du système Trombe-Michel.

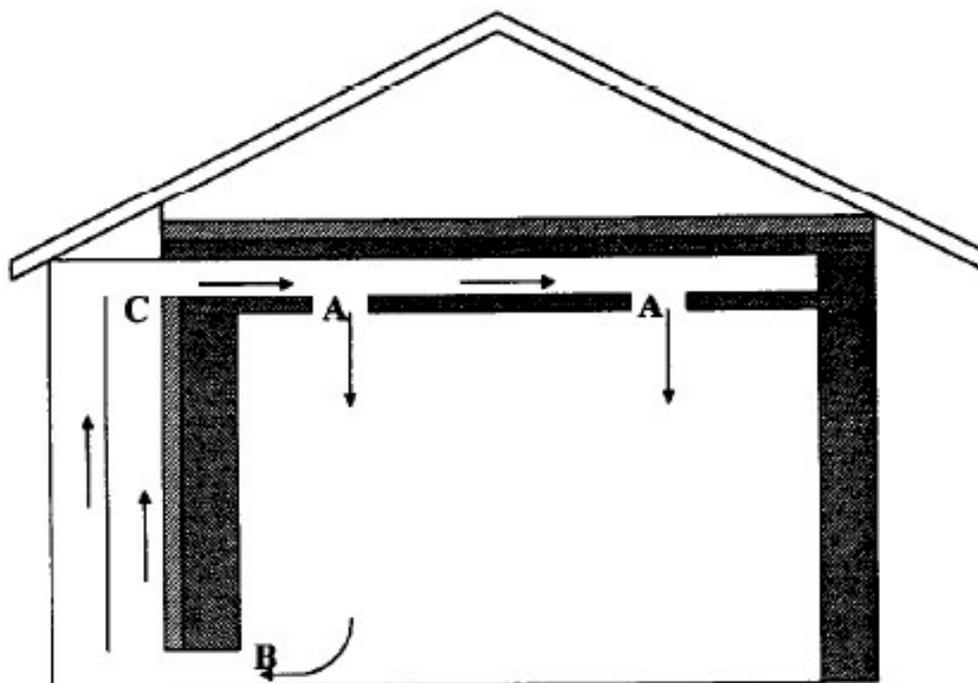


Fig.1-7 : le système étudié par Luca buzzoni

K. Imessad et all. [15]. A étudié un système de chauffage solaire passif, avec un intérêt particulier accordé à l'aspect économique. Le système étudié est celui développé par O.A.Barra et T.Costantini, d'après les auteurs le système semble bien adapté aux conditions climatiques et économiques de l'Algérie.

Dans la première partie de ce travail, un modèle théorique représentant le comportement thermique d'un local muni du dispositif de chauffage étudié est élaboré (fig. 1-8). Le modèle est validé après confrontation des résultats auxquels il aboutit avec ceux d'une étude expérimentale réalisée sur un site italien. Le modèle permet dans un premier temps de déterminer l'évolution de la température des différents éléments d'un local muni du système Barra-Costantini afin de déterminer si les conditions de confort thermique sont respectées. Cette étude permet de quantifier l'économie d'énergie réalisée par l'adjonction du système étudié à un système de chauffage classique.

On note que ce dernier article est la base de notre étude, Le modèle retenu est inspiré de celui présenté dans cet article ainsi que les équations intervenant dans notre modèle.

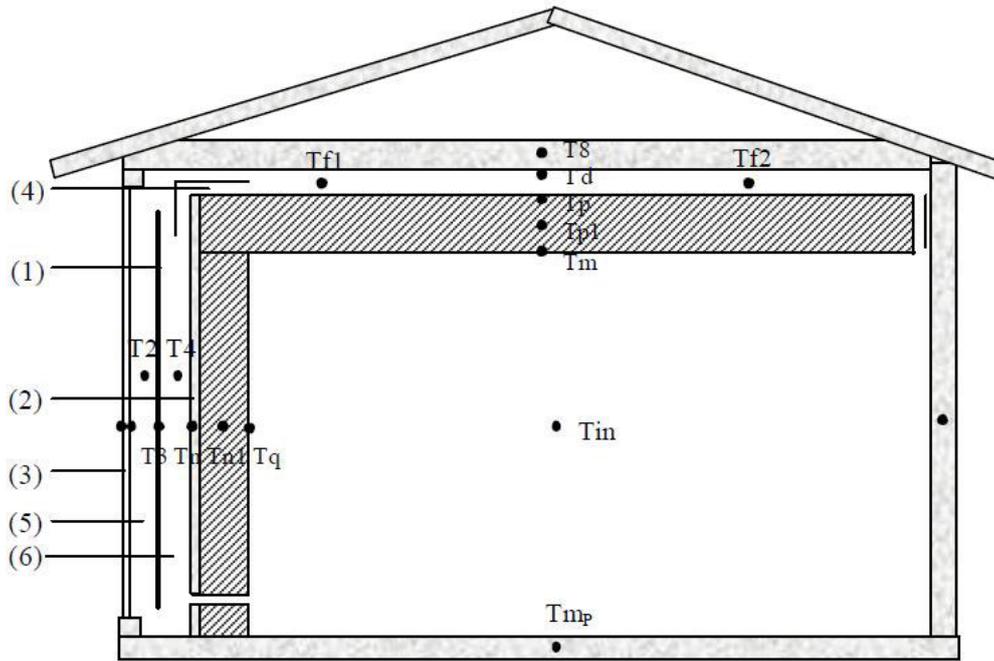


Fig. 1-8 : le modèle étudié par K. Imessad

1.3 Généralités sur le transfert de chaleur :

L'existence d'une différence de température entre deux systèmes, quel que soit le milieu qui les sépare, même le vide, fait intervenir un échange d'énergie connu généralement sous le nom de « Transfert de chaleur ».

Dans ce mémoire nous procédons à un rappel bref sur les phénomènes mis en jeu. Il existe trois modes de transfert de chaleur qui existent presque dans tous les systèmes. [16]

1.3.1 Les modes de transfert de chaleur :

1.3.1.1 La conduction :

La conduction est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel (solide, liquide, gaz), sans mouvement de matière, et qui fait passer la chaleur des zones chaudes aux zones froides à l'aide de mécanismes à l'échelle microscopique (vibrations atomiques ou moléculaires, diffusion électronique,...). La conduction est le seul mécanisme qui permet à la chaleur d'être transmise dans un solide.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de **FOURIER** ; liant linéairement entre la densité du flux thermique est le gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -k \overrightarrow{\text{grad}} T$$

K est le coefficient de conductivité thermique du milieu de transmission (unité $w.m^{-1}.k^{-1}$)

Les conductivités thermiques des matériaux varient d'une façon considérable d'une substance à une autre, de sorte que l'on distingue en général les matériaux conducteurs de la chaleur des matériaux isolants suivant l'ordre de grandeur de leur conductivité thermique. La conductivité thermique dépend également de la température. Elle dépend aussi de l'état du matériau considéré (solide, liquide ou gaz).

1.3.1.2 La convection :

C'est le mode de transfert qui s'effectue uniquement dans les milieux fluides, plus précisément dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide en mouvement.

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue :

- La convection naturelle (libre) : ou le mouvement est dû à l'action simultanée des différences des températures qui existe dans le milieu et d'un champ de forces massiques.
- La convection forcée : ou le mouvement du fluide est induit par un moyen mécanique (pompes, ventilateur, etc....)

1.3.1.3 Le rayonnement

Il existe également un mode de transfert d'énergie thermique qui, contrairement à la conduction ou à la convection, ne nécessite la présence d'aucun support matériel solide ou fluide.

La manifestation la plus commune de ce phénomène est celle du rayonnement solaire qui nous parvient sur la terre après avoir parcouru une distance considérable dans le vide spatial.

Ce transfert d'énergie fait intervenir un mécanisme physique qui est le rayonnement électromagnétique, dont la propagation est quasi instantanée, du moins à l'échelle des distances terrestres.

1.3.1.3.1 Le rayonnement électromagnétique

Tous les corps solides, liquides ou gazeux émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de leur énergie interne. Il s'agit d'un flux de chaleur émis par le corps considéré.

Ce rayonnement n'est pas une onde monochromatique. Il est composé de radiations de longueurs d'onde différentes, donnant des spectres continus dans le cas des solides, ou des spectres de bandes dans le cas de certains gaz.

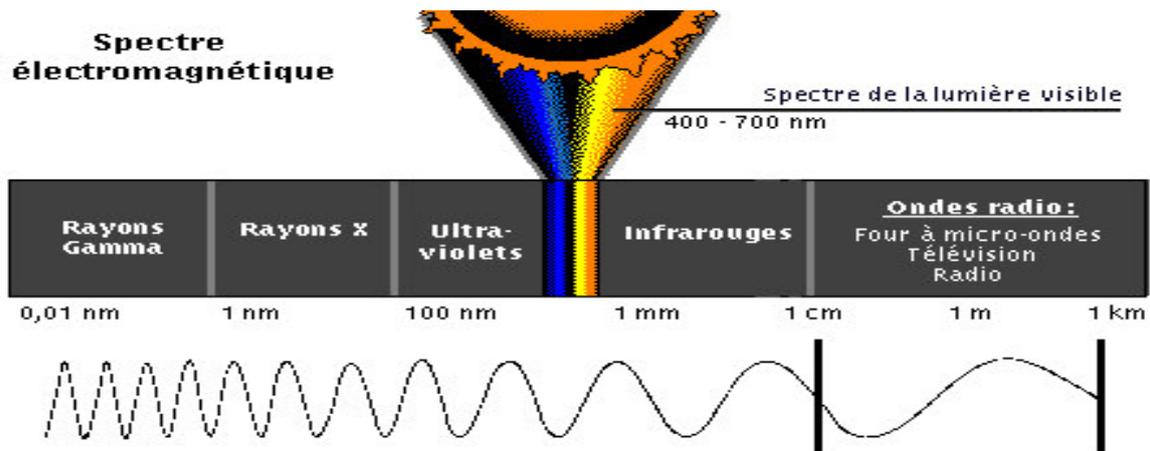


Fig. 1-9 le spectre électromagnétique

Dans ce domaine de $0,1 \mu\text{m}$ à $100 \mu\text{m}$, nos sens sont capables de percevoir le rayonnement thermique sous la forme d'une sensation de chaleur. A l'intérieur d'une bande encore plus étroite comprise entre $0,4 \mu\text{m}$ et $0,8 \mu\text{m}$, appelée spectre visible, le rayonnement devient sensible à la rétine de notre œil. Le nom de *lumière* se réserve exclusivement à cette partie visible du rayonnement thermique.

Le rayonnement thermique dans la partie non visible du spectre porte le nom d'ultraviolet (U.V) du côté des courtes longueurs d'onde (de $0,1$ à $0,4 \mu\text{m}$), et d'infrarouge (I.R) du côté des grandes longueurs d'onde (de $0,8$ à $100 \mu\text{m}$).

La propagation du rayonnement thermique s'effectue dans le vide en ligne droite, et à la vitesse de la lumière $C = 3.108 \text{ m/s}$, sans aucune diminution de l'énergie transportée. On dit, de ce fait, que le vide est un milieu parfaitement transparent.

La plupart des gaz simples (O_2 , H_2 , N_2) sont également des milieux parfaitement transparents.

Par contre, certains gaz composés (en particulier CO₂, H₂O, CO), sont en revanche dits partiellement transparents, car la propagation s'y accompagne d'une diminution de l'énergie transportée, ce qui accroît d'autant l'énergie interne du gaz traversé. Certains liquides et solides (plastiques, verres) entrent également dans cette catégorie.

La grande majorité des liquides et solides sont au contraire dits opaques, car ils arrêtent la propagation de tout rayonnement dès leur surface.

Un rayonnement incident (Φ_i) qui arrive sur un corps opaque, est en partie réfléchi (Φ_r), tandis que le reste est absorbé (Φ_a) sous forme de chaleur au voisinage de l'impact.

Dans nos études sur l'équilibre thermique d'un système, tout corps composant ce système devra être considéré d'un double point de vue:

- Comme *émetteur*, car il sera toujours la source d'un rayonnement dépendant de sa température (sauf si ce corps est parfaitement transparent).
- Comme *récepteur*, car il recevra des rayonnements émis, réfléchis ou diffusés par les corps qui l'entourent. Une partie du flux reçu sera absorbé, et le reste sera réfléchi ou diffusé.

1.4 Caractéristiques du climat en Algérie :

1.4.1 Introduction :

L'Algérie est un pays de la zone subtropicale du Nord-africain. Son climat est très différent entre les régions (Nord-Sud, Est-Ouest). Il est de type méditerranéen sur toute la frange nord qui englobe le littoral et l'atlas tellien (étés chauds et secs, hivers humides et frais), semi-aride sur les hauts plateaux au centre du pays, et désertique dès que l'on franchit la chaîne de l'atlas saharien.

1.4.2 Les zones climatiques en Algérie

Les zones climatiques considérées dans le présent DTR (annexe 1) sont les suivantes :

- la zone A comprend le rivage de la mer et parfois le versant Nord des chaînes côtières,

- la zone B comprend la plaine derrière le rivage de la mer et les vallées entre les chaînes côtières et l'atlas tellien ; au sein de cette zone, on distingue une sous-zone B' qui comprend la vallée du Chellif.

-la zone C comprend les Hauts-Plateaux compris entre l'atlas tellien et l'atlas Saharien.

-la zone D comprend le Sahara, au sein de laquelle on distingue une sous-zone D'.

Le découpage administratif est celui en vigueur en Avril 1998.

1.5 Système adopté

Notre pays qui présente des climats très variés, dispose d'un gisement solaire important caractérisé par une durée moyenne d'ensoleillement de 2000 heures/an et qui peut atteindre les 3900 heures en hauts plateaux, d'où l'idée de son utilisation pour le chauffage.

La promotion d'un système de chauffage solaire dans notre pays ne peut se faire que si ce dernier satisfait aux exigences suivantes :

- Le système doit s'adapter aux conditions climatiques de l'Algérie.
- La recherche des économies ne doit pas se faire aux dépens du confort.
- Le coût de l'installation doit rester raisonnable.

En considérant ces conditions, et d'après l'article présenté dans la référence [2], pour les auteurs le système Barra–Costantini paraît le plus approprié (voir fig. 1-6) on va travailler alors dans ce cadre. Le système Barra–Costantini a l'avantage d'être peu coûteux et adaptable aux maisons déjà bâties, Contrairement aux autres techniques de chauffage passif ou les risques de surchauffes sont à prévoir, ce système offre un cadre de vie agréable.

Chapitre II:

MODELISATION MATHEMATIQUE

2.1 Le système a adopté :

Pour atteindre les objectifs ci-haut mentionnés, un modèle mathématique du système barra-costantini sera requis. Le modèle retenu est inspiré de celui présenté dans la réf. [15]. On décrit ce modèle mathématique dans ce chapitre qui suit. Essentiellement, le modèle est un circuit thermique contenant des résistances [15], et une équation d'énergie est déterminée à chaque nœud du modèle. Pour la plupart des nœuds, la température est l'inconnue et elle dépend de la température aux autres nœuds du modèle.

