

وزارة التربية الوطنية  
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DU GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE D'UN SYSTEME DE  
CHAUFFAGE PASSIF PAR  
UTILISATION D'UN MUR  
STOCKEUR

Proposé par :

S.LARBI

Etudié par :

BELEMCILI Mourad  
ZEGHRIR Mahmoud

Dirigé par

S. LARBI

Promotion 93

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية  
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DU GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE D'UN SYSTEME DE  
CHAUFFAGE PASSIF PAR  
UTILISATION D'UN MUR  
STOCKEUR

Proposé par :

S.LARBI

Etudié par :

BELEMCILI Mourad  
ZEGHRIR Mahmoud

Dirigé par

S. LARBI

Promotion 93

## RESUME

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

يهدف هذا العمل الى تقييم مواصفات بعض المنظومات المستعملة  
في استقبال و تخزين الطاقة الشمسية واستعمالها في تدفئة المباني  
وذلك بدراسة العوامل الفيزيائية و الهندسية المؤثرة عليها .

Ce travail consiste en l'étude des performances de quelques  
systèmes qui captent et stockent l'énergie solaire dans la  
perspective d'une utilisation pour le chauffage du bâtiment .

The present work consists in study of performance system's  
used in collect and storage of solar energy and its using in  
heating of building .

## DEDICACES

Je dedie ce modeste travail

- à mes parents
- à mes frères et sœurs
- à mes amis

ZEGHRIR Mahmoud  
ZAID Fateh  
CHAKER Abdel Aziz  
BENAMRA Hacène  
SAID DJAAT Said  
ROUABHI Fateh

## REMERCIEMENTS

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Nous tenons à adresser notre sincère et profonde reconnaissance à notre promoteur M<sup>r</sup>. S. Larbi pour ses conseils précieux . Nous remercions également tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique et particulièrement ceux du département du GENIE MECANIQUE .

Nous tenons enfin à exprimer notre gratitude à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail .

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## SOMMAIRE

## SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## Nomenclature.

Introduction .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire.</b>	
I.1- Le soleil .....	3
I.2- La constante solaire .....	4
I.3- Phénomènes atmosphériques et leur influence sur l'énergie recueillie au sol.....	4
I.3.1- Masse atmosphérique.....	4
I.3.2- Absorption des gaz atmosphériques.....	6
I.4- Rayonnement solaire.....	7
I.5- Mesure du rayonnement solaire.....	8
I.5.1- Appareils de mesure.....	8
- Héliographe.....	8
- Pyrhéliomètre.....	9
- Pyranomètre. ....	9
<b>Chapitre II : Description des systèmes de chauffage passif.</b>	
II.1- Maisons solaires .....	12
II.1.1- Captage du rayonnement solaire .....	12
- Principe .....	12
- Stockage .....	12
II.1.2- Choix des surfaces verticales .....	13
II.1.3- Ventilation naturelle.....	14
II.1.4- Aspect économique .....	14
II.2- Systèmes à étudier .....	15
II.2.1- Mur massif à simple vitrage .....	16
II.2.2- Mur massif à double vitrage .....	16
II.2.3- Mur massif à double vitrage avec thermocirculation .....	17
II.2.4- Mur massif à double vitrage et à isolation interne .....	17



<b>Chapitre III : Modélisation mathématique.</b>	
III.1- Radiation solaire .....	20
III.2- Bilans thermique .....	21
III.3- Calcul des coefficients d'échange .....	26
III.3.1- Coefficient d'échange avec le milieu extérieur $h_0$ .....	26
III.3.2- Coefficient d'échange convectif entre deux surfaces verticales et parallèles .....	26
III.3.3- Coefficient d'échange convectif entre une paroi verticale et un fluide en mouvement... ..	27
III.3.4- Coefficient d'échange convectif entre une paroi verticale et l'air d'un grand espace.. ..	28
III.3.5- Facteurs d'émissivité et facteurs de forme... ..	28
III.4 Calcul du flux utile .....	29
 <b>Chapitre IV : Résolution numérique.</b>	
IV.1- Discrétisation et linéarisation des équations ....	31
IV.1.1- Discrétisation de l'équation de la chaleur... ..	31
IV.1.2- Linéarisation des équations .....	32
IV.2- Formulation matricielle des systèmes d'équations.. ..	37
IV.3- Construction du code informatique .....	42
IV.4- Organigramme .....	43
 <b>Chapitre V : Résultats et discussion.</b>	
V.1- Présentation des résultats et interprétations .....	47
V.2- Discussions.....	64
 Conclusion .....	65
Annexe I	
Annexe II	
Bibliographie	

NOMENCLATURE
--------------

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات BIBLIOTHEQUE — المكتبة Ecole Nationale Polytechnique
--

- A : Rapport d'aspect.  
 A<sub>v</sub> : Section des orifices [m<sup>2</sup>].  
 C<sub>p</sub> : Chaleur spécifique [J/Kg.°C].  
 C<sub>r</sub> : Chaleur spécifique de l'air dans la cheminée [J/Kg.°C].  
 C<sub>d</sub> : Coefficient de perte de charge.  
 d<sub>i</sub> : Epaisseur de la contre-cloison isolante.  
 e<sub>g</sub> : Epaisseur du vitrage [m].  
 F<sub>ij</sub> : Facteur de forme entre deux surfaces i et j.  
 Fe<sub>ij</sub> : Facteur d'émissivité entre 2 surfaces i et j.  
 G<sub>t</sub> : Densité du flux solaire [W/m<sup>2</sup>].  
 g : Constante gravitationnelle 9,81 m/s<sup>2</sup>.  
 H : Hauteur du modèle [m].  
 H' : Distance entre les orifices [m].  
 h<sub>ij</sub> : Coefficient de convection entre deux surfaces (i) et (j) [W/m<sup>2</sup>.°C].  
 hr<sub>ij</sub> : Coefficient d'échange radiatif entre deux surfaces (i) et (j) [W/m<sup>2</sup>.°C].  
 h<sub>o</sub> : Coefficient convectif avec le milieu extérieur [W/m<sup>2</sup>.°C].  
 I : Densité du flux solaire sur une surface horizontale [W/m<sup>2</sup>].  
 L : Epaisseur du mur massif [m].  
 m : Débit massique de l'air [Kg/s].  
 Nu : Nombre de Nusselt.  
 Pr : Nombre de Prandtl.  
 Ra : Nombre de Rayleigh.  
 Gr : Nombre de Grashof.  
 Re : Nombre de Reynolds.  
 q<sub>u</sub> : Densité du flux utile [W/m<sup>2</sup>].  
 q<sub>o</sub> : Densité du flux utile [W/m<sup>2</sup>].

- $S_j$  : Densité du flux solaire absorbée par la surface (J) [W/m<sup>2</sup>].  
 $T$  : Température [°C].  
 $T_a$  : Température ambiante de l'extérieur [°C].  
 $T_f$  : Température moyenne de l'air dans la cheminée [°C].  
 $T_{gr}$  : Température du sol.  
 $T_i$  : Température de l'enceinte à chauffée.  
 $T_k$  : Températures des surfaces intérieures des murs de l'enceinte.  
 $T_o$  : Température de sortie de l'air de la cheminée.  
 $T_e$  : Température équivalente du ciel.  
 $t$  : Temps [s].  
 $V$  : Vitesse de l'air [m/s].

## Lettres Grec :

- $\alpha$  : Absorptivité.  
 $\epsilon$  : Emissivité.  
 $\tau$  : Transmittance du rayonnement solaire.  
 $\theta$  : Angle d'incidence du rayonnement solaire [rad].  
 $\theta_z$  : Zenith [rad].  
 $\rho$  : Densité [Kg/m<sup>3</sup>], réflectivité.  
 $\sigma$  : Constante de Stephan-Boltzmann [W/m<sup>2</sup>.°K<sup>4</sup>].  
 $\lambda$  : Conductivité thermique du mur massif [W/m.°K].  
 $\lambda_f$  : Conductivité thermique de l'air de la cheminée.  
 $\lambda_i$  : Conductivité thermique de la contre-cloison isolante.

## Indices :

- $b$  : Direct.  
 $d$  : Diffus.  
 $f$  : Air dans la cheminée.  
 $gr$  : Sol.  
 $t$  : Total.

# INTRODUCTION

La consommation énergétique mondiale ne cesse de s'accroître avec l'évolution des besoins industriels et les exigences domestiques. Trente pour cent environ de cette énergie est utilisée pour le chauffage des habitations et des locaux.

Avec cette augmentation de consommation, les réserves d'énergie traditionnelle se trouvent limitées et menacées d'épuisement. Pour parer à cette éventualité la recherche de nouvelles sources d'énergie est devenue impérative. C'est ainsi qu'est apparue l'importance de l'énergie solaire, source inépuisable et gratuite :

L'exploitation de l'énergie solaire remonte à l'antiquité: les Egyptiens ont découvert l'effet de serre en constatant qu'un corps exposé au soleil dans un récipient en verre s'échauffe plus qu'à l'air libre. Cent ans après J.C, Héron d'Alexandrie construisit un dispositif pour pomper l'eau en exploitant le rayonnement solaire. Archimède incendia la flotte romaine à Syracuse au III<sup>e</sup> siècle à l'aide des miroirs regroupés de façon à avoir une surface concave qui concentre le rayonnement solaire.

Pendant une longue période de temps cette forme d'énergie a connu un délaissement et ça a duré jusqu'en 1615 où Salomon de Gauss construisit une pompe solaire et Lavoisier réalisa le premier four solaire en concentrant les rayons solaires par une lentille à liquide, il atteignit la température de fusion du platine. Au dix-huitième siècle beaucoup d'inventions fonctionnant en énergie solaire ont vu le jour et ont connus à notre siècle, des développements et des rénovations remarquables.

Actuellement l'énergie solaire est utilisée dans beaucoup de pratiques, allant du chauffage direct à la production de l'électricité. Et les recherches actuelles sont orientées vers une utilisation rationnelle de cette énergie, qui présente l'avantage d'être gratuite et non polluante, mais de sérieux problèmes de stockage ne sont pas à exclure.

Au stade actuel, le chauffage des bâtiments est le domaine où l'énergie solaire a relativement avancé, au point où beaucoup de cités dans le monde sont chauffées par le rayonnement solaire.

Malgré l'utilisation de cette forme d'énergie pour le chauffage, le taux de participation de l'énergie solaire reste très faible par rapport à l'énergie totale consommée dans ce domaine. En Europe ce taux ne dépasse pas 10 %, aux États-unis, il varie de 10 à 20 %, selon les régions.

Pour un pays comme l'Algérie où plus de 90 % de son territoire est ensoleillé plus de onze mois sur douze, l'énergie solaire se présente comme une alternative énergétique pour le futur. Des installations solaires peuvent alimenter les régions les plus reculées où le transport d'autres formes d'énergie est difficile et onéreux. Elle peut, également, résoudre beaucoup de problèmes comme le dessalement des eaux, l'alimentation de pompes pour l'exploitation des eaux souterraines ainsi que la climatisation et le chauffage des cités implantées au sud dont le contraste du climat entre le jour et la nuit est très remarquable.

Dans cette étude, nous allons examiner un domaine où l'énergie solaire commence à être exploitée sérieusement pour alléger le fardeau du besoin énergétique; c'est le domaine du chauffage. Pour cela nous allons étudier les performances des différents systèmes nécessaires au captage et au stockage de cette forme d'énergie utilisée pour le chauffage.

# CHAPITRE I

## GENERALITES SUR L'ENERGIE SOLAIRE

### I.1- Le soleil :

C'est une sphère gazeuse constituée d'hélium, d'hydrogène, de carbone et d'autres éléments en très faible quantité. Sa densité moyenne est de  $1400 \text{ Kg/m}^3$  [  $5500 \text{ Kg/m}^3$  pour la terre ].

Elle atteint  $76000 \text{ Kg/m}^3$  au centre, son rayon est de  $700000 \text{ Km}$  ( rayon terrestre :  $6400 \text{ Km}$ ). Sa masse représente  $99,85 \%$  de la masse totale du système solaire et  $330000$  fois celle de la terre. Son âge est estimé à environ  $6$  milliards d'années et sa durée probable de vie est du même ordre de grandeur.

La terre tourne autour du soleil suivant une orbite elliptique dont le soleil occupe un foyer. La distance moyenne de la terre au soleil est de  $149450000 \text{ Km}$ . Elle est minimale [ au périhélie ] vers le 15 janvier et maximale [ à l'aphélie ] vers la fin du mois de juin.

Le soleil n'est pas une sphère homogène, on distingue trois régions principales :

- 1- L'intérieur où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire; tout le rayonnement émis dans cette région est absorbé par la zone qui l'enveloppe (photosphère), la température atteint plusieurs millions de degrés et la pression un milliard d'atmosphères.
- 2- La photosphère est une couche très mince (environ  $300 \text{ Km}$  d'épaisseur), elle est responsable de la presque totalité du rayonnement que nous recevons, sa température à la surface est de l'ordre de  $4500 \text{ °K}$  et sa pression est de l'ordre du centième de l'atmosphère.
- 3- Les régions à faibles densités : la chromosphère et la couronne où la matière est très diluée et le rayonnement émis est très faible.

## I.2- La constante solaire :

C'est l'énergie totale reçue par la terre juste en dehors de l'atmosphère. Elle est indépendante du lieu et des conditions météorologiques. Sa valeur moyenne est de  $1353 \text{ W/m}^2$  (mesures faites par satellites et fusées).

La terre qui reçoit une partie de cette énergie, tourne sur une orbite elliptique autour du soleil, ce qui entraîne une variation de la distance soleil-terre, influant par conséquent sur la valeur du rayonnement.

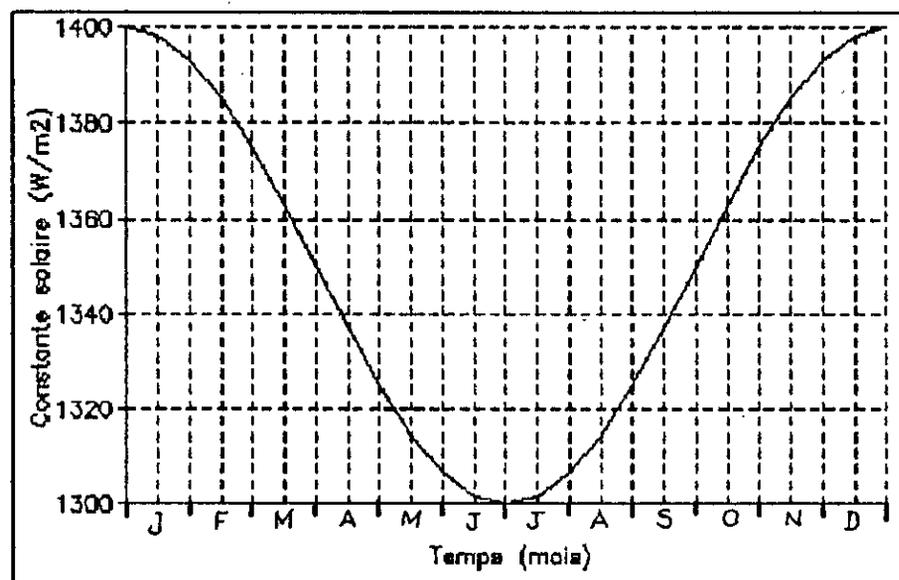


Fig. (I.1): Variation de la constante solaire au cours de l'année.

la valeur de la constante solaire n'atteint le sol de la terre qu'en partie, ceci est dû aux phénomènes d'absorption de l'atmosphère et de la réflexion.