Le système Barra–Costantini (Fig. 1-6) est basé sur les techniques d'un capteur à air avec mise en place d'un absorbeur entre un mur et un vitrage de manière à profiter d'une double circulation naturelle. Durant les journées d'hiver, l'air de part et d'autre de l'absorbeur se chauffe, remonte naturellement et pénètre dans un canal dans le plafond. Une partie de la chaleur est absorbée par ce dernier puis restituée après un certain temps, alors qu'une deuxième partie est directement injectée sous forme d'air chaud, participant à un chauffage instantané du local.

2.2 Locale étudié :

La chambre simulée est une chambre qui fait 4 m de largeur, 4 m de longueur et 3m de hauteur. Les murs sont en brique de 15 cm avec la présence d'une fenêtre de 1.2 x 1.2 dans la façade sud, alors que le plafond est en béton de 20 cm d'épaisseur.

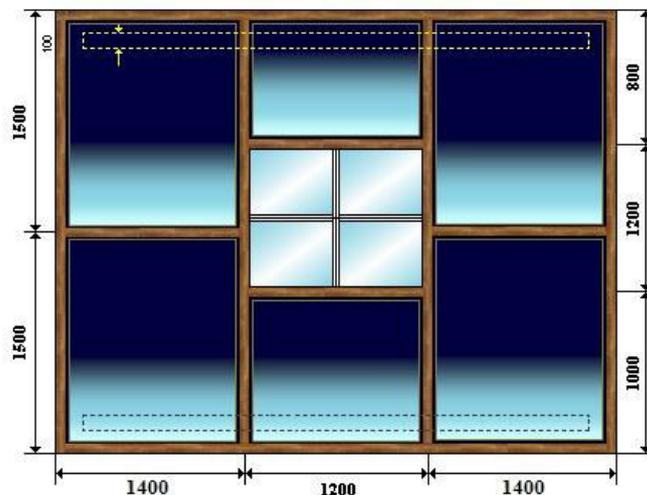


Fig. 2-1 la façade SUD du locale étudié

2.3 Méthode de modélisation adoptée

La modélisation consiste à élaborer un modèle mathématique reliant des grandeurs d'entrée (données connues et conditions imposées) et des grandeurs de sortie (données inconnues à calculer) permettant de prévoir le comportement du système. L'intérêt de la modélisation est de :

- Permettre de décrire d'une manière simple des phénomènes parfois complexes à l'aide d'un jeu d'équations et de paramètres.
- La durée des expériences, qui peut s'étaler sur une année ou plus, peut coûter assez cher en matière d'argent et de temps, ces coûts peuvent être amortis grâce à des modèles de simulation.
- La modélisation permet également par des manipulations simples sur le modèle de déterminer les paramètres les plus influents pour une optimisation des performances du système.

Dans le bâtiment, l'utilité de la modélisation prend toute sa signification, elle permet d'étudier un système avant l'existence même de ce dernier, afin d'analyser son comportement, faciliter sa conception, et de ce fait réduire les coûts de réalisation tout en améliorant la qualité de la construction. Dans le cas d'une maison, la complexité des échanges rend impossible l'élaboration d'un modèle qui simule exactement le comportement de cette dernière, on pourra juger de la qualité du modèle à adopter d'après trois critères : L'exactitude, la rapidité d'exécution et la simplicité.

Compte tenu des hypothèses simplificatrices qui accompagnent toute modélisation, cette dernière reste une représentation déformée du système réel et n'apporte que des réponses qui s'approchent plus ou moins de la réalité. On ne peut se prononcer sur la validité d'un modèle qu'après une confrontation entre les résultats apportés par la simulation et les résultats expérimentaux. Un modèle est jugé apte à être utilisé si la différence entre les deux résultats ne dépasse pas une certaine marge d'erreur déjà désignée.

2.3.1 Les hypothèses adoptées

Le modèle mis en place est basé sur la méthode nodale, cette méthode procède par une discrétisation spatiale en régime transitoire qui conduit à un système d'équations différentielles. Le modèle a été élaboré en se basant sur les hypothèses suivantes :

- Chaque nœud représente un volume dont la température est uniforme. La température d'un élément étant différente surtout suivant la hauteur, cette hypothèse reste la faiblesse majeure de notre modèle. Toutefois, cette approche donne des résultats très satisfaisants en termes de bilan énergétique.
- Le débit massique de l'air qui s'écoule dans la cheminée solaire est constant pour éviter les risques de surpression ou dépression dans le local. Ce débit est supposé uniformément distribué dans le plafond.
- Les pertes à travers le sol sont négligées.

Les caractéristiques physiques des matériaux sont supposées constantes.

Le modèle s'appuie sur la décomposition en plusieurs nœuds (voir figure 2-2) représentant les parties dont la température est relativement uniforme, et en nœuds représentant les conditions extérieures :

- L'air extérieur.
- Le ciel.

Il s'agit d'établir le bilan thermique au niveau de chaque nœud afin d'arriver à un ensemble d'équations cohérentes.

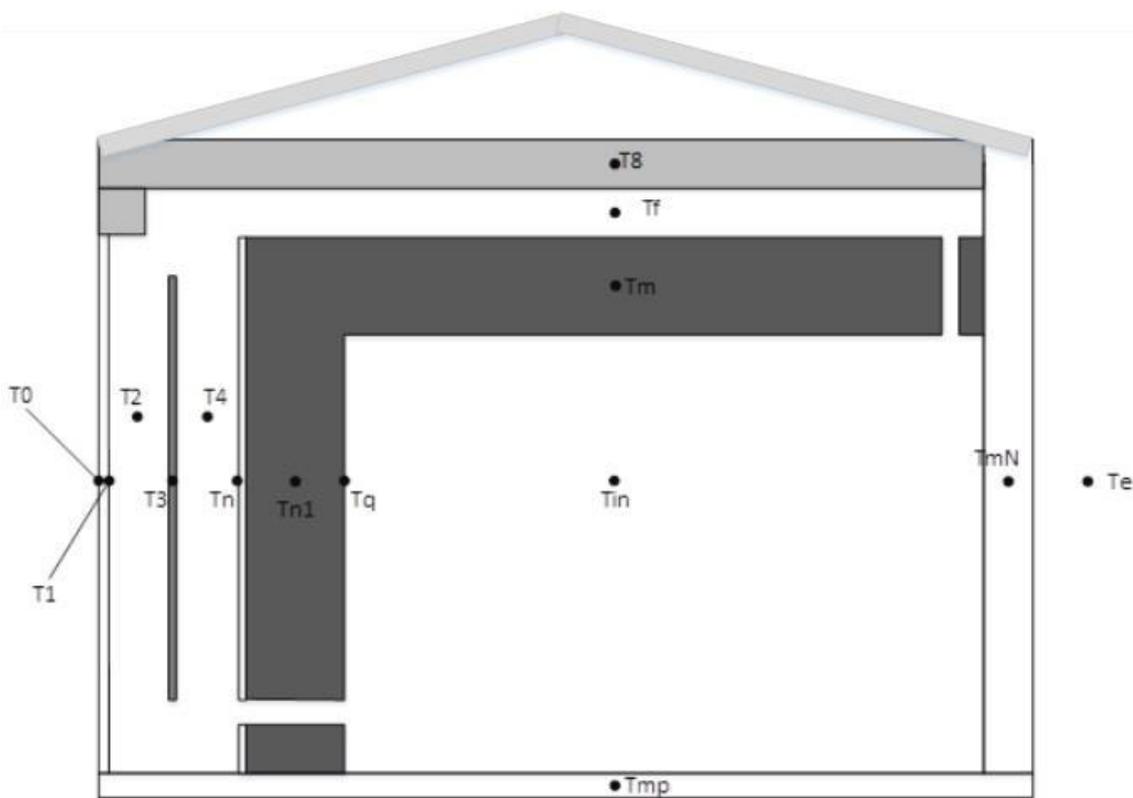


Fig. 2-2 : Modélisation du système

Nœuds :

T0 : Température du premier vitrage.

T1 : Température du deuxième vitrage.

T2 : Température moyenne de l'air entre l'absorbeur et le vitrage.

T3 : Température de l'absorbeur.

T4 : Température moyenne de l'air entre l'absorbeur et le mur.

Tn : Température de la face extérieure du mur capteur.

Tn1 : Température du mur capteur.

Tq : Température de la face intérieure du mur capteur.

Tin : Température intérieure du local.

Tf : Température de l'air dans le plafond

T8 : Température de la partie supérieure du plafond.

Tm : Température de la surface intérieure du plafond.

Tmp : Température du plancher.

TmN, TmO, TmE : Température des parois nord, ouest et est.

2.4 Bilan Thermique

2.4.1 Premier Vitrage

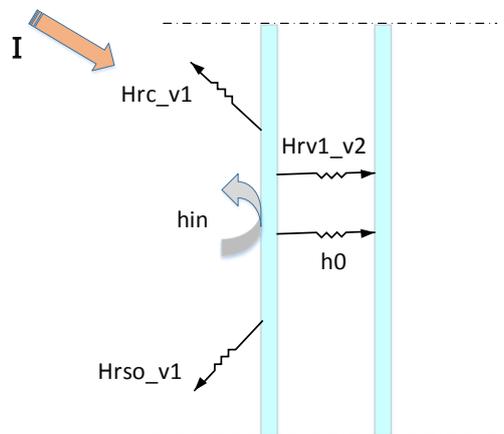


Fig. 2-3 : Bilan d'énergie au niveau de la première vitre

Le bilan thermique effectué sur la vitre extérieure se traduit par l'équation suivante:

$$\rho_v.V_v.Cp_v.\frac{dT0}{dt} = h_0.S_v.(T1-T0) + hr_{C-v1}.S_v.(Tae-T0) + he.S_v.(Te-T0) + hr_{SO-v1}.S_v.(Tso-T0) + hr_{v1-v2}.S_v.(T1-T0) + \alpha_v.I \quad (2.1)$$

L'échange par convection entre la vitre et l'air extérieur se traduit par l'effet du vent. Le coefficient d'échange par convection est donné par la corrélation de HOTTEL et WOERTZ.

$$he = 5.67 + 3.86.V_v \quad (2.2)$$

La quantité d'énergie échangée par rayonnement entre deux surfaces portées à une température uniforme T_i , T_j est donnée par :

$$\phi_r = hr.S.(T_i - T_j) \quad (2.3)$$

Entre le vitrage et la voûte céleste le coefficient d'échange par rayonnement est égal à :

$$hr_{C-v1} = \sigma.\xi_v.\frac{1 + \cos \beta}{2}.(Tae + T0)(Tae^2 + T0^2) \quad (2.4)$$

La température de la voûte céleste n'étant pas mesurable, des formules ont été développées pour la calculer en fonction de la température extérieure, parmi elles, celle proposée par Swinbank [17] et qui donne :

$$Tae = 0.0552.Te^{1.5} \quad (2.5)$$

Te et Tae sont en [K].

Entre le vitrage et le sol le coefficient d'échange par rayonnement est égal à :

$$hr_{SO-v1} = \sigma.\xi_v.\frac{1 - \cos \beta}{2}.(Tso + T0)(Tso^2 + T0^2) \quad (2.6)$$

Pour deux surfaces parallèles de surface et d'émissivité respective $S_i, \xi_i,$ et S_j, ξ_j le coefficient d'échange par rayonnement est donné par :

$$hr = \sigma \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\xi_i} - 1\right) + \left(\frac{1}{\xi_j} - 1\right) \cdot \frac{S_i}{S_j} + \frac{1}{F_{ij}}} \cdot (T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j) \quad (2.7)$$

2.4.2 deuxième vitrage

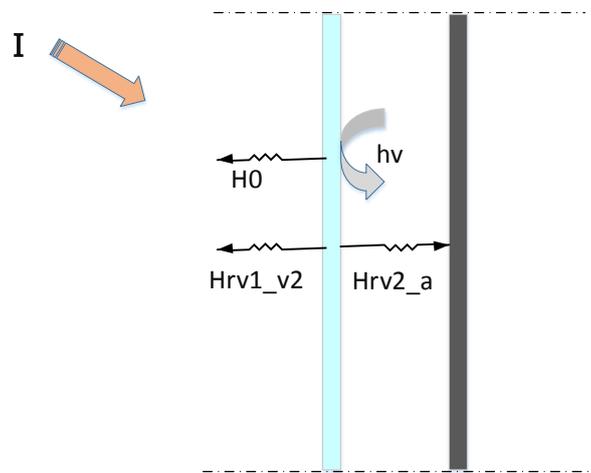


Fig. 2-4 : Bilan d'énergie au niveau de la deuxième vitre

Au niveau la vitre intérieure l'équation du bilan thermique s'écrit:

$$\rho_V \cdot V_V \cdot Cp_V \cdot \frac{dT1}{dt} = h_0 \cdot S_V \cdot (T0 - T1) + hr_{v1-v2} \cdot S_V \cdot (T0 - T1) + h_v \cdot S_V \cdot (T2 - T1) + hr_{v2-a} \cdot S_a \cdot (T3 - T1) + \tau \cdot \alpha_V \cdot I \quad (2.8)$$

Le Coefficient de rayonnement entre le vitre intérieure et l'absorbeur est donner par :

$$hr_{v2-a} = \frac{\sigma \cdot (T1 + T3)(T1^2 + T3^2)}{\frac{1}{\xi_v} + \frac{1}{\xi_a} - 1} \quad (2.9)$$

2.4.3 Absorbeur

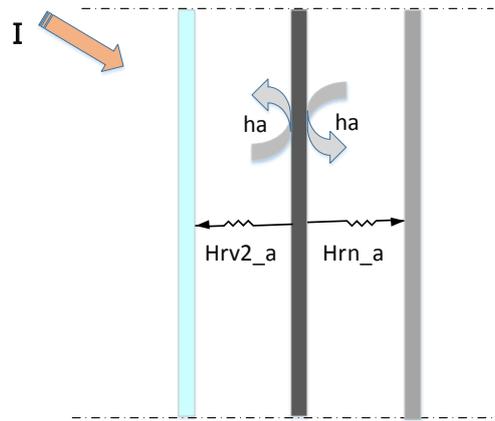


Fig. 2-5 : Bilan d'énergie au niveau de l'absorbeur

Le bilan thermique effectué sur l'absorbeur donne :

$$\rho_a \cdot V_a \cdot Cp_a \cdot \frac{dT3}{dt} = h_a \cdot S_a \cdot (T2 - T3) + hr_{v2-a} \cdot S_a \cdot (T1 - T3) + h_a \cdot S_a \cdot (T4 - T3) + hr_{n-a} \cdot S_a \cdot (Tn - T3) + \tau^2 \alpha_a \cdot I \quad (2.10)$$

Le Coefficient de rayonnement entre le vitre interieure et l'absorbeure est donner par :

$$hr_{n-a} = \frac{\sigma \cdot (Tn + T3) \cdot (Tn^2 + T3^2)}{\frac{1}{\xi_a} + \frac{1}{\xi_n} - 1} \quad (2.11)$$

2.4.4 Cheminée solaire

Le débit massique de l'air qui circule dans la cheminée solaire est donné par une formule développée par Utzinger et qui est basée sur des résultats expérimentaux. [18]

$$\dot{m} = \rho \cdot Ad \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H \cdot \left(\frac{Tf - Ti}{C \cdot Tf} \right)} \quad (2.12)$$

$$C = C1 \cdot \left(\frac{Ad}{Av} \right)^2 + C2 \quad C1=8 \text{ et } C2=2$$

T_f représente la température moyenne du fluide, T_i est la température d'entrée dans le canal que nous supposons égale à la température ambiante.

Quand l'air ne circule pas dans le canal, sa température est supposée être uniforme dans tout le volume. La température moyenne de l'air est obtenue par un bilan thermique sur le volume du canal.

$$\rho_f \cdot V_f \cdot C_{p_f} \frac{dT_f}{dt} = h_v \cdot S_v \cdot (T_1 - T_f) + h_a \cdot S_a \cdot (T_3 - T_f) \quad (2.13)$$

Plusieurs études faisant intervenir un transfert de chaleur par thermo circulation ont été faites en posant l'hypothèse d'une variation linéaire de la température le long de la cheminée solaire, nous avons constaté que cette approche surestime ce flux.

A cet effet, nous avons utilisé une deuxième hypothèse, se rapprochant mieux de la réalité, et qui considère une variation en exponentielle de la température.

Quand l'air circule sa température moyenne est donnée par [19] :

$$T_f = T_{in} + \left(\frac{2 \cdot T_{in} - T_1 - T_3}{2} \right) \left(\frac{-\dot{m} \cdot C_{p_f}}{2 \cdot h_a \cdot S_a} \left(\exp \left[\frac{-2 \cdot h_a \cdot S_a}{\dot{m} \cdot C_{p_f}} \right] - 1 \right) - 1 \right) \quad (2.14)$$

De nombreuses corrélations ont été proposées pour le calcul du coefficient d'échange par convection dans la cheminée solaire, dans une étude menée au sein de (Solar Energy Laboratory, Université du Wisconsin), D.M.Utzinger [19] propose d'utiliser les relations suivantes :

Quand la température de l'air à l'intérieur de la cheminée solaire n'est pas assez importante pour provoquer un écoulement, (h_a) est donné par :

$$h_a = \left[0.0965 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.29} \right] \frac{\lambda_f}{b} \quad (2.15)$$

Quand l'air circule, (h_a) dépend du régime s'il est laminaire ou turbulent.

- Régime laminaire : $Re < 2000$, (h_a) est déterminé par une corrélation développée pour une circulation d'air entre deux plaques parallèles avec l'une d'elles chauffée et qui est donné par :

$$h_a = \left[4.9 + \frac{0.0606 \cdot (x)^{-1.2}}{1 + 0.0856 \cdot (x)^{-0.7}} \right] \cdot \frac{\lambda_f}{b} \quad (2.16)$$

$$x = \frac{L}{Re \cdot Pr \cdot DH}$$

DH étant le diamètre hydraulique égale à deux fois la distance vitrage absorbeur.

- Régime turbulent $Re > 2000$.

(h_a) est donné par :

$$h_a = \left[0.0158 \cdot Re^{0.8} \right] \frac{\lambda_f}{b} \quad (2.17)$$

2.4.5 L'isolant

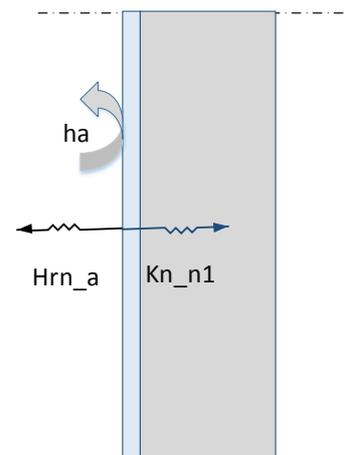


Fig. 2-6 : Bilan d'énergie au niveau de l'isolant

Le bilan thermique effectué sur l'isolant donne :

$$\rho_n \cdot V_n \cdot Cp_n \cdot \frac{dTn}{dt} = h_a \cdot S_a \cdot (T4 - Tn) + K_{n-n1} \cdot S_a \cdot (Tn1 - Tn) + hr_{n-a} \cdot S_a \cdot (T3 - Tn) \quad (2.18)$$

(k) : c'est la conductance thermique de l'isolant

2.4.6 Le mur massif

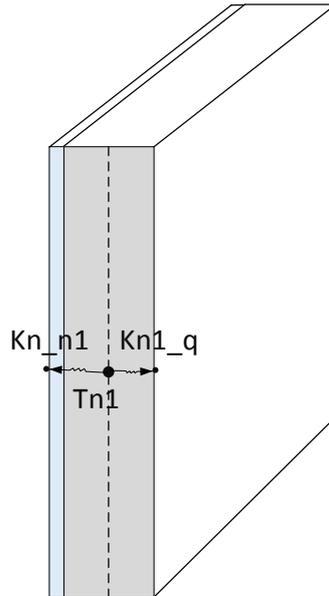


Fig. 2-7 : Bilan d'énergie à l'intérieur du mur massif

Le bilan thermique effectué sur l'intérieur du mur massif donne :

$$\rho_{n1} \cdot V_{n1} \cdot Cp_{n1} \cdot \frac{dTn1}{dt} = K_{n-n1} \cdot S_a \cdot (Tn - Tn1) + K_{q-n1} \cdot S_a \cdot (Tq - Tn1) \quad (2.19)$$

(kq) : la conductivité thermique du mur massif

2.4.7 La face interne du mur massif

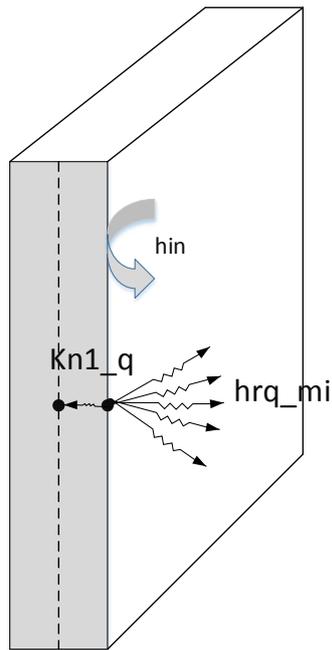


Fig. 2-8: Bilan d'énergie sur la face interne du mur massif

Le bilan thermique effectué sur l'intérieur du mur massif donne :

$$\rho_q \cdot C p_q \cdot V_q \cdot \frac{dTq}{dt} = \sum_{i=1}^5 hr_{q-mi} \cdot S_p \cdot (Tmi - Tq) + h_q \cdot S_q \cdot (Tin - Tq) + K_{p-n1} \cdot S_p \cdot (Tn1 - Tq) \quad (2.20)$$

hr : c'est les coefficients de rayonnement entre la face interne du mur massif et les surfaces interne du locale (les murs, le plancher et le plafond).

2.4.8 Le plafond :

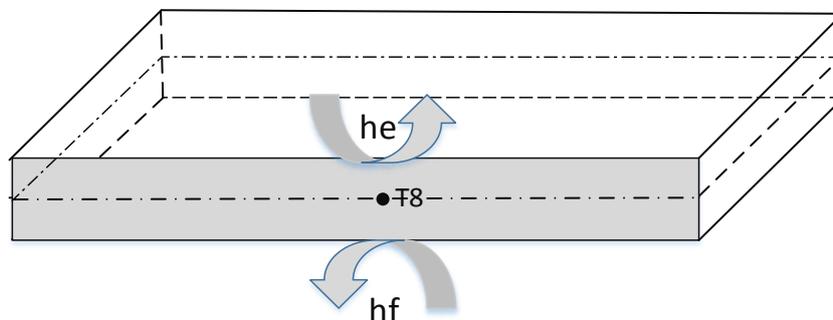


Fig. 2-9 : Bilan d'énergie sur le plafond vers l'extérieure

Le bilan thermique effectué sur le plafond vers l'extérieure :

$$\rho_{iso} \cdot C_{p_{iso}} \cdot V_{iso} \cdot \frac{dT_8}{dt} = h_e \cdot S_p \cdot (T_e - T_8) + h_f \cdot S_p \cdot (T_f - T_8) \quad (2.21)$$

h_f : c'est le coefficient de convection du fluide (l'air qui circule dans la conduite)

2.4.9 Le plafond (conduite horizontale) :

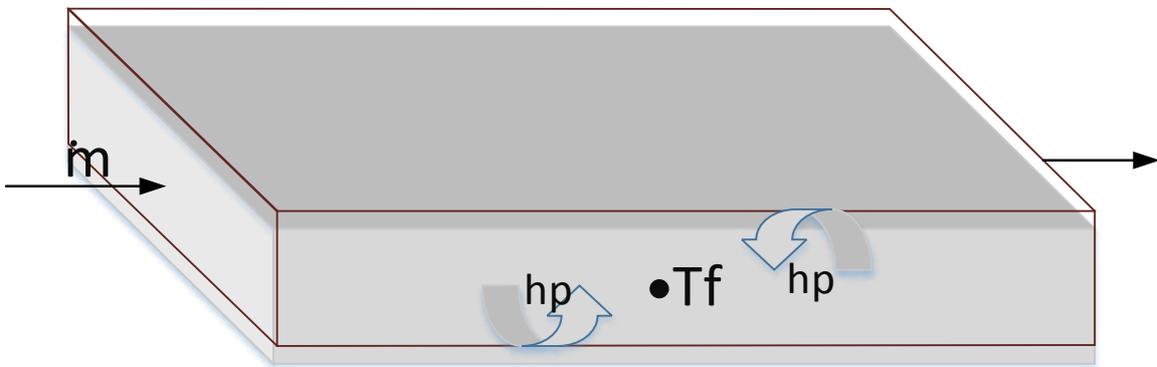


Fig. 2-10 : Ecoulement dans le plafond

Le bilan thermique traduisant l'écoulement de l'air dans le canal se trouvant dans le plafond se fait avec les hypothèses suivantes :

- Le débit de l'air qui pénètre dans les conduites est égal au débit de l'air qui s'écoule dans la cheminée solaire (c'est la somme des deux débits le premier qui circule entre le vitrage et l'absorbeur et le deuxième qui circule entre l'absorbeur et l'isolant), ce débit est supposé rester constant.
- La conduction au sein du fluide est négligée.

Quand l'air ne circule pas, l'équation du bilan thermique est donner par :

$$\rho_f \cdot V_{f-d} \cdot C_{p_{f-d}} \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_p \cdot S_d \cdot (T_d - T_f) + h_p \cdot S_d \cdot (T_p - T_f) \quad (2.22)$$

Quand l'air est en mouvement, le bilan est donné par :

Flux entrant dans la pièce = flux entrant dans les tubes – le flux échangé par convection.

La relation qui traduit la température T_f dans le plafond est donnée par :

$$T_f = \frac{m_1.Cp_f.T_2 + m_2.Cp_f.T_4 + m.Cp_f.T_{in} + h_p.S_d.(T_8 + T_m)}{2.m.Cp_f + 2.h_p.S_d} \quad (2.23)$$

T_8 et T_m : sont les températures des parties supérieure et inférieure du plafond

h_p : c'est le coefficient de convection de l'air qui circule dans le plafond il dépend du type d'écoulement :

Écoulement laminaire ($Re_d \leq 2100$)

Le nombre de Nusselt est donné par Hausen [20]

$$Nu = 1.86 \left(Re_d \cdot pr \cdot \frac{Dh}{L} \right)^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (2.24)$$

Écoulement dans la zone de transition

Dans cette zone, le nombre de Nusselt peut être estimé par la formule proposée par Hausen [20]

$$Nu = 0.116.(Re_d^{2/3} - 125).Pr^{1/3} \left[1 + \left(\frac{Dh}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (2.25)$$

Le facteur $(\mu_b/\mu_s)^{0.14}$ est une correction pour prendre en considération l'effet de la variation de la température sur les propriétés physiques où μ_b est la viscosité dynamique à la température moyenne du fluide et μ_s la viscosité dynamique à la température de la paroi.

Écoulement turbulent

Une corrélation exprimant le nombre de Nusselt pour un écoulement turbulent ($Re_d > 10.000$) a été développée, elle est donnée par Dittus-Boelter [21] :

$$Nu = 0.023.Re_d^{4/5} . pr^{0.3} \quad (2.26)$$

Pour un tube non circulaire, une longueur caractéristique appelée diamètre hydraulique est introduite, elle est définie par :

$$Dh = \frac{4.Ac}{p} \quad (2.27)$$

p [m] étant le périmètre et Ac [m²] la surface de passage de l'air.

2.4.10 Plafond vers l'intérieure

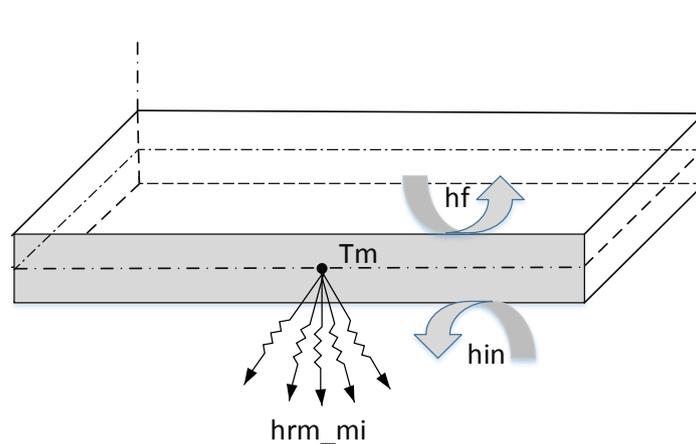


Fig. 2-11 : Bilan d'énergie au niveau du plafond intérieure

L'équation du bilan thermique est donnée par :

$$\rho_m \cdot C_{p_m} \cdot V_m \cdot \frac{dT_m}{dt} = \sum hr_{m-mi} \cdot S_p \cdot (T_{mi} - T_m) + h_m \cdot S_p \cdot (T_{in} - T_m) + hf \cdot S_p \cdot (T_f - T_m) \quad (2.28)$$

hr_{m-mi} représente le coefficient d'échange par rayonnement entre la surface du plafond et chaque paroi de température T_{mi} et d'émissivité ξ .

$$hr_{m-mi} = \sigma \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\xi} - 1\right) + \left(\frac{1}{\xi} - 1\right) \cdot \frac{S_p}{S_i} + \frac{1}{F_{m-mi}}} \cdot (T_{mi}^2 + T_m^2) \cdot (T_{mi} + T_m) \quad (2.29)$$

F_{m-mi} est le facteur de forme qui représente la fraction du flux total émis de la surface S_p qui atteint la surface S_i . [20]

2.4.11 Le plancher :

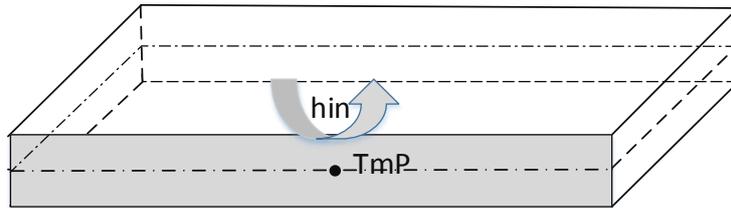


Fig. 2-12 : Bilan d'énergie au niveau du plancher

L'équation du Bilan d'énergie au niveau du plancher est donnée :

$$\rho_{bet} \cdot C_{p_{bet}} \cdot V_{bet} \cdot \frac{dT_{mp}}{dt} = h_{int} \cdot S_{pl} \cdot (T_{in} - T_{mp}) \quad (2.30)$$

- Les pertes à travers le sol sont négligées, il reste que la convection vers l'intérieur.