## I.3- Phénomènes atmosphériques et leur influence sur l'énergie recueillie :

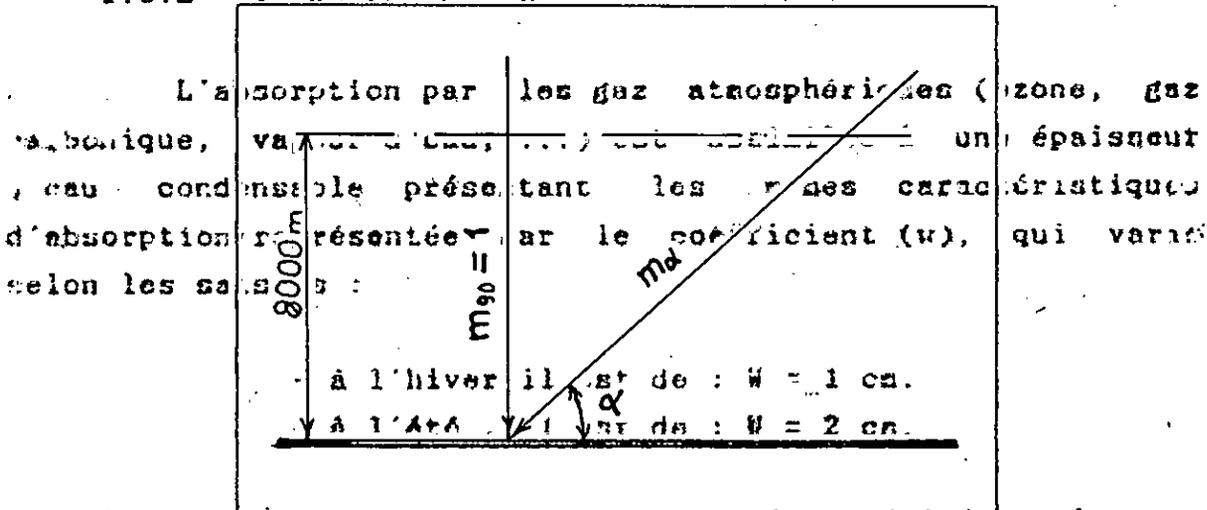
### I.3.1- Masse atmosphérique :

Avant d'atteindre le sol le rayonnement solaire traverse une masse atmosphérique; cette dernière est constituée

d'air, de vapeur d'eau, de gaz carbonique et d'autre aérosols. Son épaisseur moyenne est évaluée à 8 Km.

Lorsque le soleil est non vertical par rapport à une région, l'épaisseur de la masse atmosphérique que doit traverser le rayonnement devient plus grande, et ainsi le rayonnement s'affaiblit encore plus.

1.3.2- Absorption par les gaz atmosphériques :



Pour une période quelconque de l'année, ce coefficient est pris égal à la moyenne pondérée des deux cas précédents. Quant à la diffusion moléculaire, elle (m) est la masse atmosphérique lorsque l'incidence est normale à la terre, elle est (m<sub>α</sub>) quand l'incidence fait un angle (α) avec l'horizontale. La diffusion par les aérosols fait introduire un coefficient de trouble d'Angstrom (β) qui peut prendre les valeurs suivantes :

$$\frac{m}{m_{\alpha}} = \frac{1}{\sin \alpha} \rightarrow m_{\alpha} = \frac{m}{\sin \alpha}$$

β = 0.05 ciel bleu.  
β = 0.1 ciel moyen.

Les estimations des différentes masses atmosphériques (m<sub>α</sub>) sont rapportées à la masse (m) qui prend arbitrairement la valeur de (m=1) pour un trajet normal au sol, sous une pression d'un bar au niveau de la mer et prévoir le rendement. Si par exemple (α) est 30° alors la masse atmosphérique (m<sub>α</sub>) sera double du cas où le soleil est normal à la surface considérée et ainsi le rayonnement qui atteint le sol sera la moitié de sa valeur de rayonnement en fonction de la hauteur angulaire (α) a donné :

	10	20	30	40	PFE 93	90
ENP-G.MECANIQUE						
I <sub>v</sub> /I <sub>z</sub>	132	355	610	748	860	950

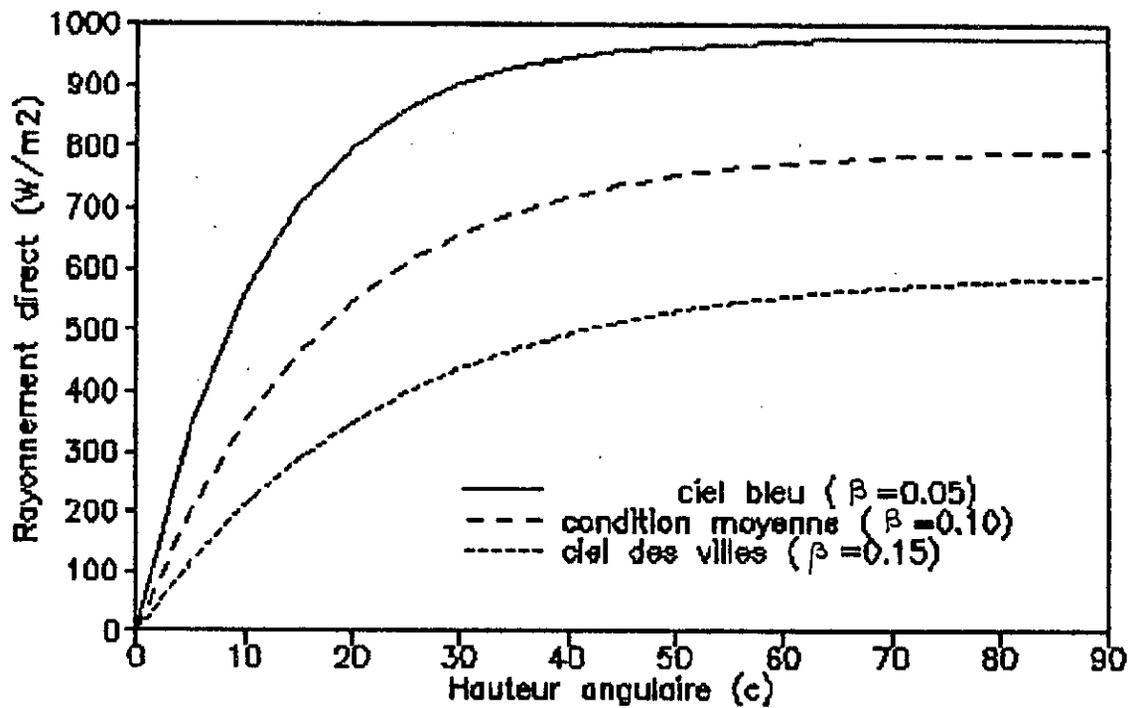


Fig.(I.2): Valeurs du rayonnement direct ( $I_b$ ) en fonction de la hauteur angulaire pour trois situations atmosphériques différentes.

#### I.4 Rayonnement solaire

Le rayonnement reçu sur le sol de la terre est le rayonnement global ( $G_t$ ) qui se compose de deux parties:

- Le rayonnement direct ( $I_b$ ) qui arrive directement du soleil et qui est corrigé par les facteurs atmosphériques.
- Le rayonnement diffus qui provient de la voûte céleste et du sol terrestre.

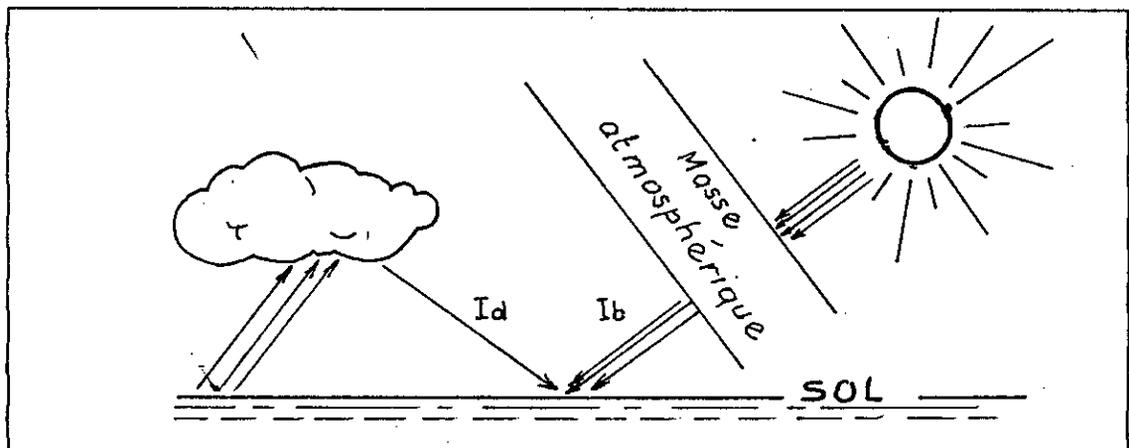


Fig.(I.4): Rayonnement reçu au sol

La valeur du rayonnement global ( $G_t$ ) est finalement la partie de la constante solaire échappée aux effets des facteurs atmosphériques et géométriques. Les appareils de mesure ne donnent que cette valeur et ne peuvent estimer les corrections subies durant le trajet, avant d'atteindre le sol.

En réalité le rayonnement solaire s'étend sur une large bande spectrale que les appareils de mesure n'intercepte qu'en partie et sélectivement.

### I.5 Mesure du rayonnement solaire

L'établissement d'un bilan énergétique fidèle, nécessite la collection des données suivantes:

- Durée d'insolation (ensoleillement)
- Mesure du rayonnement direct ( $I_b$ ).
- Mesure du rayonnement diffus ( $I_d$ )
- Mesure du rayonnement global ( $G_t$ )

Pour évaluer ces grandeurs avec une précision appréciable, des instruments appropriés sont conçus de façon à être capables dans les conditions les plus défavorables à enregistrer avec fidélité les caractéristiques solaires d'une région quelconque.

Parmi ces appareils, on utilisait autrefois, les radiomètres qui permettent de mesurer la valeur de toute radiation de nature quelconque. Pour ces anciens modèles il y'avait deux méthodes de mesures: soit l'appareil mesure la quantité de chaleur reçue, il est appelé dans ce cas calorimètre, soit il enregistre l'effet de la radiation sur une matière sensible à la radiation considérée.

Actuellement il y'a trois principales familles d'appareils de mesure du rayonnement et de l'insolation solaire : HELIOGRAPHES , PERHYLIOMETRES et PYRANOMETRES .

#### I.5.1 APPAREILS DE MESURE :

**HELIOGRAPHE:** Pour étudier les sites favorables pour les installations solaires, il est bon de savoir la durée d'insolation pendant une durée de temps donnée. Divers

appareils de mesure de la durée d'insolation sont conçus et sont en usage : ce sont les héliographes.

Il existe plusieurs modèles d'héliographes : les héliographes photo-électriques qui sont peu utilisés du fait de leurs coûts élevés et c'est ceux de la vieille conception qui sont encore utilisés. Ils se composent d'une boule en verre agissant comme lentille qui concentre le rayonnement en un point sur un papier spécial qui brûle en ce point. Quand le soleil se déplace le point brûlé se déplace sur une courbe dont la longueur est proportionnelle à la durée d'insolation. L'intensité du rayonnement est appréciée d'après l'aspect de la brûlure du papier.

Des normes internationales sont établies comme référence de base de la mesure de la durée de l'insolation fixant le seuil minimal pour lequel il y a ou non insolation. Ce seuil est de  $120 \text{ W/m}^2$ .

Les plus connus de ces appareils sur le marché sont :

- Héliographes COMPELL-STOKES .
- Héliographes JORDAN .
- Héliographes Américains MARVIN .

**PYRHELIOMETRE:** C'est l'appareil de mesure de l'énergie solaire reçue directement par une surface exposée perpendiculairement aux rayons solaires. IL ne mesure que le rayonnement incident direct ( $I_b$ ). Pour une bonne utilisation l'appareil doit être exposé constamment de façon à recevoir le rayonnement perpendiculairement à sa partie sensible. Pour cette raison les pyrhéliomètres sont souvent équipés de mécanismes d'orientation automatique.

Il y'a différents types de pyrhéliomètres :

les pyrhéliomètres à photopiles, les pyrhéliomètres à disque d'argent, ... etc.

**PYRANOMETRE:** Il est souvent utile de connaître le rayonnement global ( $G_t$ ) reçu par une surface. Les pyranomètres sont des appareils qui mesurent ce rayonnement composé du rayonnement direct ( $I_b$ ) et du rayonnement diffus ( $I_d$ ). L'appareil est conçu de façon à recevoir le rayonnement provenant du soleil et le rayonnement diffus de l'hémisphère.

Il existe plusieurs types de pyranomètres : on cite les pyranomètres à photopiles et les pyranomètres à bilame.

Les pyranomètres permettent aussi la mesure du rayonnement diffus par l'obturation du rayonnement incident.

## CHAPITRE II

# DESCRIPTION DES SYSTEMES DE CHAUFFAGE SOLAIRE

Le prix élevé de l'énergie ainsi que les problèmes liés à la pollution atmosphérique sont des facteurs qui contribuent à l'heure actuelle à attirer l'attention sur certains types d'habitations chauffées par le soleil et à mettre en évidence l'intérêt et la rentabilité de celle-ci.

Au cours de ces dernières années, divers prototypes de maisons solaires ont été réalisés aux états unis, en Australie, au Japon et en France. Ces prototypes sont en général compliqués et coûteux du fait du souci de leurs réalisateurs de les rendre complètement autonomes : c'est à dire de s'en passer d'énergie complémentaire.