2.4.12 Les murs (nord, ouest et est) :

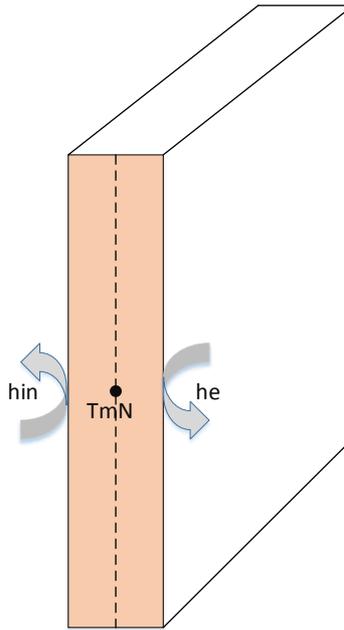


Fig. 2-13 : Bilan d'énergie au niveau du mur

L'équation du Bilan d'énergie au niveau du mur est donnée :

$$\rho_b \cdot V_b \cdot Cp_b \cdot \frac{dTmN}{dt} = h_e \cdot S_{mu} \cdot (Te - TmN) + h_{int} \cdot S_{mu} \cdot (Tin - TmN) \quad (2.31)$$

Les échanges radiatifs externes et vers l'intérieure sont négligés, il reste la convection interne et externe.

2.4.13 Local

En se plaçant dans le cas idéal qui suppose une température uniforme dans toute la pièce, la température ambiante est déterminée par l'équation du bilan thermique effectuée sur le volume de l'air.

$$\rho_L \cdot V_L \cdot Cp_L \cdot \frac{dTin}{dt} = \sum_{i=1}^{i=6} h_i \cdot (Tmi - Tin) + \dot{m} \cdot Cp_f \cdot (Tf - Tin) + qr + qs + qn \quad (2.32)$$

Le coefficient de déperdition thermique d'un local, noté 'G', est défini comme le rapport entre les pertes par renouvellement d'air et le volume à chauffer. Les pertes de chaleur par renouvellement d'air sont données par :

$$qr = 0.34.qe.(Tin - Te) \quad [W] \quad (2.33)$$

0.34 représente le capacité calorifique moyenne de l'air. $[Wh/m^3.K]$

qe: Débit de renouvellement d'air $[m^3/h]$, il est dû aux infiltrations d'air extérieur et aux ouvertures et fermeture des ouvrants.

qs: représente les gains réels par ensoleillement à travers une fenêtre pour chaque heure de la journée. Ils sont donnés par la formule (2-34) [22], ils dépendent de l'insolation maximale, de la surface vitrée et du coefficient d'amortissement. Les valeurs du coefficient d'amortissement 'Ca' sont présentées en annexe 2, il est en fonction du poids par m^2 de surface de plancher des matériaux constituant le local, et de la durée d'occupation pour une température intérieure constante.

$$qs = S_v . I_{max} . Ca \quad (2.34)$$

qn représente les gains internes dûs à la présence des occupants et à l'éclairage, ils sont donnés par :

$$qn = 5w/m^2 \quad (2.35)$$

A partir d'expérimentations effectuées sur des maquettes cubiques avec un plafond chauffant, Bohn a établi des corrélations pour le calcul du coefficient d'échange par convection entre les parois intérieures et l'air ambiant [23]. Pour les différentes parois, le nombre de Nusselt est donné par :

➤ **Echanges par convection Mur-local**

Le nombre de Nusselt est donné par la relation suivante :

$$Nu = 0.233.Ra^{0.286} \quad (2.36)$$

➤ **Echanges par convection plancher-local**

Le nombre de Nusselt est donné par :

$$Nu = 2.54.Ra^{0.212} \quad (2.37)$$

➤ **Echanges par convection plafond-local**

Le nombre de Nusselt est donné par :

$$Nu = 0.223.Ra^{0.207} \quad (2.38)$$

2.5 Récapitulatif du modèle mathématique

Les bilans de l'ensemble des nœuds étant ainsi établis, nous obtenant un système d'équations différentielles non linéaires :

$$\rho_v.V_v.Cp_v \cdot \frac{dT0}{dt} = h_0.S_v.(T1 - T0) + hr_{c-v1}.S_v.(Tae - T0) + he.S_v.(Te - T0) + hr_{so-v1}.S_v.(Tso - T0) + hr_{v1-v2}.S_v.(T1 - T0) + \alpha_v.I$$

$$\rho_v.V_v.Cp_v \cdot \frac{dT1}{dt} = h_0.S_v.(T0 - T1) + hr_{v1-v2}.S_v.(T0 - T1) + h_v.S_v.(T2 - T1) + hr_{v2-a}.S_a.(T3 - T1) + \tau.\alpha_v.I$$

$$\rho_a.V_a.Cp_a \cdot \frac{dT3}{dt} = h_a.S_a.(T2 - T3) + hr_{v2-a}.S_a.(T1 - T3) + h_a.S_a.(T4 - T3) + hr_{n-a}.S_a.(Tn - T3) + \tau^2.\alpha_a.I$$

$$\rho_n.V_n.Cp_n \cdot \frac{dTn}{dt} = h_a.S_a.(T4 - Tn) + K_{n-n1}.S_a.(Tn1 - Tn) + hr_{n-a}.S_a.(T3 - Tn)$$

$$\rho_{n1}.V_{n1}.Cp_{n1} \cdot \frac{dTn1}{dt} = K_{n-n1}.S_a.(Tn - Tn1) + K_{q-n1}.S_a.(Tq - Tn1)$$

$$\rho_q \cdot Cp_q \cdot V_q \cdot \frac{dTq}{dt} = \sum_{i=1}^5 hr_{q-mi} \cdot S_p \cdot (Tmi - Tq) + h_q \cdot S_q \cdot (Tin - Tq) + K_{p-n1} \cdot S_p \cdot (Tn1 - Tq)$$

$$Si \quad \dot{m} = 0 \quad \rho_f \cdot V_f \cdot Cp_f \cdot \frac{dT2}{dt} = h_v \cdot S_v \cdot (T1 - T2) + h_a \cdot S_a \cdot (T3 - T2)$$

$$\rho_f \cdot V_f \cdot Cp_f \cdot \frac{dT4}{dt} = h_v \cdot S_v \cdot (T3 - T4) + h_a \cdot S_a \cdot (Tn - T4)$$

$$Si \quad \dot{m} > 0 \quad T2 = Tin + \left(\frac{2 \cdot Tin - T1 - T3}{2} \right) \cdot \left(\frac{-\dot{m} \cdot Cp_f}{2 \cdot h_a \cdot S_a} \left(\exp \left[\frac{-2 \cdot h_a \cdot S_a}{\dot{m} \cdot Cp_f} \right] - 1 \right) - 1 \right)$$

$$T4 = Tin + \left(\frac{2 \cdot Tin - Tn - T3}{2} \right) \cdot \left(\frac{-\dot{m} \cdot Cp_f}{2 \cdot h_a \cdot S_a} \left(\exp \left[\frac{-2 \cdot h_a \cdot S_a}{\dot{m} \cdot Cp_f} \right] - 1 \right) - 1 \right)$$

Si m = 0

$$\rho_f \cdot V_{f-d} \cdot Cp_{f-d} \cdot \frac{dTf}{dt} = h_p \cdot S_d \cdot (Td - Tf) + h_p \cdot S_d \cdot (Tp - Tf)$$

Si m > 0

$$Tf = \frac{m1 \cdot Cp_f \cdot T2 + m2 \cdot Cp_f \cdot T4 + m \cdot Cp_f \cdot Tin + h_p \cdot S_d \cdot (T8 + Tm)}{2 \cdot m \cdot Cp_f + 2 \cdot h_p \cdot S_d}$$

$$\rho_b \cdot V_b \cdot Cp_b \cdot \frac{dTmN}{dt} = h_e \cdot S_{mu} \cdot (Te - TmN) + h_{int} \cdot S_{mu} \cdot (Tin - TmN)$$

$$\rho_b \cdot V_b \cdot Cp_b \cdot \frac{dTmE}{dt} = h_e \cdot S_{mu} \cdot (Te - TmE) + h_{int} \cdot S_{mu} \cdot (Tin - TmE)$$

$$\rho_b \cdot V_b \cdot Cp_b \cdot \frac{dTmO}{dt} = h_e \cdot S_{mu} \cdot (Te - TmO) + h_{int} \cdot S_{mu} \cdot (Tin - TmO)$$

$$\rho_{bet} \cdot C_{p_{bet}} \cdot V_{bet} \cdot \frac{dT_{mp}}{dt} = h_{int} \cdot S_{pl} \cdot (T_{in} - T_{mp})$$

$$\rho_{iso} \cdot C_{p_{iso}} \cdot V_{iso} \cdot \frac{dT_8}{dt} = h_e \cdot S_p \cdot (T_e - T_8) + h_f \cdot S_p \cdot (T_f - T_8)$$

$$\rho_L \cdot V_L \cdot C_{p_L} \cdot \frac{dT_{in}}{dt} = \sum_{i=1}^{i=6} h_i \cdot (T_{mi} - T_{in}) + \dot{m} \cdot C_{p_f} \cdot (T_f - T_{in}) + q_r + q_s + q_n$$

2.6 Modélisation numérique

2.6.1 Linéarisation des équations

A cause de la présence d'échanges de chaleur par rayonnement, les équations régissant notre système sont non linéaires. Afin de les linéariser nous avons exprimé l'échange de chaleur par rayonnement entre deux surfaces de température respective T_i et T_j par :

$$\phi_r = h_r \cdot S_i \cdot (T_i - T_j)$$

2.6.2 Conditions initiales

Un premier choix des conditions initiales est fait de manière à ce que la température de chaque nœud soit la plus proche possible de la réalité. Les conditions initiales seront fixées après un certain nombre de cycles.

2.6.3 Résolution du système d'équations

La résolution de ces équations se fera grâce à un logiciel de simulation 'MATLAB' (voir CHAPITRE 3).

Ce logiciel possède les particularités suivantes par rapport à d'autres logiciels (C ou Fortran) :

- la programmation facile,
- la continuité parmi les valeurs entières, réelles et complexes,
- la gamme étendue des nombres et leurs précisions.

Chapitre III:

Simulation et interprétation des résultats

3.1 Introduction sur le logiciel (MATLAB) :

Pour résoudre les équations d'énergie du modèle (une par nœud), **MATLAB** est le logiciel de programmation qui sera utilisé dans le cadre de cette recherche.

MATLAB est un environnement puissant, complet et facile à utiliser destiné au calcul scientifique. Il apporte aux ingénieurs, chercheurs et à tout scientifique un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. C'est un environnement performant, ouvert et programmable qui permet de remarquables gains de productivité et de créativité.

Ce logiciel est un environnement complet, ouvert et extensible pour le calcul et la visualisation. Il dispose de plusieurs centaines (voire milliers, selon les versions et les modules optionnels autour du noyau Matlab) de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. Son approche matricielle permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symboliques de façon fiable et rapide. Grâce à ces fonctions graphiques, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits.

3.2 Les particularités de MATLAB :

MATLAB permet le travail interactif soit en mode commande, soit en mode programmation, tout en ayant toujours la possibilité de faire des visualisations graphiques. Considéré comme un des meilleurs langages de programmations (C ou Fortran), il possède les particularités suivantes par rapport à ces langages :

- la programmation facile,
- la continuité parmi les valeurs entières, réelles et complexes,
- la gamme étendue des nombres et leurs précisions,
- la bibliothèque mathématique très compréhensive,
- l'outil graphique qui inclut les fonctions d'interface graphique et les utilitaires,
- la possibilité de liaison avec les autres langages classiques de programmations (C ou Fortran).

3.3 Simulation et interprétation :

Pour trouver numériquement les valeurs inconnues, toutes les équations incluant les échanges thermiques dans le bâtiment ont été écrites à l'aide du logiciel MATLAB™. Puisqu'il y a autant d'équations que d'inconnues, il est possible de trouver toutes les valeurs nécessaires pour étudier l'effet d'un mur solaire avec vitrage sur un bâtiment à chaque pas de temps.

Nous réalisons des simulations avec des données météorologiques de la ville d'Alger (Latitude = 36°8 N, Longitude = 03°25 E). Incluant l'irradiation solaire, la température extérieure pendant une durée de 5 journées durant le mois de janvier

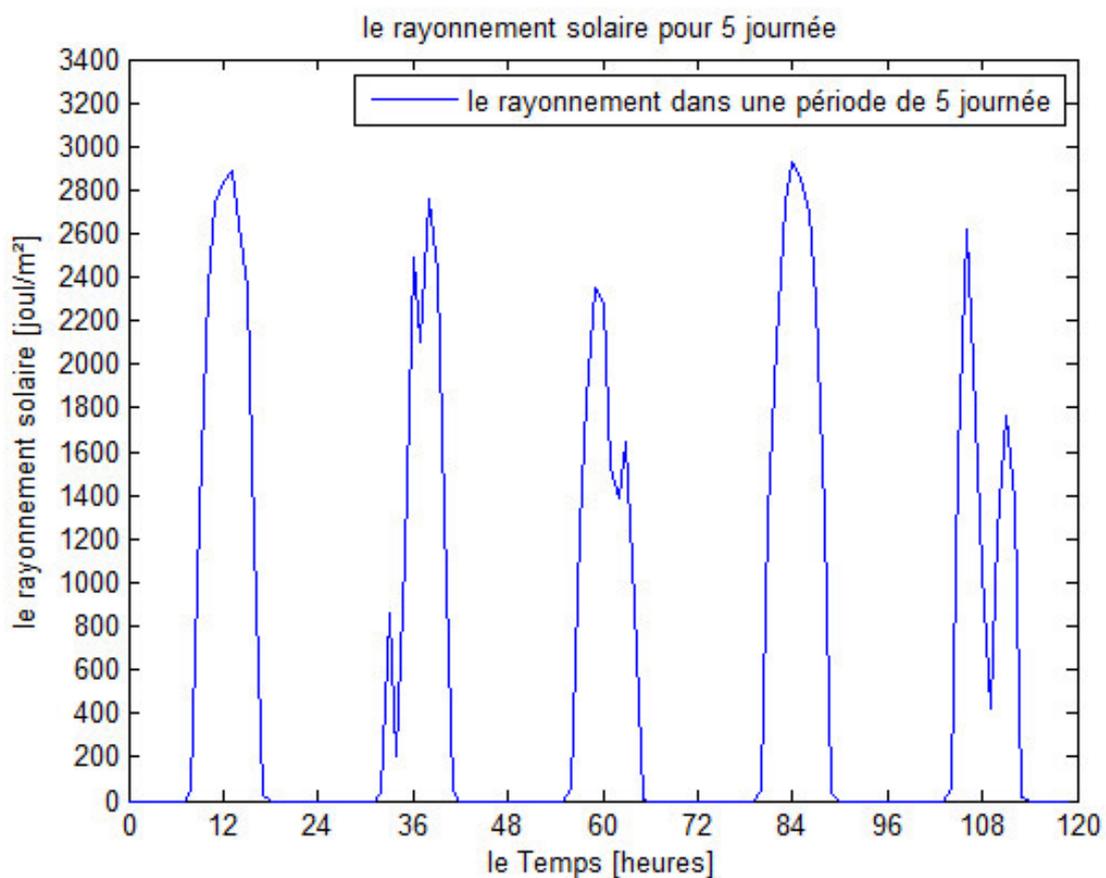


Fig. 3-1 : le rayonnement solaire sur une surface horizontale pour 5 journées d'hiver

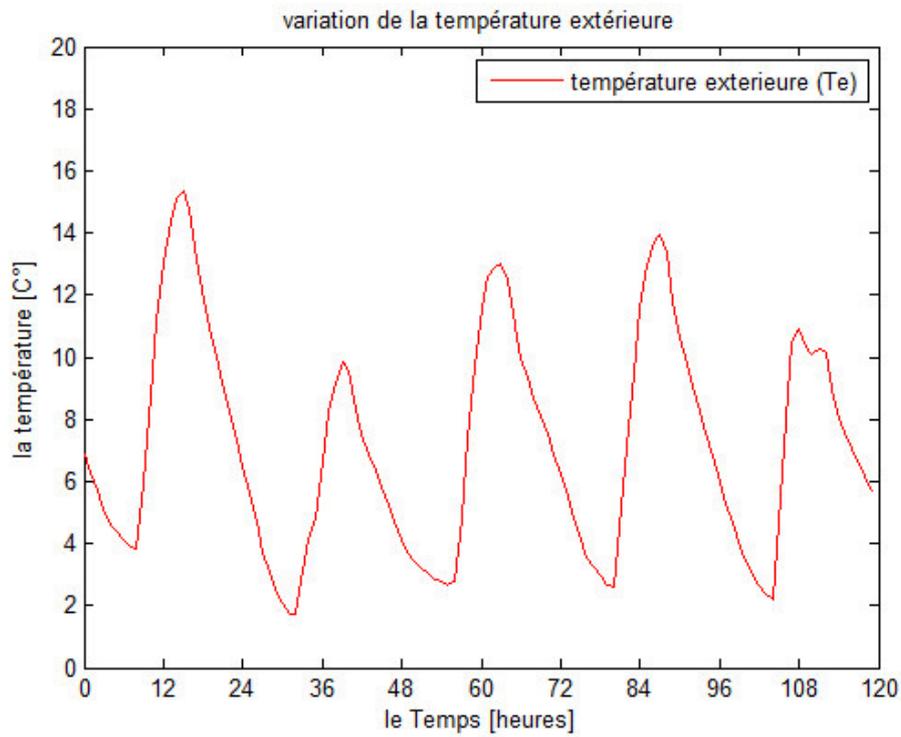


Fig. 3-2 : Température extérieure pour 5 journées d'hiver

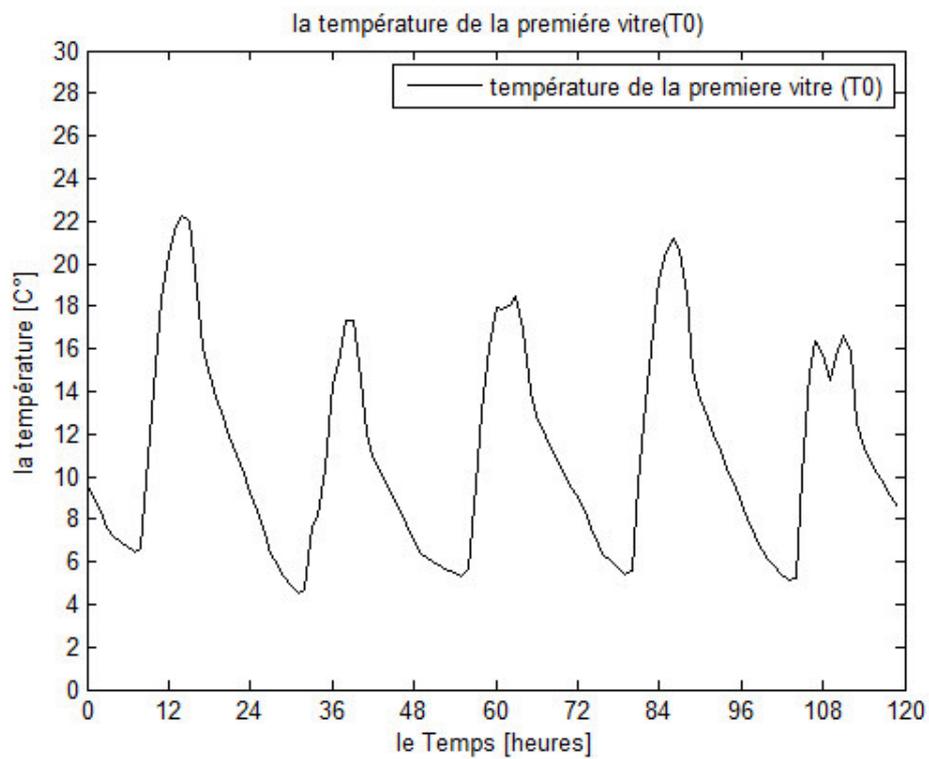


Fig. 3-3 : Température de la première vitre

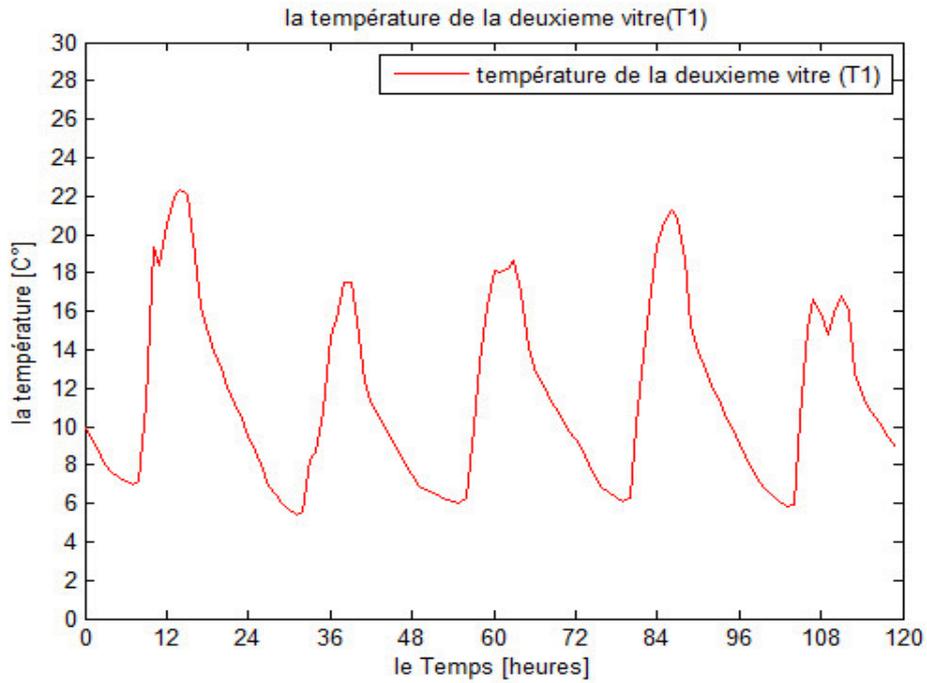


Fig. 3-4 : Température de la deuxième vitre

Dans les figures (Fig. (3-3) et Fig. (3-4)), on remarque que la température du premier et deuxième vitrage augmente quand il y'a du rayonnement solaire durant la journée, la température des deux vitrages peut atteindre **22 degré Celsius** avec une légère différence entre les deux vitres de **0.5 C°**.

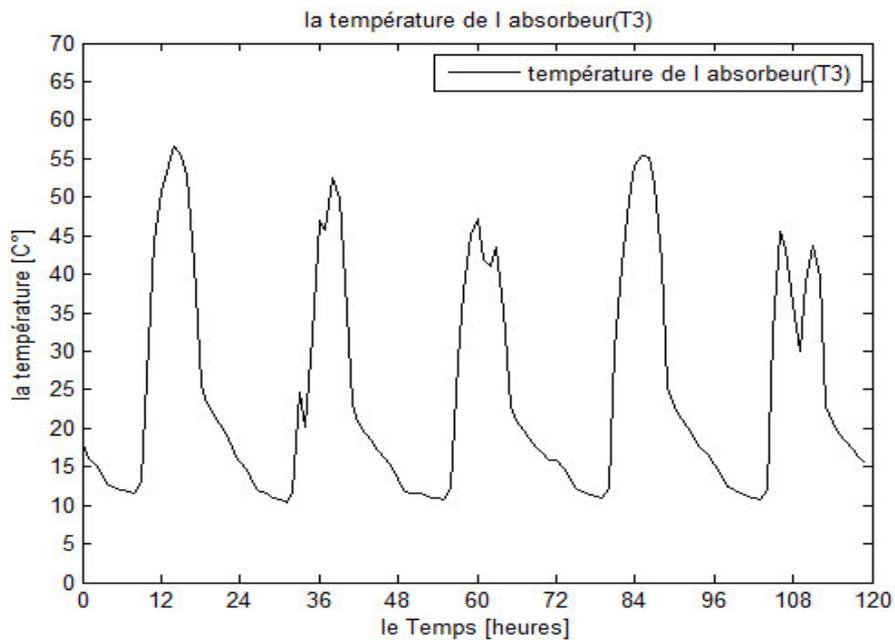


Fig. 3-5 : Température de l'absorbeur

Pour la figure (Fig. 3-5), le rayonnement solaire qui traverse le vitrage va se projeté sur la plaque absorbante (en cuivre), et à cause de sa grande absorptivité sa température va augmenter dans les après-midi quand le rayonnement est intense. La température de l'absorbeur peut atteindre **57 °C**-vers **14 heures**.

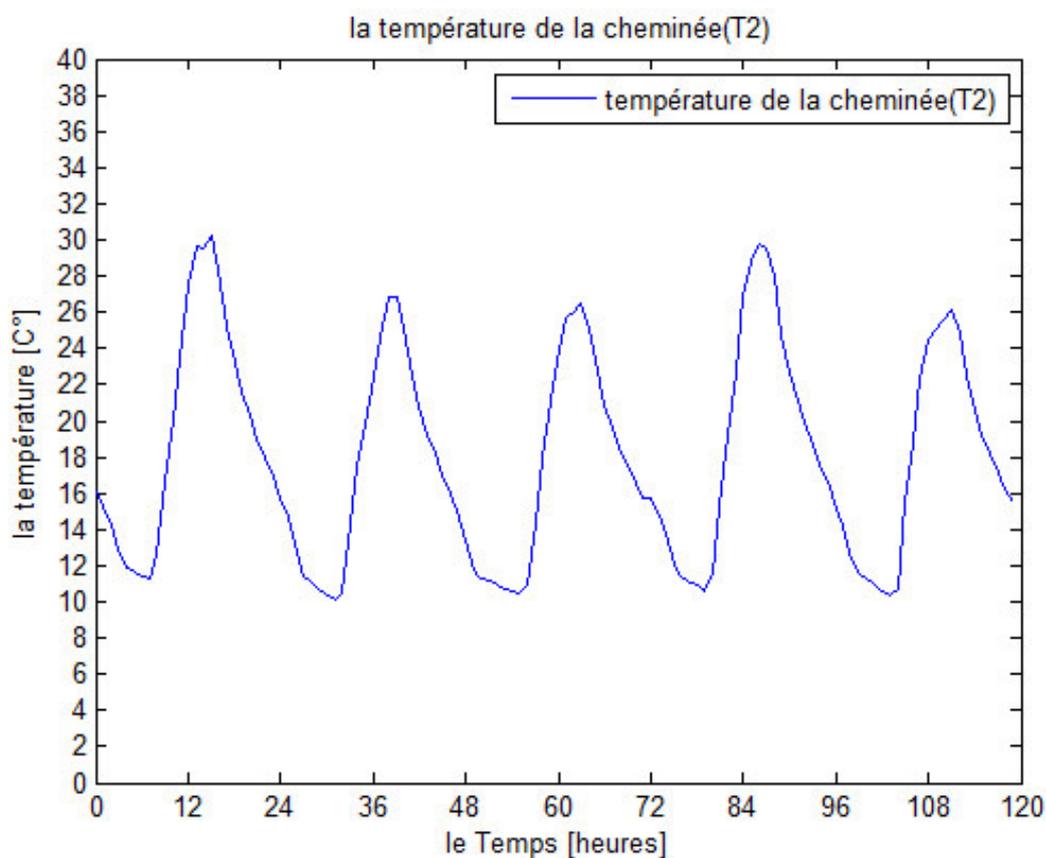


Fig. 3-6 : Température de la cheminée

A propos de la température de la cheminée solaire ou la canalisation verticale (Fig. 3-6), l'air va être chauffé principalement par l'échange par convection entre le fluide et l'absorbeur, c'est pour quoi on remarque des températures de fluide élevé qui peut atteindre **30°C** avec des températures de **57°C** pour l'absorbeur (Fig. 3-7).

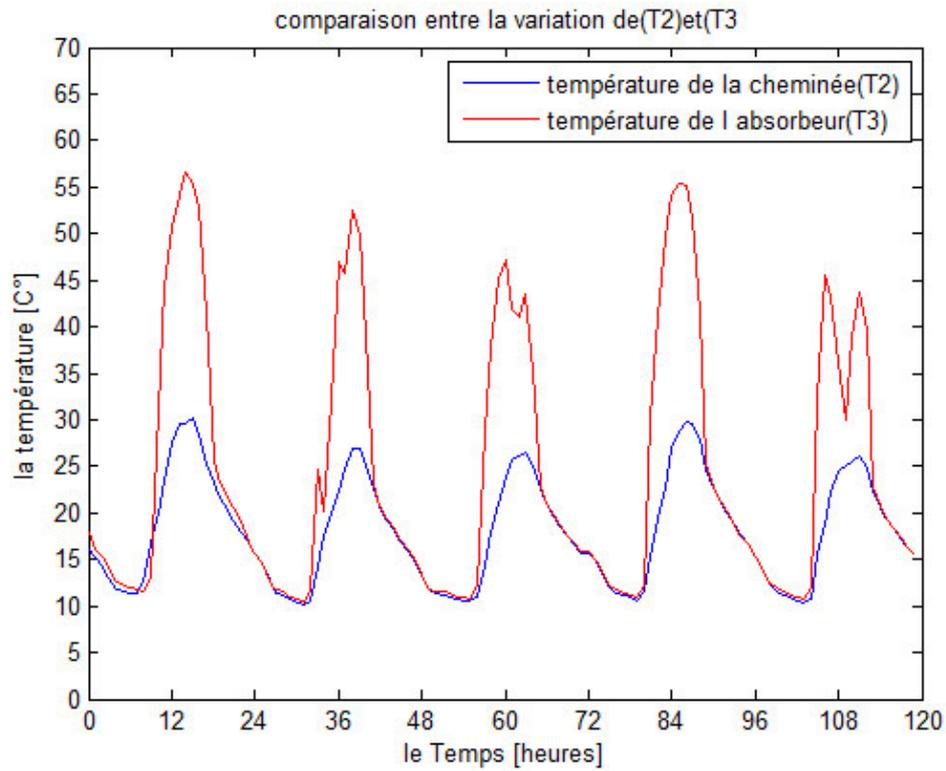


Fig. 3-7 : comparaison entre (T2) et (T3)