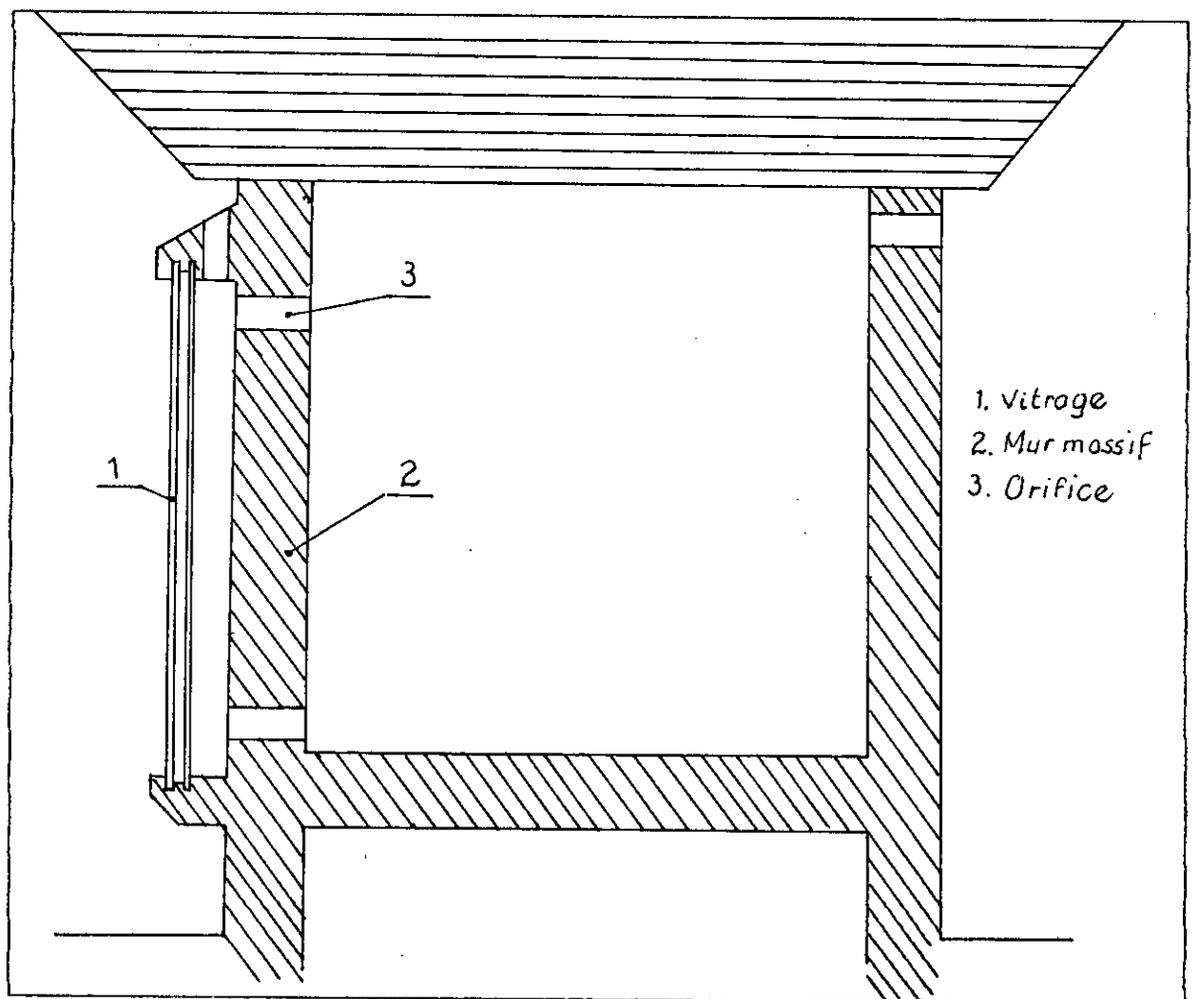


Fig. (II.1): Maison solaire

## II.1- MAISONS SOLAIRES :

### II.1.1- Captage du rayonnement solaire :

**Principe:** Le système de captage a pour base l'effet de serre bien connu. Le rayonnement est capté dans le domaine de longueurs d'ondes comprises entre 0.3 et 3  $\mu\text{m}$  (c'est à dire dans le visible et le proche infra rouge), il traverse le verre classique et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante.

L'idéal pour l'absorption est le corps noir utopique des physiciens, mais la plupart des surfaces relativement sombre et non réfléchissantes, donnent un excellent rendement.

La surface réceptrice chauffée émet du rayonnement thermique dans un domaine de longueurs d'ondes très différent du premier : ente 4 et 30  $\mu\text{m}$  c'est à dire dans un infrarouge relativement éloigné du rayonnement visible. Ce rayonnement est en effet totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne, par moitié environ, vers la surface et par moitié vers l'extérieur.

Si l'on interpose un second vitrage la localisation du rayonnement apporté sur la surface réceptrice sera meilleur.

L'analyse poussée du phénomène montre que l'on a pas intérêt à mettre plus de deux vitres au devant de la surface réceptrice.

**STOCKAGE:** Les calories apportées par le soleil sont donc enfermées entre la surface réceptrice et les parois du verre. Il est bien évident que si l'on place un tel système sur un toit l'air chaud enfermé dans la serre, plus léger que l'air de l'habitation, devra être extrait mécaniquement et envoyé vers les pièces à chauffer. Mais il présente le défaut de cesser de fonctionner dès que l'énergie nécessaire pour l'extraction de l'air chaud n'est plus disponible. Pour pallier à cet inconvénient le dispositif adopté par les chercheurs comporte l'implantation des serres sur les façades verticales. On a alors une possibilité d'une circulation permanente de l'air chaud derrière le vitrage, si des ouvertures convenablement placées lui permettent de passer en arrière de la surface réceptrice.

Les rayons solaires traversent le vitrage et sont absorbés par la surface réceptrice, qui est une surface d'un mur massif ou d'une réserve d'eau présentant une certaine inertie thermique. L'air chauffé derrière la serre constitue une colonne de densité plus faible que celle de l'air de la pièce à chauffer située en arrière. Il en résulte une circulation permanente tant que l'air de la serre est plus chaud que l'air de la pièce. Lorsque cela n'est pas le cas on a intérêt à obturer les ouvertures pour éviter une circulation inverse.

Un tel système fonctionne sans aucune intervention mécanique et peut continuer à fonctionner relativement longtemps après le coucher du soleil, grâce un stockage partiel des calories reçues.

Dans une habitation individuelle, la surface chauffée est en général un mur de béton qui présente une inertie thermique importante pour stocker les calories reçues, qui vont servir à entretenir une thermocirculation bien après le coucher du soleil.

Dans le cas d'un mur en béton, le système accumulateur ne coûte pratiquement rien car il est amorti dans la construction par son rôle de mur porteur.

Dans le cas de constructions légères, métalliques par exemple, réalisées sans intervention de béton, le stockage des calories peut-être fait sur des masses d'eau contenues dans des réservoirs métalliques. Il est possible aussi d'utiliser les solutions saturées de sels, par exemple, le sel de Glauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4, 10 \text{ H}_2\text{O}$ ) qui lors de sa fusion à 32-38 °c, absorbe les calories qu'il restituera lorsque la température s'abaissera.

### II.1.2- Choix des surfaces verticales :

Sans négliger l'utilisation des toitures dans des cas particuliers et notamment pour la production d'eau chaude sanitaire, les serres verticales ou proches de la verticale sont les plus intéressantes du point de vue énergétique comme elles présentent un grand nombre d'avantages :

- 1- Elles sont beaucoup moins coûteuses que celles installées à la toiture, car la face réceptrice qui est la face externe du mur n'intervient plus dans le calcul du prix de revient.

- 2- Elles permettent un captage simple, la circulation de l'air chaud se fait naturellement vers l'extérieur de l'habitat sans intervention de ventilateurs ou d'aspirateurs électriques. Cela contribue également à abaisser le prix de revient de l'installation.
- 3- Elles permettent de s'affranchir presque totalement des problèmes d'étanchéité aux intempéries.
- 4- Elles sont mieux adaptées aux immeubles à plusieurs étages que les collecteurs de toitures.

### II.1.3- Ventilation naturelle :

A certaines heures ou dans certaines périodes, les calories captées représentent une surchauffe inutile des habitations et des locaux, alors on peut les exploiter pour ventiler les locaux. La figure ci dessous représente le circuit de ventilation :

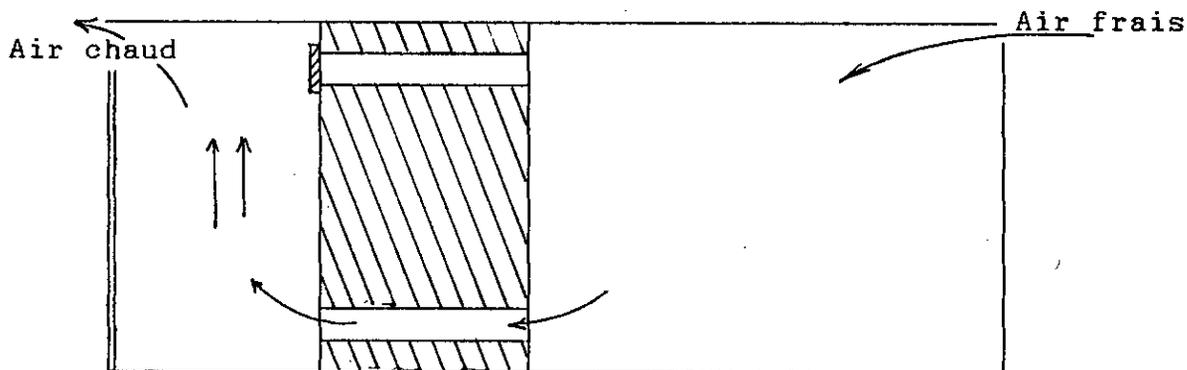


Fig.(II.2)

la façade sert d'aspirateur et l'air est expulsé en haut de la serre, il se crée dans l'habitation une dépression qui provoque l'admission de l'air froid venant de l'autre façade.

### II.1.4- Aspect économique :

Le chauffage solaire permet d'améliorer considérablement le climat interne des habitations. Mais si l'on veut obtenir à toutes les heures une température pratiquement constante, il est nécessaire de disposer d'un

chauffage d'appoint. Le chauffage électrique au fil de l'eau ou pondéré, utilisé surtout en heures creuses est le complément idéal du chauffage solaire.

Des travaux ont montré que le chauffage solaire constitue entre les 2/3 et les 3/4 de la fourniture totale en calories et le prix de revient du (KWh) solaire est deux ou trois fois moins cher que le (KWh) électrique.

Bien qu'on ne peut pas s'en passer d'utiliser les formes d'énergie classiques, l'énergie solaire contribue néanmoins à d'importantes économies d'énergie en matière de chauffage domestique.

## II.2- SYSTEMES A ETUDIER

En se basant sur les concepts exposés au paragraphe (II.1) plusieurs systèmes sont conçus. Les composants qui entrent dans leur fabrication sont généralement : un mur massif, un vitrage et une contre-cloison isolante.

Dans l'étude présente, les composants utilisés sont les suivants:

1- **Mur massif:** il est en béton et ayant les propriétés physiques suivantes:

- conductibilité thermique :  $\lambda = 1.75 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$
- masse volumique :  $\rho = 2400 \text{ Kg/m}^3$
- capacité calorifique :  $C_p = 880 \text{ J/Kg.}^\circ\text{K}$

2- **Contre-cloison isolante:** c'est une mousse de polyuréthane ayant les propriétés :

- conductibilité thermique :  $\lambda = 0.03 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$
- masse volumique :  $\rho = 34 \text{ Kg/m}^3$ .
- capacité calorifique :  $C_p = 850 \text{ J/Kg.}^\circ\text{K}$

Cette contre-cloison isolante est munie à son bas et à son haut de deux orifices qui permettent une circulation naturelle de l'air.

3- **Vitrage:** On utilisera soit une plaque de polycarbonates alvéolaire ( $\lambda_g = 0.06 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$ ), soit une plaque de verre translucide ( $\lambda_g = 1 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$ ).

Les systèmes étudiés sont présentés dans la partie qui suit selon un ordre croissant de perfectionnement.

### II.2.1- Mur massif avec simple vitrage:

Il est constitué d'un mur massif dont la face extérieure est peinte en noir pour absorber le rayonnement pénétrant par le vitrage unique qui joue le rôle de serre thermique.

Dans ce système, le transfert de chaleur vers l'intérieur du bâtiment se fait par conduction à travers le mur. Ce dernier permet, grâce à son inertie thermique importante de stocker la chaleur et de la transférer vers l'intérieur du bâtiment, même après le coucher du soleil.

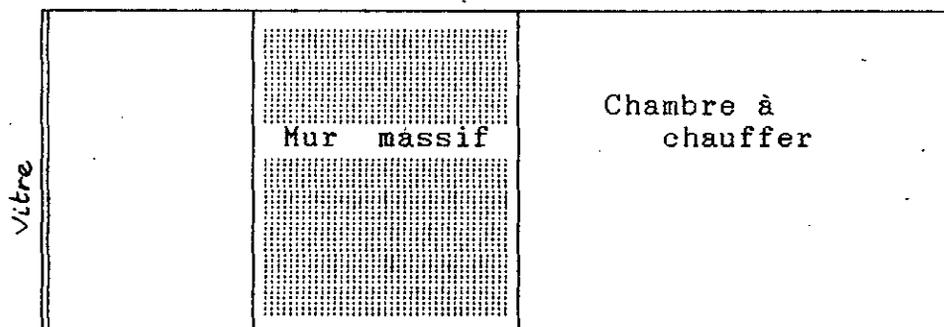


Fig.(II.3)

### II.2.2- Mur massif avec double vitrage :

Il est constitué d'un mur massif en béton et d'un double vitrage; ce système est une forme élaborée du premier. Le but du deuxième vitrage est de renforcer l'effet de serre.

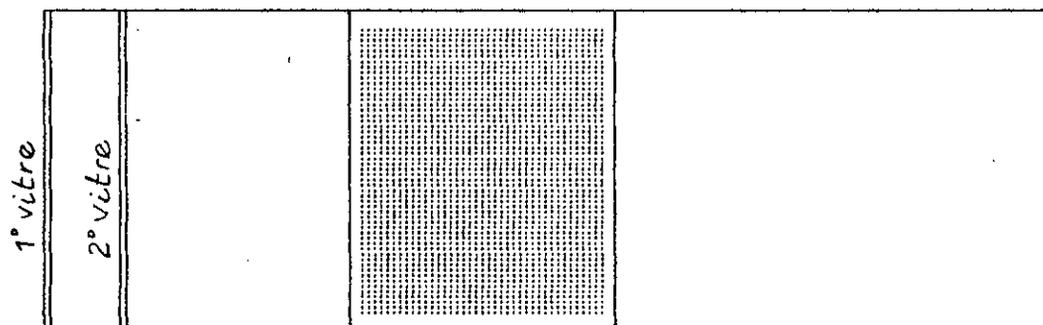


Fig.(II.4): Mur Trombe

### II.2.3- Mur massif à double vitrage et avec thermocirculation :

Ce système est presque identique au précédent, sauf que le mur est muni de deux orifices: l'un en bas l'autre en haut.

Le transfert de chaleur vers l'intérieur du bâtiment se fait par deux chemins parallèles: le premier par conduction à travers le mur et le deuxième par transport et convection à travers les orifices. Le transfert se poursuit même après le coucher du soleil à cause de l'inertie thermique du mur. Cette inertie assure en même temps le stockage de l'énergie quand celle-ci est abondante et sa restitution à l'intérieur quand le bâtiment en a besoin.