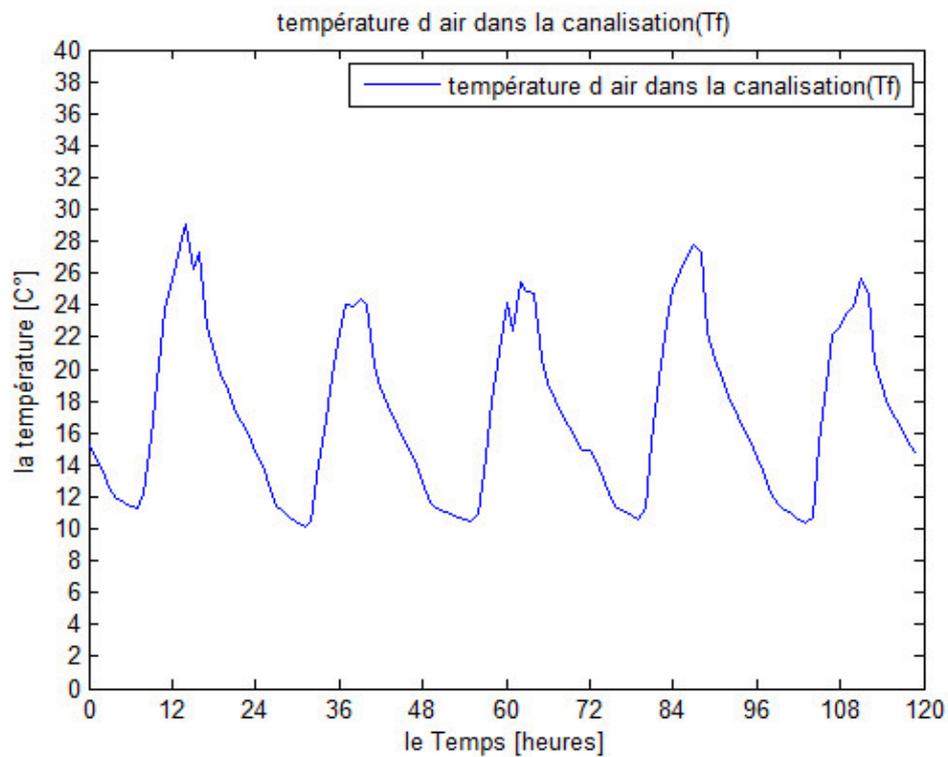


Fig. 3-8 : Température de l'air dans le plafond (Tf)

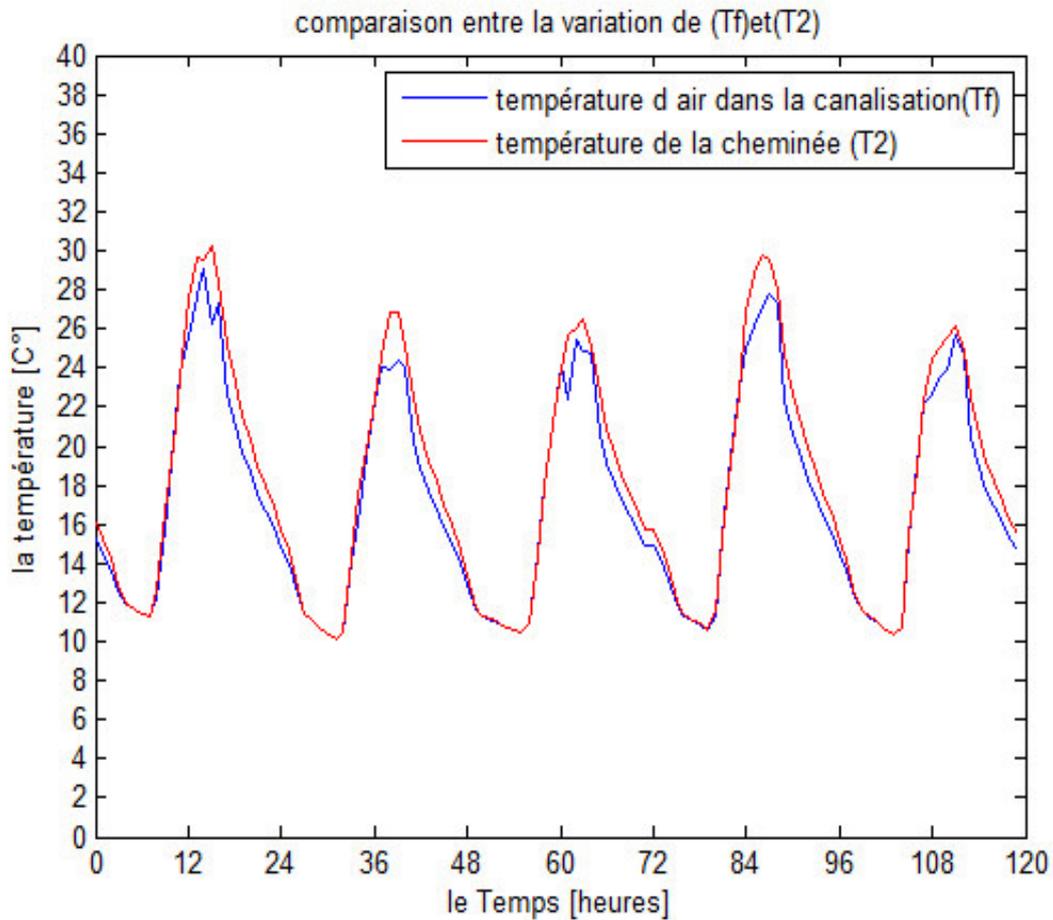


Fig. 3-9 : comparaison entre Tf et T2

La température du fluide qui circule dans la canalisation horizontale ou dans le plafond comme illustré dans la figure (Fig. 3-8) vari jusqu'à 29°C . Mais pour avoir une circulation d'air de la cheminée solaire vers le plafond, il faut avoir une différence de température entre les deux, d'après la figure (Fig. 3-9) il apparaît que la température de l'air qui arrive de la cheminée est plus élevé que la température dans le plafond, cette variation de la température (entre 0.5 à 3.5 $^{\circ}\text{C}$) assure la circulation de l'air du cheminée vers le plafond.

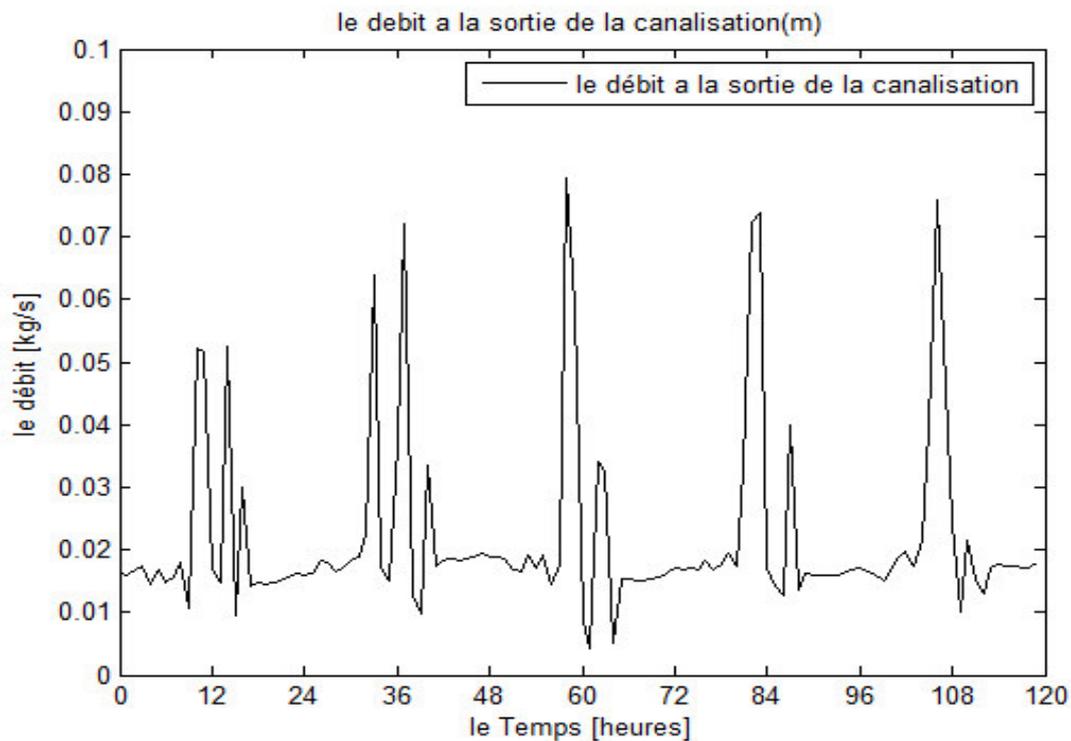


Fig. 3.10 : Le débit d'air dans la canalisation horizontale

Le débit de l'air qui circule dans la canalisation horizontal c'est une somme de deux débit qui arrive de la cheminée solaire (à droite et à gauche de la plaque absorbante), et c'est le but de notre système de profiter d'une double circulation d'air, le débit est très faible pendant la nuit mais pendant les heures de pics il arrive à des valeurs maximales jusqu'à **0.08** (kg/s).

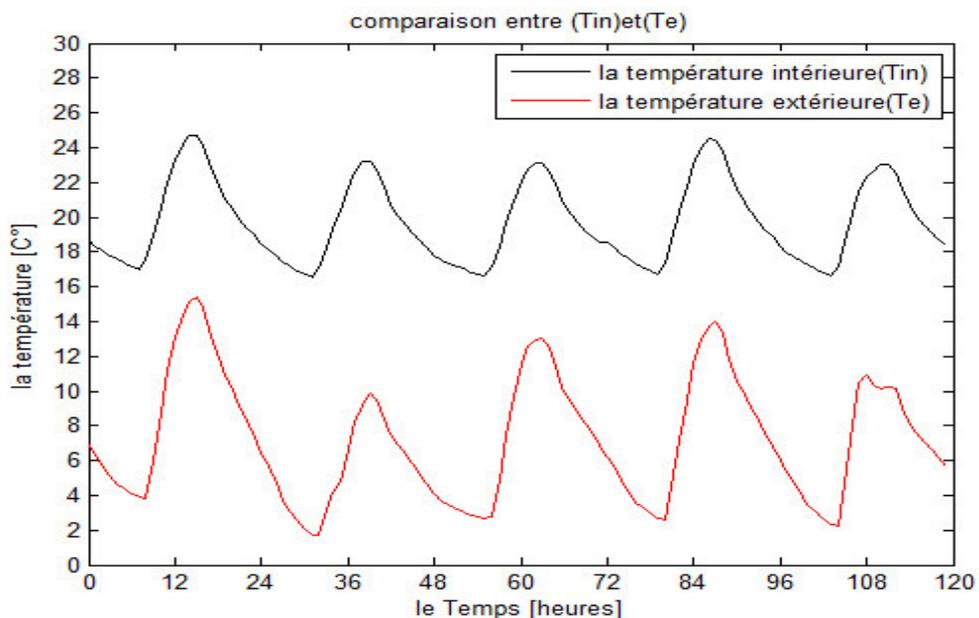


Fig. 3-11 : Température intérieure et extérieure

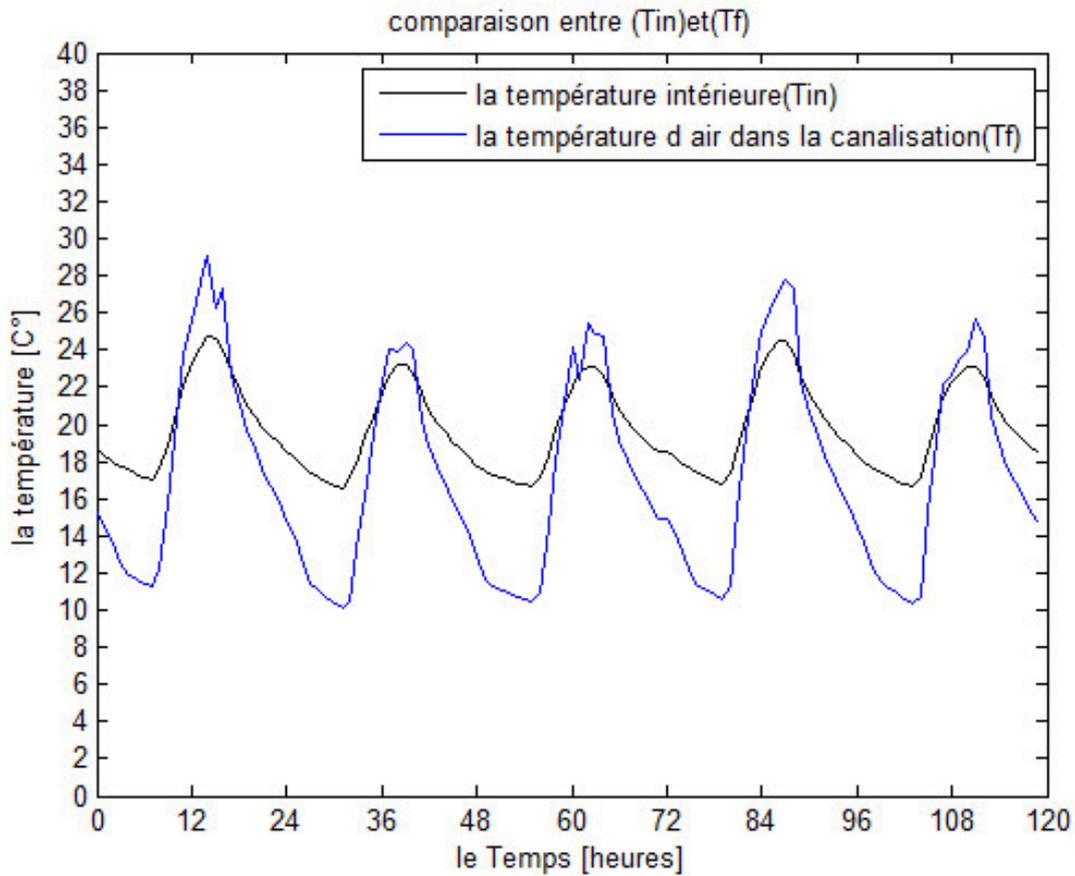


Fig. 3-12 : comparaison entre Tin et Tf

La température ambiante ou intérieure est nettement supérieure à la température extérieure comme on peut le voir dans la figure (Fig. 3-11), avec une différence de **12°C** et une valeur maximale de **24.8 °C** dans l'après-midi. Et comme on a dit pour la figure (Fig. 3-9) [à propos de la circulation cheminée-plafond], on remarque la même chose pour la figure (Fig. 3-12), la différence de température dans les heures de pics (Tf plus grandes que Tin) assure une circulation d'air du plafond vers l'intérieure, la différence est entre **0.5 à 5 °C**.

3.4 Comparaison avec un local classique :

Comme on a dit dans le chapitre (2), la chambre simulée est une chambre qui fait 4 m de largeur, 4 m de longueur et 3m de hauteur. Les murs sont en brique de 15 cm, alors que le plafond est en béton de 20 cm d'épaisseur.

Pour le local classique on a enlevé le système (vitrage-absorbeur-isolant-conduite plafond) Et on a gardé la même structure.