La fermeture des orifices pendant les périodes froides, surtout la nuit, limite les pertes de chaleur. Les seules pertes alors sont dues à la conduction à travers le mur, qui peuvent être minimisées par une garniture isolante de la face intérieure du mur.

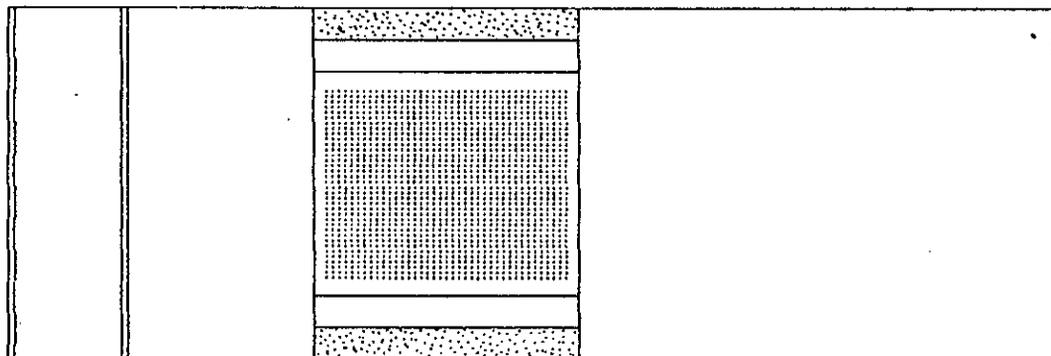


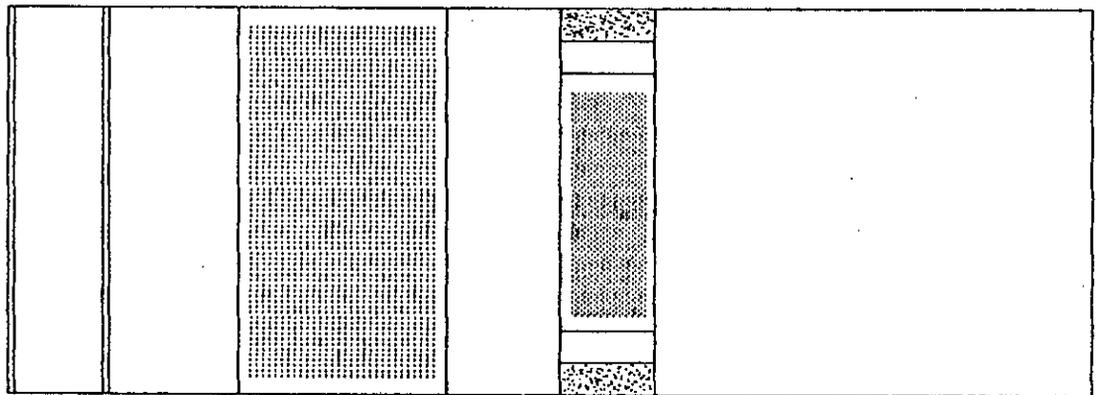
Fig.(II.5): Mur Trombe avec thermocirculation

### II.2.4- Mur massif à double vitrage et à isolation interne:

Ce système est constitué, en plus des deux vitres et du mur massif, d'un autre mur qui joue le rôle d'un isolant thermique. Ce dernier est muni de deux orifices qui forment un circuit de thermocirculation de la chaleur vers l'intérieur du

bâtiment par convection et conduction. Pendant les périodes froide (la nuit) les orifices sont fermés, le mur présente alors une bonne isolation.

Ce système est appelé: **mur Trombe composite**, qui par sa structure, semble s'adapter mieux aux climats froids.



*Fig.(II.6): Mur Trombe composite*

Notre étude se limitera à calculer théoriquement l'énergie transférée vers l'intérieur du bâtiment, ainsi que la température de la face interne du dernier mur et ce, pour tous les systèmes présentés ci-dessus. Les résultats obtenus permettront de voir, d'une part, l'effet des paramètres géométriques de l'installation sur les performances thermiques et de dresser un bilan comparatif entre les divers systèmes étudiés.

# CHAPITRE III

## MODELISATION MATHEMATIQUE

L'analyse théorique qui sera développée dans ce chapitre nous permettra de déterminer les échanges de chaleur radiatifs, convectifs, ainsi que les performances thermiques de différents systèmes qui nous intéressent. Ce qui nous conduira à déterminer les températures des différents points des composants et le calcul de l'énergie dans le bâtiment, considéré à température constante.

Pour simplifier cette analyse, nous avons tenu compte des hypothèses suivantes:

- 1- Le transfert de chaleur est unidimensionnel, seulement le gradient de température suivant la direction X est considéré.
- 2- Le transfert de chaleur à travers les vitrages et la contre-cloison isolante est considéré comme stationnaire, étant donné leurs faibles épaisseurs.
- 3- Le transfert de chaleur par conduction à travers le mur massif est étudié en régime transitoire.
- 4- les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés sont indépendantes de la température.
- 5- les surfaces sont considérées comme des corps gris.
- 6- La température intérieure du bâtiment est constante ( $T_i=18^\circ\text{C}$ ).
- 7- L'air ne participe pas dans les échanges de chaleur radiatifs.
- 8- Les systèmes considérés sont supposés parfaitement isolés, donc pas de pertes latérales.

Avec ces simplifications, le transfert de chaleur à travers les composants sera traité en plusieurs étapes.

Pour faciliter la compréhension de cette analyse, nous traitons chaque système indépendamment des autres.

## III.1- RADIATION SOLAIRE:

On suppose que les composantes: globale ( $I_t$ ) et diffuse ( $I_d$ ) du flux solaire pour une surface horizontale sont mesurées et connues. Le flux solaire direct, le diffus et la composante réfléchiée par le sol sur une surface vitrée verticale sont [4]

$$G_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \cdot (I_t - I_d) \quad (\text{III.1.a})$$

$$G_d = 0.5 I_d \quad (\text{III.1.b})$$

$$G_{gr} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{gr} \cdot I_t \quad (\text{III.1.c})$$

$\theta$  : Angle d'incidence des rayons solaires sur la paroi verticale.

$\theta_z$  : Angle d'incidence des rayons solaires sur un plan horizontal.

$\rho_{gr}$  : Albédo du sol.

Le flux solaire sur cette surface est:

$$G_t = G_b + G_d + G_{gr} \quad (\text{III.2})$$

La fraction de ce flux absorbé est de:

$$S_i = \alpha_i \cdot G_i \quad (i=1,2) \quad (\text{III.3})$$

Où ( $\alpha_i$ ) est un coefficient effectif d'absorption [5].

Le flux solaire net transmis par les deux vitrages et absorbé par la face extérieure du premier milieu est donné par: (Cf. annexe I).

$$S_1 = \alpha_1 \cdot \tau \cdot G_t \quad (\text{III.4})$$

$\tau$  : est un coefficient effectif de transmission des vitrages considérés comme un système unique [5].

$\alpha_1$  : coefficient d'absorption de la face externe du premier milieu.

III.2- BILANS THERMIQUES :

\* Cas d'un mur massif avec un simple vitrage :

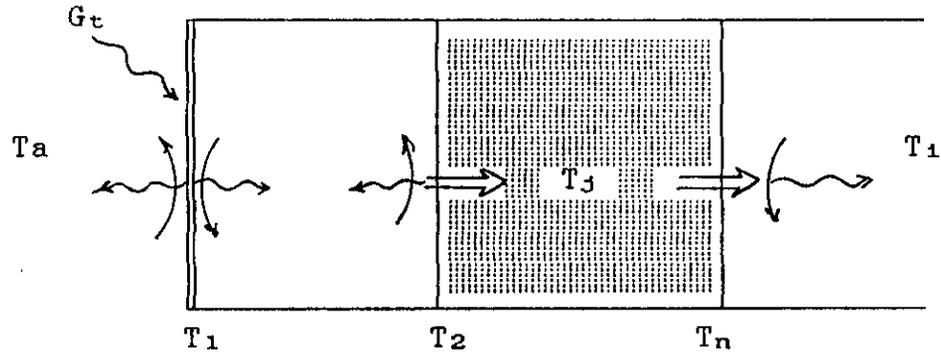


Fig. (III.1): Les différents modes d'échange de chaleur dans le cas d'un mur avec simple vitrage.

Par convention et pour tous les systèmes :

- $\Rightarrow$  : Conduction.
- $\curvearrowright$  : Convection.
- $\rightsquigarrow$  : Rayonnement.

- Pour la vitre :

Le bilan thermique au niveau de la vitre est la résultante des échanges radiatifs et convectifs de la vitre avec le milieu extérieur et le mur massif.

Si on considère que l'émissivité du ciel vaut 1, l'équation du bilan thermique sera :

$$\alpha_1 G_t + h_{12} (T_2 - T_1) + \sigma F e_{12} (T_2^4 - T_1^4) = h_v (T_1 - T_a) + \frac{1}{2} \sigma \epsilon_1 (2T_1^4 - T_s^4 - T_{gr}^4) \quad (III.5)$$

La température ( $T_s$ ) est la température équivalente du ciel. Pour simplifier les calculs, on peut supposer :  $T_s = T_{gr} = T_a$  de sorte que (III.5) devient :

$$\alpha_1 G_t + h_{12} (T_2 - T_1) + \sigma F e_{12} (T_2^4 - T_1^4) = h_v (T_1 - T_a) + \sigma \epsilon_1 (T_1^4 - T_a^4) \quad (III.6)$$

- Au niveau du mur massif:

Le transfert de chaleur à travers le mur massif est gouverné par l'équation de la conduction au régime transitoire:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.7})$$

où :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad \text{et} \quad 0 \leq x \leq L$$

- Conditions aux limites :

Les conditions aux limites sont obtenues à partir des équations d'équilibre d'énergie :

pour  $x=0$  :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_3 \tau_1 G_t - h_{12} (T_2 - T_1) - \sigma F e_{12} (T_2^4 - T_1^4) \quad (\text{III.8})$$

pour  $x=L$  :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_{n1} (T_n - T_1) + \sigma \sum_{k=1}^5 F_{nk} F e_{nk} (T_n^4 - T_k^4) \quad (\text{III.9})$$

\* Cas d'un mur massif avec double vitrage :

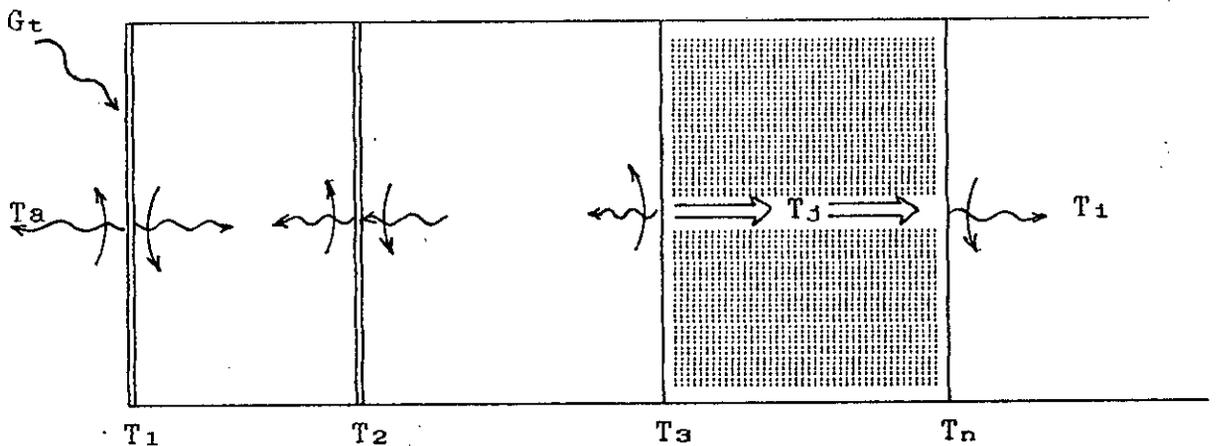


Fig. (III.2) : Les différents modes d'échange de chaleur pour le cas d'un mur à double vitrage.

L'équation d'équilibre de la première vitre et celle du mur massif restent les mêmes.

Pour la deuxième vitre, on a l'équation suivante :

$$\alpha_2 \tau_1 G_t + h_{23} (T_3 - T_2) + \sigma F e_{23} (T_3^4 - T_2^4) = h_{12} (T_2 - T_1) + \sigma F e_{12} (T_2^4 - T_1^4) \quad (\text{III.10})$$

- Conditions aux limites :

Pour les conditions aux limites, seulement l'équation d'équilibre pour  $x=0$  change :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_3 \tau_1 \tau_2 G_t - h_{23} (T_3 - T_2) - \sigma F \epsilon_{23} (T_3^4 - T_2^4) \quad (\text{III.11})$$

- Cas d'un mur massif à double vitrage avec thermocirculation :

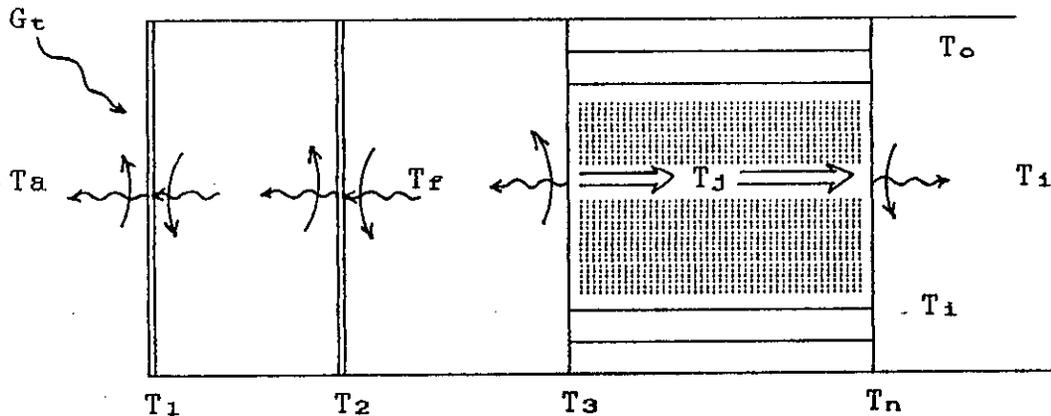


Fig.(III.3): Les différents modes d'échange de chaleur dans le cas de la thermocirculation.

Les équations d'équilibre de la première vitre et du mur massif restent toujours les mêmes.

Pour la deuxième vitre, deux cas peuvent se présenter: orifices ouverts ou fermés.

Si les orifices sont ouverts, on aura l'équation suivante:

$$\alpha_2 \tau_1 G_t + h_{r2} (T_2 - T_f) + \sigma F \epsilon_{23} (T_3^4 - T_2^4) = h_{12} (T_2 - T_1) + \sigma F \epsilon_{12} (T_2^4 - T_1^4) \quad (\text{III.12})$$

Si les orifices sont fermés, l'équation d'équilibre reste la même que celle du deuxième système(III.10).