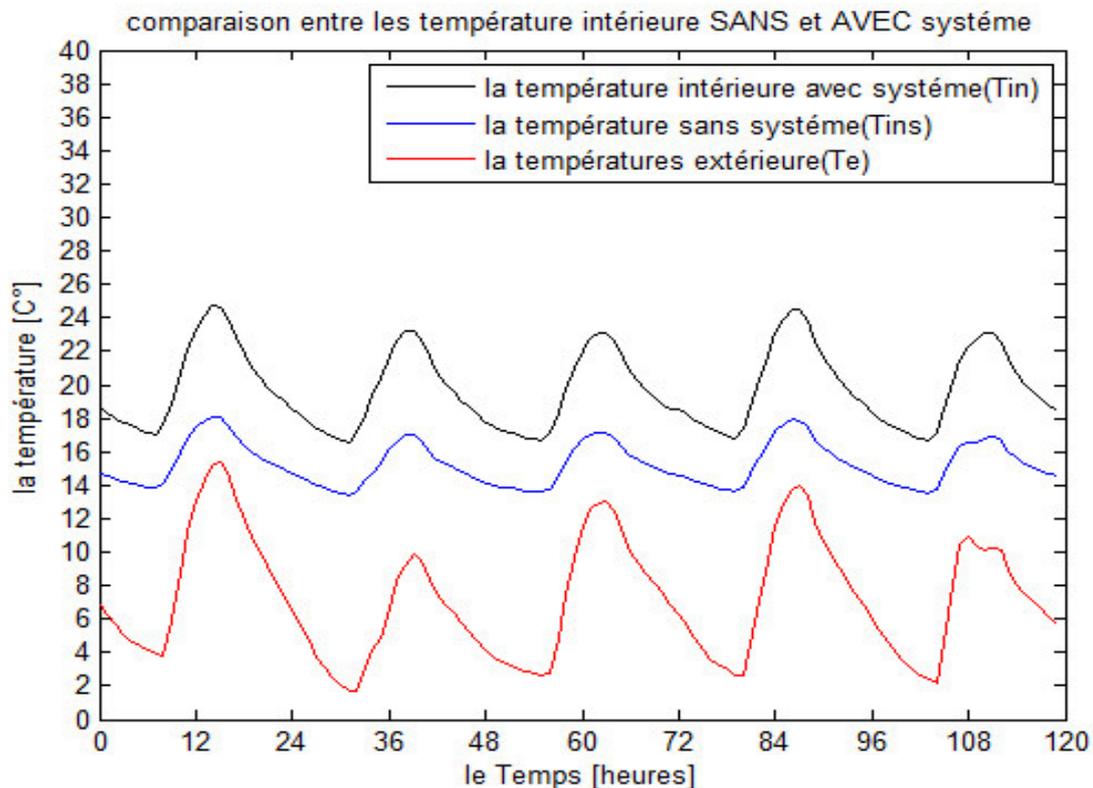


Fig. 3-13 : Comparaison entre la température intérieure sans-avec système

La figure (Fig. 3-13) est une comparaison entre la température ambiante d'un local équipé du système et un local classique. Nous constatons que la mise en place du dispositif de chauffage apporte un gain de chaleur qui se traduit par une élévation de la température intérieure de **3** à **6.5 °C** avec des températures maximales atteintes vers **15 h** et qui ne dépassent pas **25 °C**.

Conclusion :

La résolution numérique du modèle permet d'obtenir, en fonction du temps, les profils de températures de chaque composant du système. Le principe de fonctionnement du système est visualisé. Les résultats de simulation sont en bon accord avec ceux de la littérature.

CONCLUSION GENERALE

Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, orientation vers le Sud, surfaces vitrées, etc.).

Les murs solaires passifs contribuent à la récupération de l'énergie solaire pour le chauffage des bâtiments, Cette étude a été entreprise afin d'évaluer l'effet de l'ajout d'un de ces systèmes celui développé par O.A.Barra et T.Costantini, dans les conditions climatiques de de l'Algérie.

Un modèle mathématique a été utilisé pour simuler le comportement, durant plusieurs journées d'hiver, d'un local type muni du système de chauffage dans les conditions climatiques de la région d'Alger.

Nous constatons que la mise en place du dispositif de chauffage apporte un gain d'énergie permettant une élévation de la température intérieure d'environ **3** à **6.5** °C. Les températures obtenues sont en conformité avec les conditions de confort thermique.

Actuellement, les systèmes solaires passifs sont en utilisation croissante dans les conceptions architecturale, mais ils restent peut utiliser surtout en Algérie par rapport aux systèmes actifs, Il serait intéressant de poursuivre ce travail par l'étude de l'impact qu'engendre la combinaison des systèmes actifs avec les systèmes passifs sur le confort thermique et les économies d'énergie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M.K.Chерier, “ *Etude Théorique et Expérimentale de l’Isolation Thermique Intérieure d’une Pièce d’un Habitat dans la région de Ghardaïa*”, Mémoire de Magister, Université d’Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2010.
- [2] K. Imessad, N. Ait Messaoudene, M. Belhamel, ‘*Etude du Comportement et de la Rentabilité Economique du Système de Chauffage Solaire Barra-Costantini dans les Conditions Climatiques de l’Algérie*’. Rev. Energ. Ren. : 11èmes Journées Internationales de Thermique (2003) 59-66.
- [3] Ralph .M. Lebens, ‘*Habitat Solaire Passif, méthodes de conception et de calcul*’ Editions du moniteur, paris 1983.
- [4] J.J.Bezian, G. Arnaud ‘*Application de la convection naturelle en cavité inclinée au chauffage solaire passif*’. Séminaire sur l’énergie solaire, Canne 1982.
- [5] H. Manz, P.W. Egolf, P.Suter, A.Goetzberger ‘*TIN-PCM External Wall System for Solar Space Heating and Daylighting*’. Solar Energy, vol.61, No. 6, pp. 369-379, 1997.
- [6] B.Peuportier, J.Michel ‘*Comparative Analysis of Active and Passive Solar Heating Systems with Transparent Insulation*’. Solar Energy, vol. 54, No. 1, pp. 13-18, 1995.
- [7] O.A.Barra and E.Pugliese Carratelli, ‘*A Theoretical Study of Laminar Free Convection in I-D Solar Induced Flows*’ Solar Energy, vol. 23, pp. 211-215, 1979.
- [8] J. Shen, S.Lassue, L.Zalewski and D.Huang. . “ *Numerical Study of Classical and Composite Solar Walls by TRNSYS*”. Journal Of Thermal Science, Vol 16, No.1, 46-55.
- [9] Ji Jie, Yi Hua, Pei Gang, Lu Jianping, ‘*Study of PV-Trombe wall installed in a fenestrated room with heat storage*’. Applied Thermal Engineering 27 (2007) 1507–1515.
- [10] Zohir YOUNSI a, Laurent ZALEWSKI a,*, Annabelle JOULIN a, Stéphane LASSUE a, et Daniel ROUSSE, ‘*ÉTUDE EXPÉRIMENTALE D’UN MUR TROMBE-COMPOSITE À ÉCHELLE RÉDUITE INTÉGRANT DES MATERIAUX À CHANGEMENT DE PHASE*’. IXème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes 18-20 mai 2009, Lille.
- [11] M.K.Chерier, “ *Etude Théorique et Expérimentale de l’Isolation Thermique Intérieure d’une Pièce d’un Habitat dans la région de Ghardaïa*”, Mémoire de Magister, Université d’Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2010.
- [12] Fakhreddine Abbassi, Narjes Dimassi, Leila Dehmani, ‘*Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations*’. Energy and Buildings 80 (2014) 302–308.
- [13] MAI THI DO, ‘*MODELISATION ET OPTIMISATION D’UN MUR SOLAIRE AVEC VITRAGE DANS UN BÂTIMENT RÉSIDENTIEL*’. Département de génie mécanique, faculté des sciences et génie, Université LAVAL, Québec, 2012.
- [14] Luca Buzzoni”, Roberto Dall’Olio”, Marco Spigab, ‘*Energy analysis of a passive solar system*’. Rev. Gin. Therm. (1998) 37, 411-416.

- [15] K. Imessad, N. Ait Messaoudene, M. Belhamel, '*Performances of the Barra–Costantini passive heating system under Algerian climate conditions*'. *Renewable Energy* 29 (2004) 357–367.
- [16] AKERMI MUSTAPHA, MEMOIRE de Magister en physique Ecole Doctorale Energies renouvelables, UNIVERSITÉ ABOU BAKER BELKAID. TLEMCEM.
- [17] John A.Duffie, William A. Beckman, '*Solar Energy Thermal Processes*'. Edition WILEY, 1974
- [18] Utzinger, D.M, '*Analysis of Buildings Components Related to Direct Solar Heating Buildings*', M.S.Thesis, University of Wisconsin, Madison, 1979.
- [19] D. M.Utzinger, S.A.Klein and W.J.Mitchell '*The Effect of Air flow Rate in Collector-Storage Walls*'. *Solar Energy*, vol. 25, pp. 511-519, 1980.
- [20] F. Kreith, '*Principales of Heat Transfert*'. Edition Harper International, 1976.
- [21] F.P.Incropera and D.P.Dewitt. '*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*', Edition John Wiley&Sons.
- [22] Manuel Carrier, bilan thermique, 2éme Edition. Edition Carrier Corporation 1960.
- [23] A.T.Kirpatrick, M. Bohn '*An Experimental Investigation of Mixed Cavity Natural Convection in the High Rayleigh Number Regime*' *Int. J. Heat Mass Transfer* 29, 69-81 1986.

ANNEXE 1

Zones climatique en Algérie (D.T.R. C 3-2)

Wilaya	Communes	Zone
01 ADRAR	Groupe de Communes 1 : Ksar Kaddour - Timiaouine - Tinerkouk	D
	Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	D'
02 CHLEF	Groupe de Communes 1 : Beni Haoua - Dahra - El Marsa - Moussadek - Sidi Abderrahmane - Talassa - Taougrite - Tenes - Oued Guoussine.	A
	Groupe de Communes 2 : Abou El Hassan - Benaira - Breira - Bouzghaia - Sidi Akkacha - Tadjena - Zeboudja.	B
	Groupe de Communes 3 : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes de communes 1 et 2.	B'
03 LAGHOUAT	Groupe de Communes 1 : Ain Medhi - El Assafia - El Haouita - Hassi Delaa - Hassi R'Mel - Kheneg - Ksar El Hirane - Laghouat - Mekhareg - Tadjrouna.	D
	Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	C
04 / OUM EL BOUAGHI	Toutes les communes	C
05 BATNA	Groupe de Communes 1 : Ain Touta - Arris - Barika - Bitam - Boumagueur - Bouzina - Chir - Djezzar - Ghassira - Gosbat - Hidoussa - Ichmoul - Inoughissen - Kimmel - Lemsane - Maafa - M'Doukal - Menaa - Merouana - Metkaouak - N'Gaous - Ouled Ammar - Ouled Aouf - Ouled - Si Slimane - Ras El Aïoun - Sefiane - Seggana - Taxlent - Teniet El Abed - Tighanimine - Tigherghar - Tilatou - T'Koult	D
	Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	C
06 BEJAIA	Groupe de Communes 1 : Adekar - Aokas - Bejaia - Beni Ksila - Boukhelifa - Hamza - Melbou - Souk El Tenine - Tala - Taourirt Ighil Tichi - Toudja - Oued Ghir	A
	Groupe de Communes : Ighli Ali.	C
	Groupe de Communes 3 : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes de communes 1 et 2.	B
07 BISKRA	Toutes les communes	D
08 BECHAR	Toutes les communes	D
09 BLIDA	Toutes les communes	B
10 BOUIRA	Groupe de Communes 1 : Aghbalou - Ahl El Ksar - Aidane - Ain El Hadjar - Ain Laloui - Ain Turk - Bechloul - Bordj Okhriss - Bouira - Chorfa - Dirah - El Adjiba - El Asnam - El Hachimia - El Hakimia - Hadjera Zerga - Haizer - Maamora - M'Chedallah - Mezdoor - Oued El Berdi - Ouled Rached - Saharidj - Taghzout - Taguedit	C
	Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	B
11 TAMANRASSET	Groupe de Communes 1 : In Ghar - In Salah	D'
	Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1	D
12 TEBESSA	Groupe de Communes 1 : Bir El Ater - El Mezeraa - El Ogla El Malha - Ferkane - Negrine - Oum Ali - Saf Saf El Ouesra - Stah Guentis - Thlidjene	D
	Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	C

13 TLEMCEM	<p>Groupe de Communes 1 : Beni Rached - Dar Yaghmouracene - Ghazaouet - Honaine - Marsa Ben M'Hidi - Msirda Fouaga - Souahlia - Souk Thlata</p> <p>Groupe de Communes 2 : Ain Ghoraba - Ain Tallout - Azails - Beni Bahdel - Beni Boussaïd - Beni Semiel - Beni Snouss - El Aricha - El Bouihi - El Gor - Sebdu - Sidi Djillali</p> <p>Groupe de Communes 3 : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes de communes 1 et 2.</p>	A C B
14 TIARET	<p>Groupe de Communes 1 : Djillali Ben Amar - Ghertoufa - Mechraa Safa - Meghila - Oued Lili - Rahouia - Sebt</p> <p>Groupe de Communes 2 : Sidi Ali Mellal - Tidda.</p> <p>Groupe de Communes 3 : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes de communes 1 et 2</p>	B B' C
15 TIZI OUZOU	<p>Groupe de Communes 1 : Aghrib - Ait Chaffa - Akerrou - Azzefoun Iflissen - Mizrana - Tizirt - Zekri</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	A B
16 ALGER	Toutes les communes	A
17 DJELFA	<p>Groupe de Communes 1 : Amoura - Deldoul - Guettara - Oum El Adam - Seb Rahal - Selmana</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	D C
18 JIJEL	<p>Groupe de Communes 1 : Chekfa - El Aouana - El Kennar Nouchfi - Emir Abdelkader - Jijel - Kaous - Keir Oued Adjoul - Mansouria Sidi Abdelaziz - Taher - Ziama.</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 2.</p>	A B
19 SETIF	<p>Groupe de Communes 1 : Boutaleb - Hamma.</p> <p>Groupe de Communes 2 : Ain Arnat - Ain Azal - Ain Lahdjar - Ain Oulmane - Beidha Bordj - Bellaa - Beni Hocine - Bir El Arch - Bir Haddada - El Eulma - El Ouldja - Guellal - Guenzet - Guidjel - Hammam Essokhna - Harbil - Ksar El Abtal - Mezloung - Ouled Sabor - Ouled Si Ahmed - Ouled Tebben - Rosfa - Salah Bey - Setif - Taya - Tella</p> <p>Groupe de Communes 3 : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes de communes 1 et 2.</p>	D C B
20 SAIDA	Toutes les communes	C
21 SKIKDA	<p>Groupe de Communes 1 : Ain Zouit - Benazouz - Cheraia - Collo - Djendel Saadi Mohamed - El Hadaik - El Marsa - Fil Fila - Hamadi Krouma - Kanoua - Kerkera - Kheneg Mayoum - Ouled Attia - Skikda - Tamalous - Zitouna</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	A B
22 SIDI BEL-ABBES	<p>Groupe de Communes 1 : Ain Tidamine - Benachiba Chelia - Bir El Hammam - Dhaya - El Haçaiba - Marhoum - Merine - Mezaourou - Moulay Slissen - Oued Sebaa - Oued Sefioun - Oued Taourira - Ras El Ma - Redjem Demouche - Sidi Ali Benyoub - Sidi Chaib - Taoudmout - Tassifour - Teghaliment - Telagh - Tenira.</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	C B
23 ANNABA	<p>Groupe de Communes 1 : Annaba - Chetaibi - Ouled El Aneb - Seraïdi</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	A B
24 GUELMA	<p>Groupe de Communes 1 : Tamlouk.</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant</p>	C

25 CONSTANTINE	Groupe de Communes 1 : Ain Smara - Ouled Rahmoune. Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	C B
26 MEDEA	Groupe de Communes 1 : Aissaouia - Baata - Benchicao - Beni Slimane - Bir Ben Laabed - Bouchrahil - Bouskene - Deux Bassins - Djouab - Draa Essamar - El Azizia - El Guelb El Kebir - El Hamdania - El Omara - Khams Djouamaa - Medea - Meghraoua - Mezrana - Mihoub - Ouamri - Oued Harbil - Ouled Brahim - Ouzera - Sidi Errabia - Sidi Naamane - Sidi Zahar - Sedraia - Souaghi - Tablat - Tamesguida - Tizi Mehdi Groupe de Communes 2 : Hannacha. Groupe de Communes 3 : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes de communes 1 et 2.	B B' C
27 MOSTAGANEM	Groupe de Communes 1 : Ouled Maalah - Sidi Ali Groupe de Communes 2 : Bouguirat - Oued El Kheir - Oued Safsaf - Mansourah - Nekmaria - Sirat - Sour - Souafia - Tazghait - Touahria Groupe de Communes 3 : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes de communes 1 et 2.	B' B A
28 M'SILA	Groupe de Communes 1 : Ain El Hadjel - Beni Ilmane - Bir Foda - Bouti Sayah - Djebel Messad - El Hamel - El Houamed - Hammam Dhalaa - Maadid - Medjedel - Mena - Oultene - Sidi Aissa - Sidi Ameur - Sidi Hadjeres - Slim - Tamount - Tamsa - Ouanougha Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	C D
29 MASCARA	Groupe de Communes 1 : Alaimia. Groupe de Communes 2 : Ain Ferah - Oued El Abtal - Sidi Abdeldjabar - Sehaïlia. Groupe de Communes 3 : Aouf - Benian - Gharrous - M'Hamid - Mokhda - Nesmot - Oued Taria - Sidi Boussaid - Sidi Kada Groupe de Communes 4 : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes de communes 1, 2 et 3.	A B' C B
30 OURGLA	Toutes les communes	D
31 ORAN	Groupe de Communes 1 : El Braya - El Karma - Oued Tlelat - Tafraoui. Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	B A
32 EL BAYADH	Groupe de Communes 1 : Boussemghoun - Brezina - El Benoud - El Abiod Sidi Cheikh Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	D C
33 ILIZI	Toutes les communes	D
34 BORDJ BOU ARRERIDJ	Groupe de Communes 1 : Ouled Sidi Brahim Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	B C
35 BOUMERDES	Groupe de Communes 1 : Ammal - Beni Amrane - Bordj Menaiel - Bouzegza Keddar - Chabet El Ameur - El Kharouba - Isser - Khemis El Khechna - Larbatache - Naciria - Si Mustapha - Souk El Had - Timezrit Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	B A
36 EL TARF	Groupe de Communes 1 : Ben M'Hidi - Berrihane - Echott - El Kala - Souarekh Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.	A B
37 TINDOUF	Toutes les communes	D

38 TISSEMSILT	<p>Groupe de Communes 1 : Lazharia.</p> <p>Groupe de Communes 2 : Beni Lahcene - Bordj Bounaama - Boucaid - Larbaa - Lardjem - Maassem - Mellaab - Sidi Lantri - Sidi Slimane - Tamalaht</p> <p>Groupe de Communes 3 : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes de communes 1 et 2</p>	<p>B'</p> <p>B</p> <p>C</p>
39 EL OUED	Toutes les communes	D
40 KHENCHELA	<p>Groupe de Communes 1 : Babar - Bouhmama - Cherchar - Djellal - El Ouldja - Khirane - M^e Sara</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	<p>D</p> <p>C</p>
41 SOUK AHRAS	<p>Groupe de Communes 1 : Ain Zana - Haddada - Hanancha - Khedara - Mechroha - Merahna - Ouled Driss - Ouled Moumen - Quillen - Sidi Fredj - Souk Ahras - Taoura - Zaarouria</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	<p>B</p> <p>C</p>
42 TIPAZA	<p>Groupe de Communes 1 : Ahmer El Ain - Attatba - Bourkika - Menaceur - Meurad</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	<p>B</p> <p>A</p>
43 MILA	<p>Groupe de Communes 1 : Ain Mellouk - Benyahia Abderrahmane - Chelghoum Laid - El Mechira - Oued Athmania - Oued Khalouf - Oued Seguen - Tadjenanet - Telerghma</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	<p>C</p> <p>B</p>
44 AIN DEFLA	<p>Groupe de Communes 1 : Ain Lechiakh - Oued Djemaa - Tarik Ibn Ziad</p> <p>Groupe de Communes 2 : Ain Benian - Ain Torki - Arib - Bathia - Belaas - Ben Allah - Boumedfaa - El Hassania - Hammam Righa - Hoceinia - Miliana - Tacheta Zougagha</p> <p>Groupe de Communes 3 : Toutes les communes autres que celles figurant aux groupes de communes 1 et 2</p>	<p>C</p> <p>B</p> <p>B'</p>
45 NAAMA	<p>Groupe de Communes 1 : Asla - Djenien Bourezg - Morhar</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	<p>D</p> <p>C</p>
46 AIN TEMOUCHENT	<p>Groupe de Communes 1 : Aghlal - Ain Kihal - Ain El Arbaa - Ain Temouchent - Aoubellil - Chaabet El Ham - Chentouf - Hammam Bouhdjar - Hassasna - Oued Berkeche - Oued Sabah - Sidi Boumediene - Tamzoura</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes 1.</p>	<p>B</p> <p>A</p>
47 GHARDAIA	Toutes les communes	D
48 RELIZANE	<p>Groupe de Communes 1 : Beni Zentis - Kalaa - Mediouna - Mendes - Sidi M^e Hamed Benali - Sidi Saada - Yellel</p> <p>Groupe de Communes 2 : Toutes les communes autres que celles figurant au groupes de commune 1.</p>	<p>B</p> <p>B'</p>

ANNEXE 2

Tableau 1–Coefficient d’amortissement. Gain par ensoleillement des vitrages simples.
Température intérieure constante

Orientation	Poids(x)(kg par m2 de surface de plancher)	Heure Solaire																								
		Matin										Après-Midi										Matin				
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	
NE	750 et plus	.17	.27	.33	.33	.31	.29	.27	.25	.23	.22	.2	.19	.17	.15	.14	.12	.11	.1	.09	.08	.07	.07	.06	.06	
	500	.19	.31	.38	.39	.36	.34	.27	.24	.22	.21	.19	.17	.16	.14	.12	.1	.07	.08	.07	.06	.05	.05	.04	.03	
	150	.31	.56	.65	.46	.46	.33	.26	.21	.18	.16	.14	.12	.09	.06	.04	.03	.02	.01	.01	.01	0	0	0	0	
E	750 et plus	.16	.26	.34	.39	.4	.38	.34	.3	.28	.26	.23	.22	.2	.18	.16	.14	.13	.12	.1	.09	.08	.08	.07	.06	
	500	.16	.29	.4	.46	.46	.42	.36	.31	.28	.25	.23	.2	.18	.15	.14	.12	.11	.09	.08	.08	.06	.06	.05	.04	
	150	.27	.5	.67	.73	.68	.53	.38	.27	.22	.18	.15	.12	.09	.06	.04	.03	.02	.01	.01	.01	.01	0	0	.01	
SE	750 et plus	.08	.14	.23	.31	.38	.43	.44	.43	.39	.35	.32	.29	.26	.23	.21	.19	.16	.15	.13	.12	.11	.1	.09	.08	
	500	.05	.12	.23	.35	.44	.49	.51	.47	.41	.36	.31	.27	.24	.21	.18	.16	.14	.12	.1	.09	.08	.08	.06	.06	
	150	0	.18	.4	.59	.72	.77	.72	.6	.44	.32	.23	.18	.14	.09	.07	.05	.03	.02	.01	.01	.01	0	0	0	
S	750 et plus	.1	.1	.13	.2	.28	.35	.42	.48	.51	.51	.46	.42	.37	.33	.29	.26	.23	.21	.19	.17	.15	.14	.13	.12	
	500	.07	.06	.12	.2	.3	.39	.48	.54	.58	.57	.53	.45	.37	.31	.27	.23	.2	.18	.16	.14	.12	.11	.1	.08	
	150	0	0	.12	.29	.48	.64	.75	.82	.81	.75	.61	.42	.28	.19	.13	.09	.06	.04	.03	.02	.01	.01	0	0	
SO	750 et plus	.11	.1	.1	.1	.1	.14	.21	.29	.36	.43	.47	.46	.4	.34	.3	.27	.24	.22	.2	.18	.16	.14	.13	.12	
	500	.09	.09	.08	.09	.09	.14	.22	.31	.42	.5	.53	.51	.44	.35	.29	.26	.22	.19	.17	.15	.13	.11	.11	.09	
	150	.02	.03	.05	.06	.08	.12	.34	.53	.68	.78	.78	.68	.46	.29	.2	.14	.09	.07	.05	.03	.02	.02	.01	.01	
O	750 et plus	.12	.11	.11	.1	.1	.1	.1	.13	.19	.27	.36	.42	.44	.38	.33	.29	.26	.23	.21	.18	.16	.15	.13	.12	
	500	.09	.09	.09	.09	.09	.09	.1	.12	.19	.3	.4	.48	.51	.42	.35	.3	.25	.22	.19	.16	.14	.13	.11	.09	
	150	.02	.03	.05	.06	.07	.07	.08	.14	.29	.49	.67	.76	.75	.53	.33	.22	.15	.11	.08	.05	.04	.03	.02	.01	
NO	750 et plus	.1	.1	.1	.1	.1	.1	.1	.1	.12	.17	.25	.34	.39	.34	.29	.26	.23	.2	.18	.16	.14	.13	.12	.1	
	500	.08	.09	.09	.09	.09	.09	.09	.09	.11	.19	.29	.4	.46	.4	.32	.26	.22	.19	.16	.14	.13	.11	.1	.08	
	150	.02	.04	.05	.07	.08	.09	.1	.1	.13	.27	.48	.65	.73	.49	.31	.21	.16	.1	.07	.05	.04	.03	.02	.01	
N et Ombre	750 et plus	.16	.23	.33	.41	.47	.52	.57	.61	.66	.69	.72	.74	.59	.52	.46	.42	.37	.34	.31	.27	.25	.23	.21	.17	
	500	.11	.33	.44	.51	.57	.62	.66	.7	.74	.76	.79	.8	.6	.51	.44	.37	.32	.29	.27	.23	.21	.18	.16	.13	
	150	0	.48	.66	.76	.82	.87	.91	.93	.95	.97	.98	.98	.52	.34	.24	.16	.11	.07	.05	.04	.02	.02	.01	.01	

Poids par mètre carré de surface

$$\text{Local comportant des murs extérieurs} = \frac{\text{poids des murs extérieurs} + \frac{1}{2}(\text{poids des cloisons, plafond et plancher}) \text{ [kg]}}{\text{Surface du plancher [m2]}}$$

Tableau 2–Coefficients d’amortissement. Gains dus à l’éclairage.
Température intérieure constante.

Type d'appareil	Durée de fonctionnement	Poids(x)(kg/m2 de surface de plancher)	Nombre d'heures écoulées depuis l'allumage																							
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Eclairage fluorescent Appareil non encastré	24	750 et plus	.37	.67	.71	.74	.76	.79	.81	.83	.84	.86	.87	.29	.26	.23	.2	.19	.17	.15	.14	.12	.11	.11	.09	.08
		500	.31	.67	.72	.76	.79	.81	.83	.85	.87	.88	.9	.3	.26	.22	.19	.16	.15	.13	.12	.1	.09	.08	.07	.06
		150	.25	.74	.83	.88	.91	.94	.96	.96	.98	.99	.99	.26	.17	.12	.08	.08	.04	.03	.02	.01	.01	.01	0	0
	16	750 et plus	.6	.82	.83	.84	.84	.84	.85	.85	.86	.88	.9	.32	.28	.25	.23	.19								
		500	.46	.79	.84	.86	.87	.88	.88	.89	.89	.9	.9	.3	.26	.22	.19	.16								
	150	750 et plus	.29	.77	.85	.89	.92	.95	.96	.96	.98	.98	.99	.26	.17	.12	.08	.05								
500		.63	.9	.91	.93	.93	.94	.95	.95	.95	.96	.96	.37													
Eclairage fluorescent encastré, ou encastré non encastré	24	750 et plus	.34	.55	.61	.65	.68	.71	.74	.77	.79	.81	.83	.39	.35	.31	.28	.25	.23	.2	.18	.16	.15	.14	.12	.11
		500	.24	.56	.63	.68	.72	.75	.78	.8	.84	.84	.86	.4	.34	.29	.25	.2	.18	.17	.15	.14	.12	.1	.09	.08
		150	.17	.65	.77	.84	.88	.92	.94	.95	.97	.98	.98	.35	.23	.16	.11	.07	.05	.04	.03	.02	.01	.01	0	0
	16	750 et plus	.58	.75	.79	.8	.8	.81	.82	.83	.84	.86	.87	.39	.35	.31	.31	.28	.25							
		500	.46	.73	.78	.82	.82	.82	.83	.84	.85	.87	.88	.4	.34	.29	.29	.25	.2							
	150	750 et plus	.22	.69	.8	.86	.89	.93	.94	.95	.97	.98	.98	.35	.23	.23	.16	.11	.07							
500		.69	.86	.89	.9	.91	.91	.92	.93	.94	.95	.95	.5													
Eclairage fluorescent ou incandescent encastré dans faux plafond	24	750 et plus	.23	.33	.41	.47	.52	.57	.61	.66	.69	.72	.74	.59	.52	.46	.42	.37	.34	.31	.27	.25	.23	.21	.18	.16
		500	.17	.33	.44	.52	.56	.61	.66	.69	.74	.77	.79	.6	.51	.44	.37	.32	.3	.27	.23	.2	.2	.16	.14	.12
		150	0	.48	.66	.76	.82	.87	.91	.93	.95	.97	.97	.52	.34	.24	.16	.16	.07	.05	.04	.02	.02	.01	0	0
	16	750 et plus	.57	.64	.68	.72	.73	.73	.74	.74	.75	.76	.78	.59	.52	.46	.42	.37								
		500	.47	.6	.67	.72	.74	.77	.78	.79	.8	.81	.82	.6	.51	.44	.37	.32								
	150	750 et plus	.07	.53	.7	.78	.84	.88	.91	.93	.95	.97	.98	.52	.34	.24	.16	.11								
500		.75	.79	.83	.84	.86	.88	.89	.91	.91	.93	.93	.75													
12	750 et plus	.68	.77	.81	.84	.86	.88	.89	.89	.92	.93	.93	.72													
	150	.34	.72	.82	.87	.89	.92	.95	.95	.97	.98	.98	.52													

Ces coefficients sont applicables dans le cas où la température intérieure est supposée rester constante, si on admet une certaine variation de cette température, on obtiendra un amortissement supplémentaire.