- Conditions aux limites :

En ce qui concerne les conditions aux limites, seulement la condition pour  $x=0$  change avec les orifices ouverts :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_3 \tau_1 \tau_2 G_t - h_{f2} (T_3 - T_f) - \sigma F \epsilon_{23} (T_3^4 - T_2^4) \quad (\text{III.13})$$

Si les orifices sont fermés, l'équation (III.11) restera la même.

**- Thermocirculation à travers la cheminée :**

La thermocirculation à travers la cheminée se produit quand la température moyenne dans la cheminée ( $T_f$ ) est supérieure à la température intérieure de la chambre ( $T_1$ ), sinon on aura une thermocirculation inverse, c.à.d dans le sens contraire au sens indiqué dans la figure (III.3).

Le flux de chaleur transféré vers l'air est :

$$q_c = \dot{m} c_f (T_0 - T_1) / A_v = h_{f2} (T_2 - T_f) + h_{f3} (T_3 - T_f) \quad (\text{III.14})$$

Pour déterminer la température ( $T_0$ ) de l'air entrant dans la chambre, le débit massique de l'air ( $\dot{m}$ ) doit être déterminé le premier. En supposant que la température de l'air à travers la cheminée varie linéairement, et que les pertes par frottement dues à l'écoulement de l'air se produisent uniquement dans les orifices, le débit ( $\dot{m}$ ) est déterminé par [6] :

$$\dot{m} = C_d A_v \rho_f \sqrt{gH' \frac{(T_0 - T_1)}{(T_0 + T_1)}} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$$T_f = \frac{(T_0 + T_1)}{2} \quad (\text{III.16})$$

**\* Cas d'un mur massif à double vitrage avec isolation interne:**

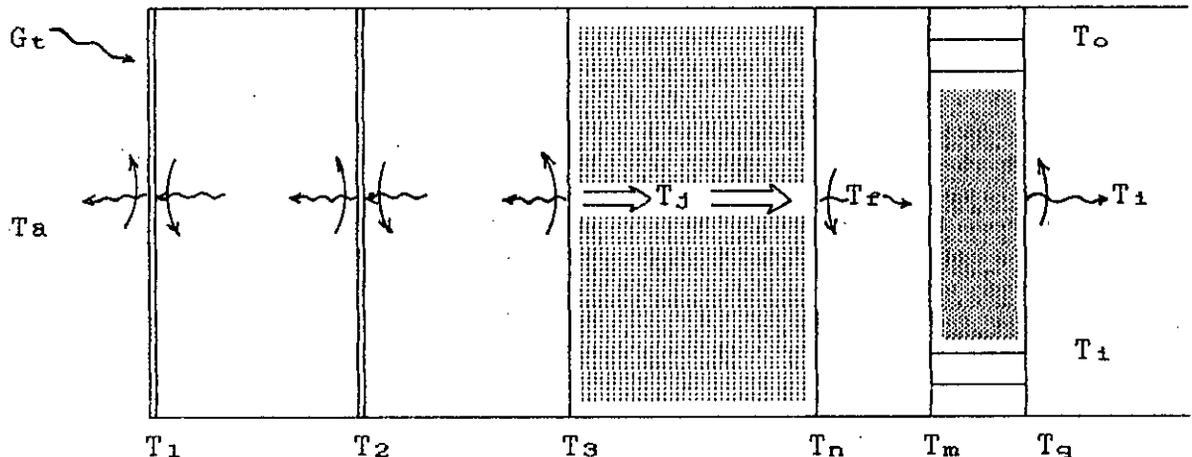


Fig.(III 4): Les différents modes d'échange de chaleur.

Les équations d'équilibre des deux vitres et celle du mur massif restent les mêmes que celle du deuxième système.

- Conditions aux limites :

Pour  $x = 0$ , on a la même équation que celle du deuxième système (équation III.11).

Pour  $x = L$ , deux cas peuvent se présenter :

- Si les orifices sont ouverts :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_{nf}(T_n - T_f) + \sigma F e_{nm}(T_n^A - T_m^A) \quad (\text{III.15})$$

- Si les orifices sont fermés alors :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_{nm}(T_n - T_m) + \sigma F e_{nm}(T_n^A - T_m^A) \quad (\text{III.16})$$

- Contre-cloison isolante :

L'équation d'équilibre pour la surface de la contre-cloison isolante vers la cheminée est déterminée pour deux cas :

a) orifices ouverts :

$$\frac{\lambda_i}{d_i}(T_m - T_q) + h_{mf}(T_m - T_f) = \sigma F e_{nm}(T_n^A - T_m^A) \quad (\text{III.17})$$

b) orifices fermés :

$$\frac{\lambda_i}{d_i}(T_m - T_n) - h_{mn}(T_m - T_n) = \sigma F e_{nm}(T_n^A - T_m^A) \quad (\text{III.18})$$

L'équation d'équilibre pour la surface qui est vers la chambre est :

$$\frac{\lambda_i}{d_i}(T_m - T_q) = h_{qf}(T_q - T_f) + \sigma \sum_{k=0}^5 F_{\alpha k} F e_{\alpha k}(T_q^A - T_k^A) \quad (\text{III.19})$$

- Thermocirculation à travers la cheminée :

Le flux de chaleur transféré vers l'air est :

$$q_c = \dot{m} C_f (T_0 - T_f) / A_v = h_{ra} (T_r - T_f) + h_{rm} (T_m - T_f) \quad (\text{III.20})$$

Avec les mêmes équations pour le débit ( $\dot{m}$ ) est la température  $T_f$  (équation III.15 et III.16).

### III.3- CALCUL DES COEFFICIENTS D'ÉCHANGE:

#### III.3.1- Coefficient d'échange ( $h_w$ ) avec le milieu extérieur:

Pour la vitre exposée au milieu extérieur, on considère une convection forcée en fonction de la vitesse du vent. De nombreuses corrélations sont proposées pour le calcul de ce coefficient, on opte pour la formule donnée dans [4]:

$$h_w = 5,7 + 3,8 \cdot V \quad (\text{III.21})$$

où:

$V$ : est la vitesse du vent en [m/s],

$h_w$ : coefficient de convection du vent en [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ ].

#### III.3.2- Coefficient d'échange convectif ( $h_{12}$ ) entre deux surfaces verticales parallèles:

Le nombre de Nusselt est obtenu pour le maximum d'une des trois corrélations suivantes [7]:

$$Nu = \text{Max} \left\{ 1; 0,288 \left( \sin\theta \left( \frac{d}{h} \right) \cdot Ra \right)^{0,25}; 0,039 (\sin\theta \cdot Ra)^{0,33} \right\} \quad (\text{III.22})$$

$\theta$ : est l'inclinaison des surfaces par rapport à l'horizontale.

L'expression du Nusselt est ici:

$$Nu = h_{conv} d / \lambda_f \quad (\text{III.23})$$

La conductivité de l'air est calculé à la température moyenne des deux surfaces.

d'où le coefficient d'échange:

$$h_{conv} = Nu \cdot \lambda_f / d \quad (\text{III.24})$$

d: distance entre les deux surfaces,

h: hauteur des deux surfaces.

### III.3.3 Coefficient d'échange convectif entre une paroi verticale et un fluide en mouvement:

Si le fluide ( qui est l'air ) est en mouvement sous l'effet de la gravité, on utilise les corrélations proposées dans l'article [8]. Pour cela, on détermine d'abord le nombre de Rayleigh:

$$Ra_h = Pr \cdot Gr \quad (\text{III.25})$$

où:

$$Pr = \frac{\mu_f \cdot C_f}{\lambda_f}$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (\Delta T) \cdot h^3}{\lambda_f^2}$$

avec  $\beta = 1/T_{mf}$  est le coefficient de dilatation volumique de l'air.

Puis on déduit le nombre de Nusselt:

-Si  $Ra_h < 10^9$  :

$$Nu = 0,68 + 0,67 \cdot Ra_h^{0,25} (1 + 0,67 \cdot Pr^{-0,65})^{-0,44} \quad (\text{III.26})$$

-Si  $Ra_h > 10^9$  :

$$\sqrt{Nu} = 0,825 + 0,387 \cdot Ra_h^{0,17} (1 + 0,37 \cdot Pr^{-0,56})^{-0,3} \quad (\text{III.27})$$

Le coefficient  $h_{fp}$  est:

$$h_{fp} = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{h} \quad (\text{III.28})$$

### III.3.4 Coefficient d'échange convectif entre une paroi verticale et l'air d'un grand espace $h_{conv}$ :

Pour le calcul de  $h_{conv}$  on utilise les corrélations suivantes [9]:

-Si  $10^4 < Ra_h < 10^9$  :

$$Nu = 0,59 \cdot Ra_h^{0,25} \quad (III.29)$$

-Si  $10^9 < Ra_h < 10^{12}$  :

$$Nu = 0,11 \cdot Ra_h^{0,33} \quad (III.30)$$

Le coefficient  $h_{conv}$  est tel que:

$$h_{conv} = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{h} \quad (III.31)$$

### III.3.5 Facteurs d'émissivité et facteurs de forme:

Pour deux surfaces parallèles (i) et (j), le facteur d'émissivité est donné par:

$$Fe_{ij} = \left[ \frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_j} - 1 \right]^{-1} \quad (III.32)$$

Si les deux surfaces sont perpendiculaires:

$$Fe_{ij} = \epsilon_i \cdot \epsilon_j \quad (III.33)$$

Contrairement au facteur d'émissivité qui dépend des propriétés radiatives des matériaux, le facteur de forme est purement géométrique [3]

### III.4 CALCUL DU FLUX UTILE

Le flux utile est défini comme étant la quantité de chaleur absorbée par l'air résiduel du bâtiment pour maintenir certaines conditions de confort. S'il y a thermocirculation de l'air, cette quantité proviendra par deux chemins parallèles : l'un par l'orifice du haut, l'autre par la face interne du dernier mur. Elle est donnée par :

$$q_u = q_c + h_{conv} \cdot (T_q - T_l) + \sigma \cdot \sum_{k=1}^5 f_{qk} \cdot Fe_{qk} \cdot (T_q^A - T_k^A) \quad (\text{III.34})$$

où  $T_q$  est la température de la face interne du dernier mur, et  $q_c$  le flux de la chaleur véhiculé par l'air.

S'il n'y a pas de thermocirculation, on a simplement :

$$q_u = h_{conv} (T_q - T_l) + \sigma \sum_{k=1}^5 F_{qk} Fe_{qk} (T_q^A - T_k^A) \quad (\text{III.35})$$

# CHAPITRE IV

## RESOLUTION NUMERIQUE

Dans ce chapitre nous essayerons de résoudre numériquement les équations développées au chapitre précédent. Nous commençons d'abord par la linéarisation des équations puis leur discrétisation et enfin le choix d'une méthode de résolution numérique adéquate qui sera détaillée sur un organigramme.

Compte tenu de la complexité de ces équations, nous avons posé quelques hypothèses simplificatrices. Le choix des hypothèses est imposé par des raisons objectives et réalistes. D'abord parceque dans la formulation des équations on a omis les échanges thermiques à travers les murs de l'enceinte à chauffer, en supposant que ces échanges permettent de garder sa température constante indépendamment de toute influence. Ensuite nous avons considéré les composantes du climat extérieur formées de deux seulement: la température ambiante ( $T_a$ ) et le flux total ( $G_t$ ).

Ces hypothèses sont :

- 1- La température ambiante du ciel ( $T_a$ ) et celle du sol ( $T_{gr}$ ) sont égales à la température ambiante ( $T_a$ ) de l'extérieur du bâtiment.
- 2- Les températures ( $T_k$ ) des surfaces intérieures des murs de l'enceinte (chambre) chauffée sont égales à la température intérieure ( $T_i$ ).
- 3- Les dimensions de la pièce chauffée sont considérées constantes et donc les coefficients d'influence mutuelles des faces de ses murs ( $F_k$ ) sont également constants.

## IV.1 DISCRETISATION ET LINEARISATION DES EQUATIONS :

## IV.1.1 discrétisation de l'équation de la chaleur :

Nous avons montré que la conduction dans le mur est régie par l'équation différentielle (III.7):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

En faisant un développement limité de (III.7) et en ne prenant que les deux premiers termes, on obtient le laplacien exprimé en fonction des différences finies à partir des valeurs inconnues  $T^{j+1}$  de la température au temps  $(j+1)$ , d'où :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^{j+1} + T_{i-1}^{j+1} - 2T_i^{j+1}}{(\Delta x)^2} \quad (i=2, n-1) \quad (\text{IV.1})$$

où  $(n)$  est le nombre de noeuds de discrétisation de l'épaisseur  $(L)$  du mur avec :

$$\Delta x = \frac{L}{n-1}$$

le terme droit de l'équation (III.7) peut s'écrire :

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{a} \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} \quad (\text{IV.2})$$

On aura ainsi pour les noeuds internes du mur, l'équation suivante :

$$\frac{T_{i+1}^{j+1} + T_{i-1}^{j+1} - 2T_i^j}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{a} \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} \quad (\text{IV.3})$$

Soit sous la forme récurrente :

$$(1+2F_o) T_i^{j+1} - F_o (T_{i+1}^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}) = T_i^j \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$$F_o = \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta X)^2}$$

$F_o$  : appelé nombre de Fourier.

D'une façon générale, il est possible d'exprimer le Laplacien par une combinaison de deux termes : l'un calculé à partir des valeurs au temps (j), l'autre à partir des valeurs relatives au temps (j+1). Pour un noeud interne, on obtient alors l'équation aux différences finies suivante :

$$\frac{\alpha (T_{i+1}^j + T_{i-1}^j - 2T_i^j) + (1-\alpha) (T_{i+1}^{j+1} + T_{i-1}^{j+1} - 2T_i^{j+1})}{(\Delta X)^2} = \frac{1}{a} \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} \quad (\text{IV.5})$$

dans laquelle ( $\alpha$ ) est un coefficient compris entre 0 et 1. C'est la méthode de CRANK-NICOLSON (lorsque  $\alpha = 0.5$ ) que nous avons choisie pour résoudre numériquement les équations précédentes relatives aux noeuds internes du mur massif.

L'équation devient après arrangement :

$$(1+F_o) T_i^{j+1} - \frac{1}{2} F_o (T_{i+1}^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}) = (1-F_o) T_i^j + \frac{1}{2} F_o (T_{i+1}^j + T_{i-1}^j) \quad (\text{IV.6})$$

Elle présente une forme récurrente d'ordre (3) dont l'avantage est la forme linéaire.

#### IV.1.2- Linéarisation des équations :

Dans les bilans énergétiques déjà établis, nous avons introduit des termes d'énergie rayonnée, exprimés sous la forme connue de :

$$W_{r,j} = \sigma F_{e,j} (T_i^4 - T_j^4)$$

et qu'on peut développer sous la forme :

$$Wr_{1j} = \sigma F e_{1j} (T_i - T_j) (T_i + T_j) (T_i^2 + T_j^2)$$

ce qui permet d'introduire la notion de coefficient de radiation, défini par :

$$hr_{1j} = \sigma F e_{1j} (T_i + T_j) (T_i^2 + T_j^2) \quad (IV.7)$$

Ainsi l'équation d'énergie précédente se met sous la forme :

$$W_r = hr_{1j} (T_i - T_j)$$

Dans toutes les équations rencontrées dans notre étude, les deux opérations de discrétisation et de linéarisation introduites sur (IV.6) et (IV.7) respectivement, sont répétées autant de fois que les mêmes considérations se présentent. De cette façon il est donc possible de traiter, cas par cas, les différentes situations (systèmes) étudiées.

**\* Mur massif avec simple vitrage :**

La linéarisation de l'équation (III.6) donne :

$$\alpha_1 G_t + h_2 (T_2 - T_1) + hr_{12} (T_2 - T_1) = h_o (T_1 - T_a) + hr_o (T_1 - T_a) \quad (IV.8)$$

Avec les coefficients radiatifs :

$$hr_{12} = \sigma F e_{12} (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)$$

$$hr_o = \sigma \cdot \epsilon_1 (T_1 + T_a) (T_1^2 + T_a^2)$$

Quant aux conditions aux limites, l'équation (III.8) devient après discrétisation et linéarisation :

$$\begin{aligned} [1 + 2F_o(1 + Bi_{12} + Bir_{12})] T_2^{j+1} - 2F_o(Bi_{12} + Bir_{12}) T_1^{j+1} - 2F_o T_3^{j+1} = \\ T_2^j + 2F_o \frac{\Delta X}{\lambda} \alpha_2 \tau_1 G_t \end{aligned} \quad (IV.9)$$

Avec :

$$Bi_{12} = \frac{h_{12} \Delta X}{\lambda}$$

$$Bir_{12} = \frac{hr_{12} \Delta X}{\lambda}$$

Bi : appelé nombre de BIOT.

L'équation (III.9) devient après linéarisation et discrétisation :

$$[1 + 2F_0(1 + Bi_{ni} + Bir_{nk})] T_n^{j+1} - 2F_0 T_{n-1}^{j+1} = T_n^j + 2F_0(Bi_{ni} + Bir_{nk}) T_i \quad (IV.10)$$

Avec :

$$Bi_{ni} = \frac{h_{ni} \cdot \Delta X}{\lambda}$$

$$Bir_{nk} = \frac{hr_{ni} \cdot \Delta X}{\lambda}$$

\* Mur massif avec double vitrage :

En introduisant les coefficients radiatifs dans l'équation d'équilibre de la deuxième vitre (III.10), on aura :

$$\alpha_2 \cdot \tau_1 \cdot G_c + h_{23}(T_3 - T_2) + hr_{23}(T_3 - T_2) = h_{12}(T_2 - T_1) + hr_{12}(T_2 - T_1) \quad (IV.11)$$

Avec :

$$hr_{23} = \sigma \cdot Fe_{23} \cdot (T_2 + T_3) (T_2^2 + T_3^2)$$

Pour les conditions aux limites, on aura après discrétisation et linéarisation :

$$[1 + 2F_0(1 + Bi_{23} + Bir_{23})] T_3^{j+1} - 2F_0(Bi_{23} + Bir_{23}) T_2^{j+1} - 2F_0 T_4^{j+1} = T_3^j + 2F_0 \left( \frac{\Delta X}{\lambda} \right) \alpha_3 \tau_1 \tau_2 G_c \quad (IV.12)$$

Avec :

$$Bi_{23} = \frac{h_{23} \cdot \Delta X}{\lambda}$$

Le reste des équations est déjà linéarisé dans le cas précédent.

**\* Mur massif à double vitrage avec thermocirculation :**

Le premier vitrage est également régi par la même équation que celle des deux cas précédents, c'est l'équation (IV.8). Pour le deuxième vitrage l'équation (III.12) devient, après arrangement :

$$\alpha_2 \tau_1 G_c + h_{f2} (T_2 - T_f) + h_{r23} (T_3 - T_2) = (h_{12} + h_{r12}) (T_2 - T_1) \quad (IV.13)$$

Pour les conditions aux limites, l'équation (III.13) devient après discrétisation et linéarisation :

$$[1 + 2F_0(1 + Bi_{f3} + Bir_{23})] T_3^{j+1} - 2F_0 \cdot Bir_{23} \cdot T_2^{j+1} - 2F_0 \cdot T_4^{j+1} = T_3^j + 2F_0 \frac{\Delta X}{\lambda} \alpha_3 \tau_1 \tau_2 G_c + 2F_0 Bi_{f3} T_f \quad (IV.14)$$

avec :

$$Bi_{f3} = \frac{h_{f3} \cdot \Delta X}{\lambda}$$

Le reste des équations a été déjà vu dans le deuxième système.

**\* Mur massif à double vitrage et à isolation interne**

La linéarisation des équations qui ne sont pas les mêmes que celles qui ont été déjà vu dans les systèmes précédents sont :

- L'équation (III.16) qui devient après discrétisation :

$$[1 + 2F_0(Bi_{nf} + Bir_{nf})] T_n^{j+1} - 2F_0 T_{n-1}^{j+1} = T_n^j + 2F_0 Bi_{nf} T_f + 2F_0 Bir_{nm} T_m \quad (IV.15)$$

- L'équation (III.17) devient :

$$[1+2F_0(1+Bi_{nm}+Bir_{nm})] T_n^{j+1} - 2F_0 T_n^{j+1} = T_n^j + 2F_0 (Bi_{nm} + Bir_{nm}) T_m \quad (IV.16)$$

Avec :

$$Bi_{nf} = \frac{h_{nf} \cdot \Delta X}{\lambda}$$

$$Bi_{nm} = \frac{h_{nm} \cdot \Delta X}{\lambda}$$

$$Bir_{nm} = \frac{hr_{nm} \cdot \Delta X}{\lambda}$$

$$hr_{nm} = \sigma Fe_{nm} (T_n + T_m) (T_n^2 + T_m^2)$$

- L'équation (III.18) devient :

$$\frac{\lambda_i}{d_i} (T_m - T_q) + h_{nf} + (T_m - T_f) = hr_{nm} (T_n - T_m) \quad (IV.17)$$

- L'équation (III.19) :

$$\frac{\lambda_i}{d_i} (T_m - T_q) + h_{nm} (T_m - T_n) = hr_{nm} (T_n - T_m) \quad (IV.18)$$

- L'équation (III.20) :

$$\frac{\lambda_i}{d_i} (T_m - T_q) = h_{qd} (T_q - T_i) + hr_{qk} (T_q - T_k) \quad (IV.19)$$

Avec:

$$hr_{qk} = \sigma \sum_{k=1}^r F_{qk} Fe_{qk} (T_q + T_k) (T_q^2 + T_k^2)$$

Après avoir terminé la linéarisation et la discrétisation de toutes les équations, nous essayerons de les arranger pour chaque système, dans l'ordre qui permettra de les écrire sous forme matricielle.

Après avoir terminé la linéarisation et la discrétisation de toutes les équations, nous essayerons de les arranger pour chaque système, dans l'ordre qui permettra de les écrire sous forme matricielle.

#### IV.2- FORMULATION MATRICIELLE DES SYSTEMES D'EQUATIONS :

##### \* Mur massif à simple vitrage :

Le système d'équations de ce modèle est formé les équations suivantes :

$$\text{système I : } \begin{bmatrix} \text{IV.8} \\ \text{IV.9} \\ \text{IV.6} \\ \text{IV.10} \end{bmatrix}$$

Ce système peut s'écrire sous la forme matricielle :

$$[A_1] \{T\} = \{B_1\}$$

Avec :

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= h_w + h_{rw} + h_{12} + h_{r12} \\ a_{1,2} &= -(h_{12} + h_{r12}) \\ a_{2,1} &= -2Fo (B_{i12} + B_{ir12}) \\ a_{2,2} &= 1 + 2Fo (1 + B_{i12} + B_{ir12}) \\ a_{2,3} &= -2Fo \\ a_{i,i} &= 1 + Fo \quad (i=3, n-1) \\ a_{i,i-1} &= -1/2 Fo \\ a_{i,i+1} &= -1/2 Fo \\ a_{n,n-1} &= -2Fo \\ a_{n,n} &= 1 + 2Fo (1 + B_{in1} + B_{ir1n}) \end{aligned}$$

Les autres éléments de la matrice  $[A_1]$  sont nuls.

Les composantes du vecteur  $\{B_1\}$  sont :

\* Mur massif à double vitrage :

Le système d'équations relatif à ce cas est :

$$\text{systeme II : } \begin{cases} \text{IV.8} \\ \text{IV.11} \\ \text{IV.12} \\ \text{IV.9} \\ \text{IV.10} \end{cases}$$

qui s'écrit également en forme matricielle :

$$[A_2] \{T\} = \{B_2\}$$

les éléments de  $[A_2]$  sont pratiquement les mêmes de  $[A_1]$  avec la seule différence sur les éléments :

$$a_{32} = -2F_0 (B_{i23} + B_{i23})$$

$$a_{33} = 1 + 2F_0 (1 + B_{i23} + B_{i23})$$

$$a_{34} = -2F_0$$

$$a_{i,i} = 1 + F_0 \quad (i=4, n-1)$$

$$a_{i,i-1} = a_{i,i+1} = -0.5 F_0$$

Les éléments du vecteur  $\{B_2\}$  restent identiques à ceux du  $\{B_1\}$  sauf :

$$b_3 = T_3^j + 2F_0 \left( \frac{\Delta X}{\lambda} \right) a_3 \tau_1 \tau_2 G_t$$

$$b_2 = a_2 \tau_1 G_t$$

\* Mur massif à double vitrage avec thermocirculation :

Pour ce système on a deux cas :

- Si les orifices sont fermés, on aura le même système d'équations que celui du deuxième modèle
- Si les orifices sont ouverts, le système d'équations sera composé de :

$$\text{Système III : } \left[ \begin{array}{c} \text{IV.8} \\ \text{IV.13} \\ \text{IV.14} \\ \text{IV.18} \\ \text{IV.6} \\ \text{IV.10} \end{array} \right]$$

Matriciellement, ce système s'écrit :

$$[A_3] \{T\} = \{B_3\}$$

Les éléments de la matrice  $[A_3]$  sont semblables aux éléments de la matrice  $[A_2]$ , quelques éléments sont différents :

$$a_{2,2} = h_{12} + h_{r12} + h_{f2} + h_{r23}$$

$$a_{2,3} = -h_{r23}$$

$$a_{3,2} = -2F_0 B_{ir23}$$

$$a_{3,3} = 1 + 2F_0 (1 + B_{irf3} + B_{ir23})$$

le vecteur  $\{B_3\}$  a également les mêmes éléments que  $\{B_2\}$  sauf :

$$b_2 = a_2 \tau_1 G_t + h_{f2} \cdot T_f$$

$$b_3 = T_3^j + 2F_0 \left( \frac{\Delta x}{\lambda} \right) a_{x3} \tau_1 \tau_2 G_t + 2F_0 B_{if3} T_f$$

\* Mur massif à double vitrage avec isolation interne :

Les équations d'équilibres de ce système sont :

- Si les orifices sont ouverts :

$$\text{systeme IV : } \left[ \begin{array}{l} \text{IV.8} \\ \text{IV.11} \\ \text{IV.12} \\ \text{IV.6} \\ \text{IV.15} \\ \text{IV.17} \\ \text{IV.19} \end{array} \right]$$

- Si les orifices sont fermés :

$$\text{systeme IV : } \left[ \begin{array}{l} \text{IV.8} \\ \text{IV.11} \\ \text{IV.12} \\ \text{IV.6} \\ \text{IV.16} \\ \text{IV.18} \\ \text{IV.19} \end{array} \right]$$

Il est plus commode de représenter ces systèmes d'équations matriciellement :

$$[A_4] \{T\} = \{B_4\}$$

Les éléments de la matrice  $[A_4]$  sont en majorité ceux de  $[A_2]$ .  
Les seuls à être changés sont :

$$a_{n,n} = \begin{cases} 1 + 2F_0 (1 + Bi_{nf} + Bir_{nm}) & O. \text{ouverts} \\ 1 + 2F_0 (1 + Bi_{nm} + Bir_{nm}) & O. \text{fermés} \end{cases}$$

$$a_{n,n+1} = \begin{cases} -2F_0 (Bi_{nm} + Bir_{nm}) & O. F \\ -2 F_0 Bir_{nm} & O. O \end{cases}$$

$$a_{n+1,n} = \begin{cases} -hr_{nm} & O. O \\ -(hr_{nm} + h_{nm}) & O. F \end{cases}$$

$$a_{n+1,n+1} = \begin{cases} hr_{nm} + h_{mf} + \frac{\lambda_i}{d_i} & O. O \\ hr_{nm} + h_{mn} + \frac{\lambda_i}{d_i} & O. F \end{cases}$$

$$a_{n+1,n+2} = -\frac{\lambda_i}{d_i}$$

$$a_{n+2,n+1} = -\frac{\lambda_i}{d_i},$$

$$a_{n+2,n+2} = h_{qi} + hr_{qi} + \frac{\lambda_i}{d_i}$$

$$b_n = \begin{cases} T_n^j + 2F_0 \cdot Bi_{nf} \cdot T_f & O. O \\ T_n^j & O. F \end{cases}$$

$$b_{n+1} = \begin{cases} h_{mf} \cdot T_f & O. O \\ 0 & O. F \end{cases}$$

$$b_{n+2} = (h_{qi} + hr_{qi}) T_i$$

#### IV.3- CONSTRUCTION DU CODE INFORMATIQUE :

Pour simuler le comportement thermique des systèmes, on a conçu un programme informatique en langage FORTRAN 77, qui permet d'étudier les différents systèmes cités dans les chapitres précédents.

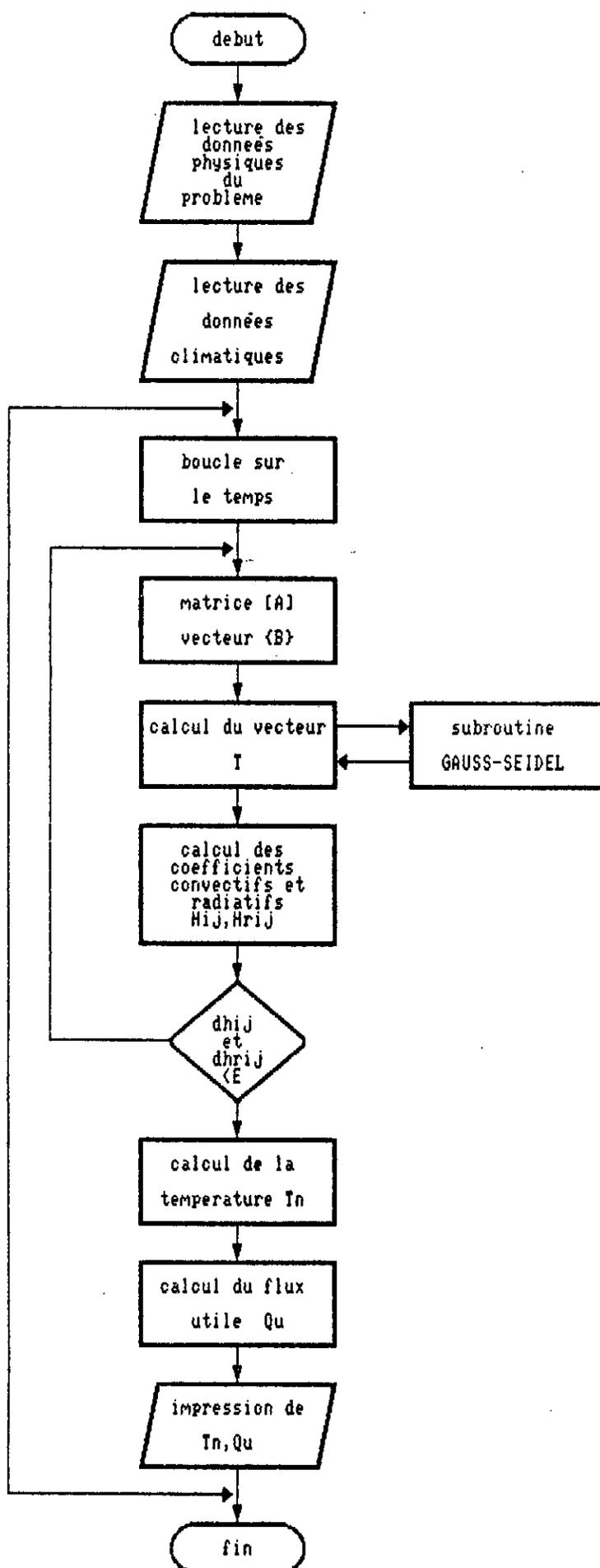
Le problème de la détermination des températures aux différents noeuds du système se ramène à la résolution d'un système matriciel linéaire :

$$[A] \{T\} = \{B\}$$

$\{T\}$  : est le vecteur température au temps  $(j+1)$ .

Lorsque toutes les données géométriques et climatiques sont lues, le programme assure la construction de la matrice  $[A]$  et du vecteur  $\{B\}$  suivant le nombre de noeuds que l'utilisateur aura choisi pour les différentes composants du système. Il permet ensuite par l'appel d'une subroutine de résolution (Gauss-Seidel) de déterminer le vecteur inconnu  $\{T\}$ .

## IV.4- organigramme



# CHAPITRE V

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour étudier les performances thermiques des différents systèmes présentés au chapitre (II), on a choisi les mêmes conditions climatiques, dans la même période de temps. Les données climatiques qu'on a pu avoir, caractérisent deux sites différents, les premières enregistrées en FRANCE pour une période de neuf jours, les autres au CANADA pour une période de sept jours.

Les données climatiques des sites et les données physiques des composants sont stockées dans des fichiers pour faciliter leur utilisation et leur traitement dans les programmes de calcul [Annexe II.].

En injectant au cours des opérations de calcul les caractéristiques dimensionnelles du système, les données physiques des composants (vitres, mur massif, contre-cloison isolante) et les données climatiques ( $G_t, T_a$ ), on pourra par le biais des résultats du calcul, effectuer une comparaison entre les performances des différents systèmes, et voir l'influence des paramètres géométriques.

L'énergie solaire incidente sur le système collecteur et la température ambiante extérieure pour les deux climats sont présentées sur les figures (V.1) et (V.2).

Comme critère de comparaison des performances des systèmes étudiés, on se servira :

- De la température de la face interne du dernier mur adjacent à l'enceinte chauffée.
- De la valeur du flux utile entrant dans l'habitat.

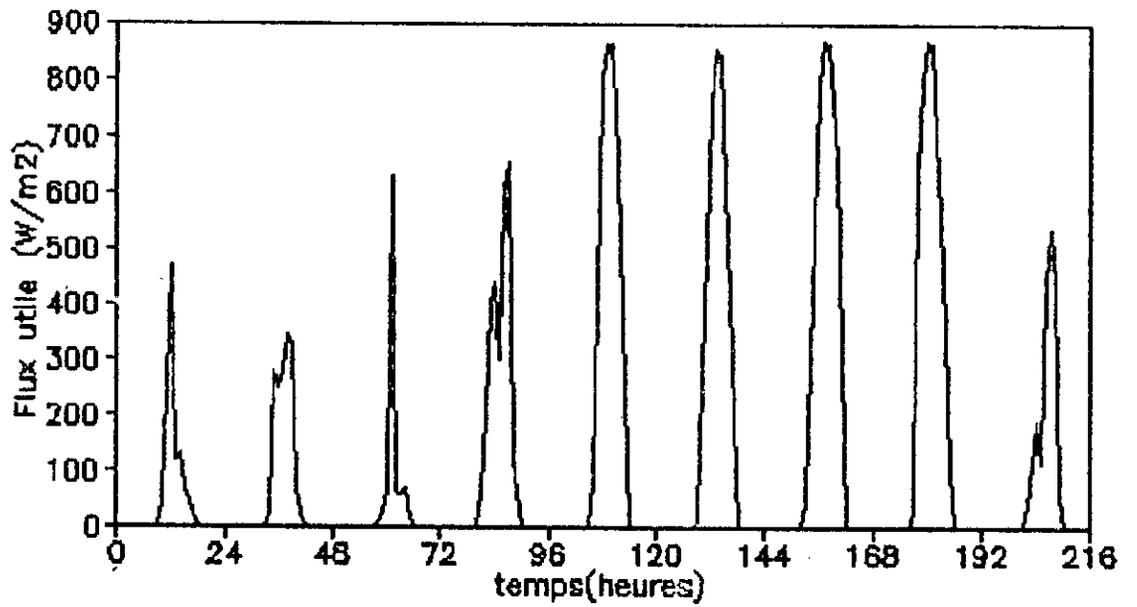
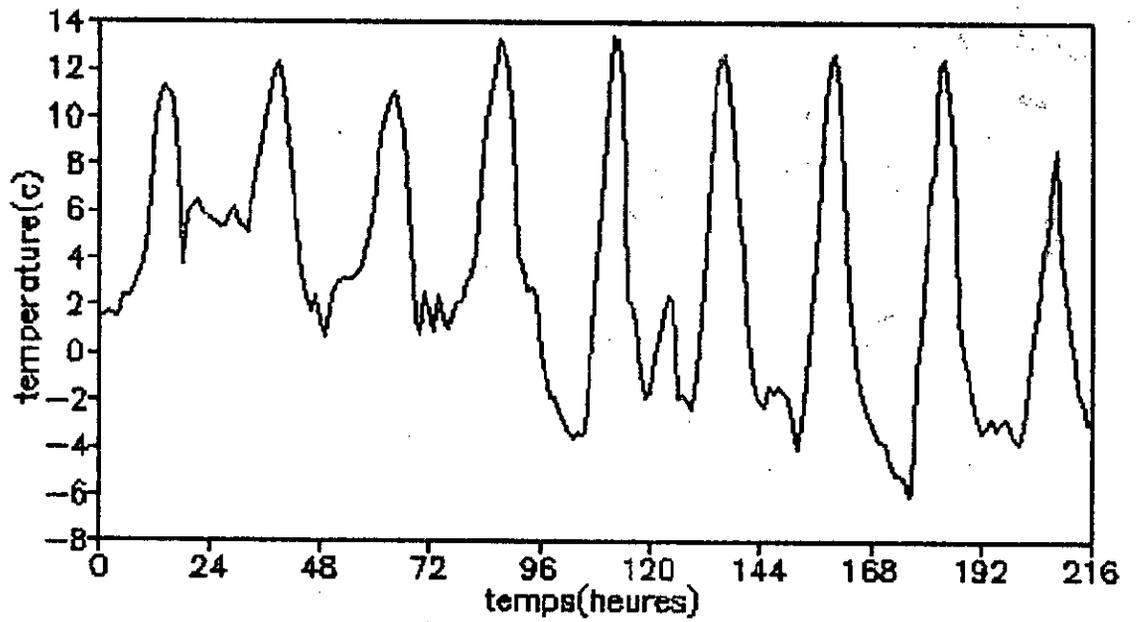


Fig.(V.1): La température ambiante et le flux solaire incident pour un site situé en FRANCE.

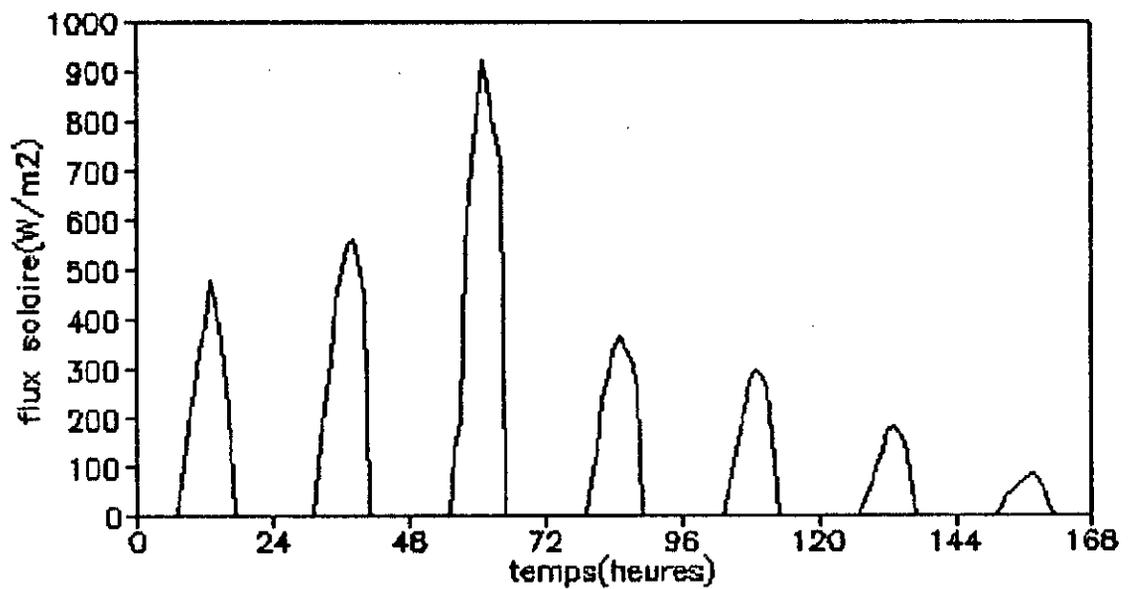
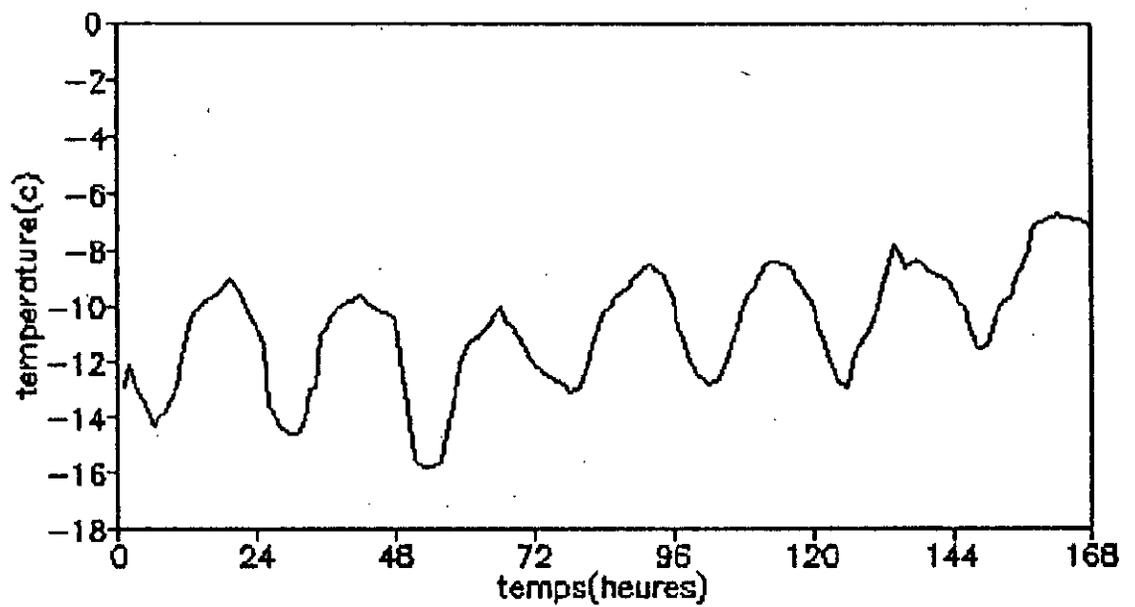


Fig.(V.2): La température ambiante extérieure et le flux incident pour un site situé au CANADA.

Nous présentons maintenant les résultats obtenus pour chaque système. Notons ici que l'effet de la variation de certains paramètres est étudié sur quelques systèmes uniquement, dans le but de voir l'influence d'un paramètre donné pour le même système.

### V.1- PRESENTATION DES RESULTATS :

#### \* Mur massif à simple vitrage :

##### a) Influence de la condition initiale sur la température de la face intérieure du mur et sur le flux utile :

En injectant les différentes valeurs de  $[T^0]$  nécessaire à la résolution numérique du problème, on obtient les courbes (V.3) relatives à la température intérieure ( $T_n$ ) et le flux utile ( $Q_u$ ).

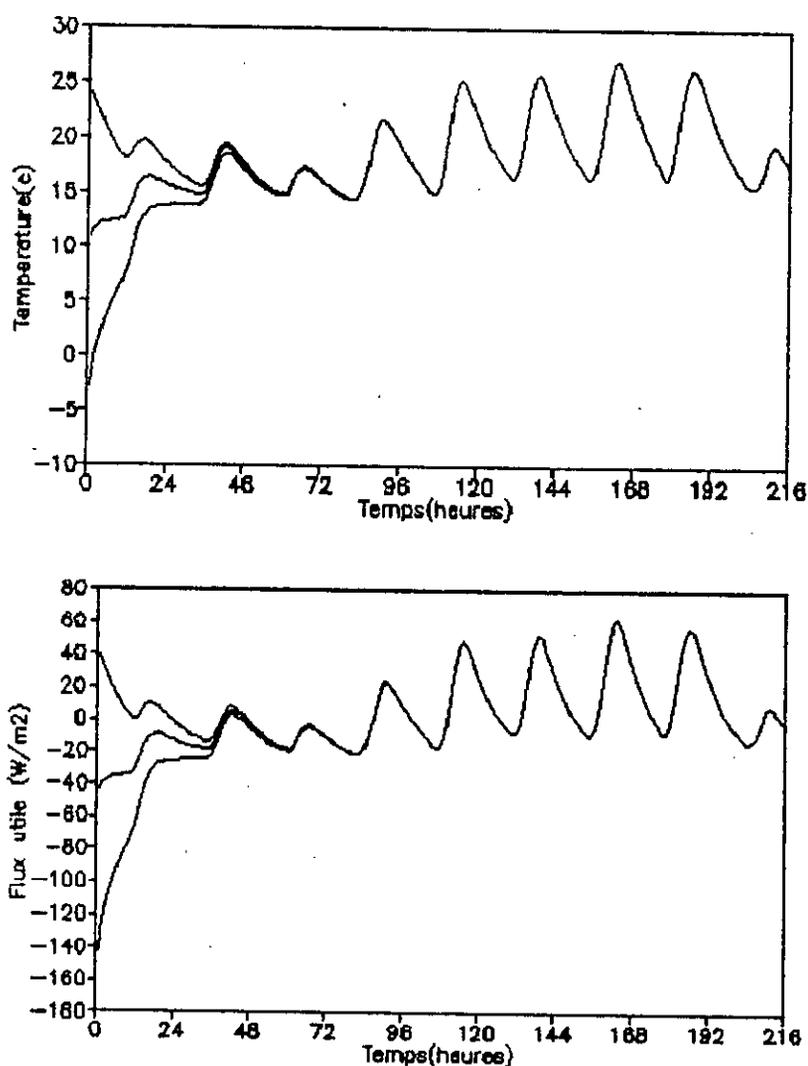


Fig. (V.3)

Il apparait de ces résultats que l'effet de la condition (numérique) initiale n'est que temporaire, puisqu'au bout de quelques dizaines d'heures il disparaît. Ceci montre que la méthode de résolution est bien adaptée, et donne à la longue des résultats réels qui ne dépendent que des caractéristiques du système et des données climatiques.

Ce résultat primordial va dans la suite nous permettre de s'intéresser uniquement à l'effet des caractéristiques géométriques.

**b) L'effet de l'épaisseur du mur massif :**

Pour évaluer l'effet de l'épaisseur du mur sur les performances thermiques des systèmes, nous avons calculé la température de la face interne du mur et le flux utile entrant pour différentes valeurs de son épaisseur. Les résultats sont donnés par la figure (V.4).

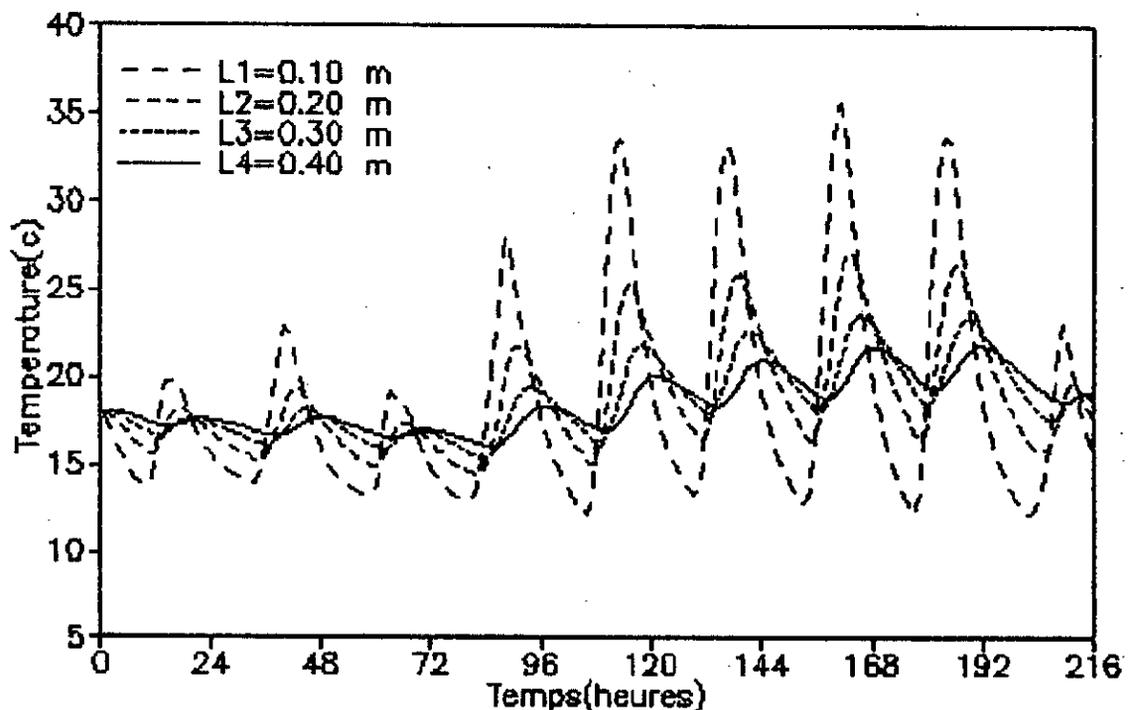


Fig.(V.4): La température de la face intérieure du mur en fonction de son épaisseur.

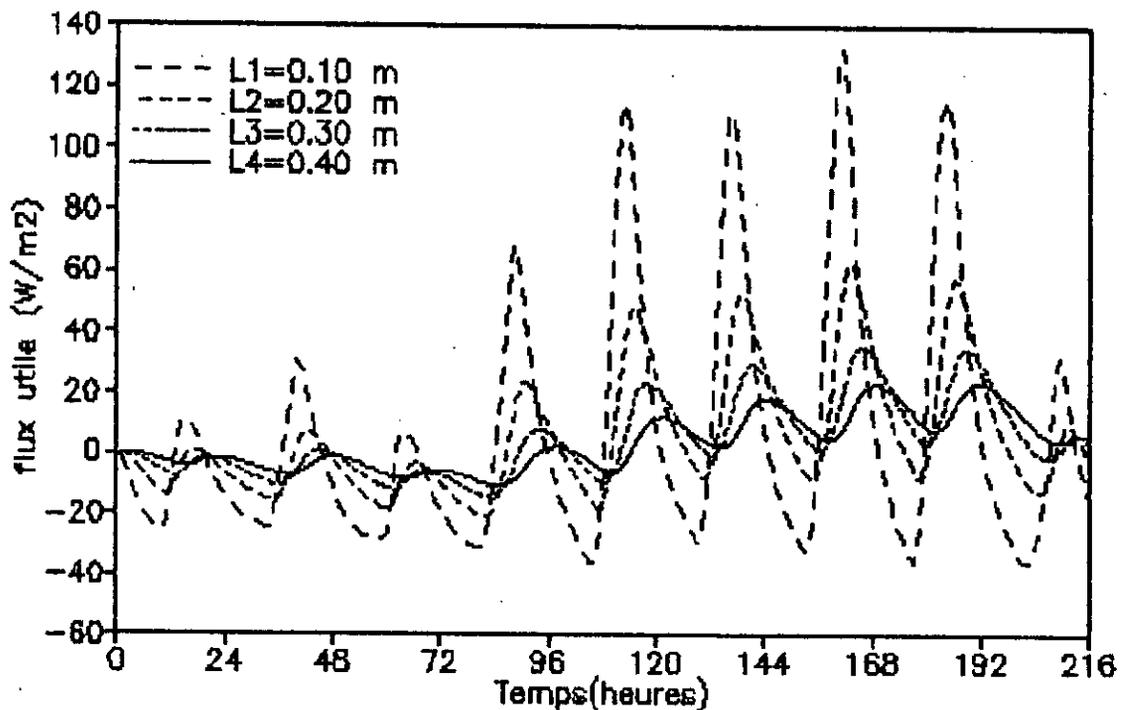


Fig.(V.4,bis): Le flux utile en fonction de l'épaisseur du mur.

Ces graphes sont obtenus pour des valeurs de l'épaisseur allant de 10 à 40 cm par un pas de 10.

La première constatation est que les performances thermiques du mur sont proportionnelles à son épaisseur, mais en comparant le temps de déphasage entre la variation des conditions climatiques extérieures et ceux enregistrées à l'intérieur, on constate que le temps de déphasage est également proportionnel à l'épaisseur. Il serait donc judicieux de choisir une épaisseur optimale pour laquelle il y'a un compromis entre l'épaisseur et le déphasage ( c.à.d choisir une épaisseur du mur optimale de sorte qu'en l'absence du rayonnement solaire, le mur fournit l'énergie nécessaire au chauffage ).

pour les petites épaisseurs du mur massif, il est à noter que les fluctuations sont importantes et très aiguës, alors que pour les épaisseurs relativement grandes, les fluctuations sont moins apparentes et le régime est plus stable.

## c) Effet de la distance entre la vitre et le mur :

Nous avons essayé de voir l'effet de la distance entre la vitre et le mur massif sur les performances thermique du système. Pour cela nous avons calculé les valeurs de la température de la face interne du mur et le flux pénétrant pour plusieurs valeurs de cette distance ( de 2 à 8 cm ).

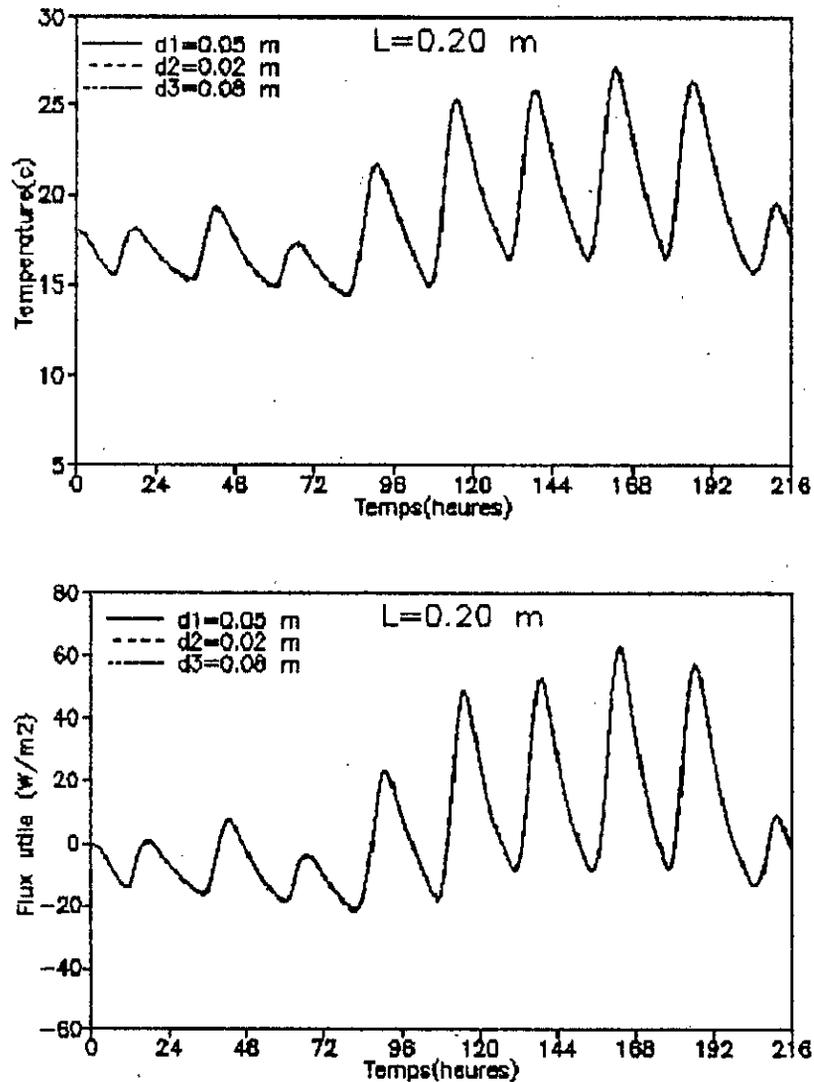


Fig. (V.5)

La figure (V.5) montre que cette distance n'a pratiquement aucun effet sur l'apport énergétique, mais il serait préférable que cette distance soit minimale pour éviter les espaces inutiles et amoindrir les frais économiques de l'installation. On prendra cette valeur par la suite égale à 5 cm.

\* d) Effet de la zone géographique:

Afin de juger l'efficacité de ce système, nous l'avons soumis à deux climats différents: le premier méditerranéen (FRANCE) et le second un climat du nord de l'hémisphère terrestre (CANADA). La figure (V.5) montre l'effet du climat de la zone géographique.

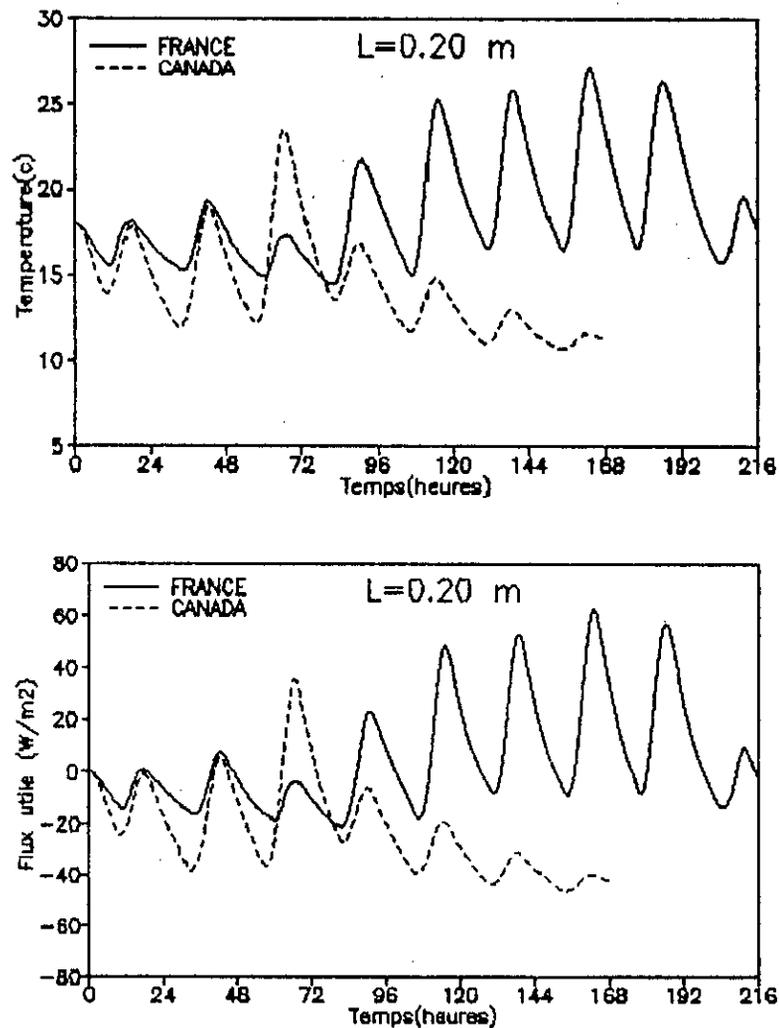


Fig.(V.6): La température de la face intérieure du mur et le flux utile pour deux climats différents.

Il est connu que le climat canadien est plus froid que le climat français (en moyenne annuelle). Les graphes précédents montrent, sans équivoque, que ce système est peu efficace pour les régions géographiques froides. Nous reviendrons plus loin en étudiant les résultats obtenus sur le système (IV) pour expliquer les raisons pour lesquelles ce système n'est pas adapté.

Après avoir vu les paramètres qui influent immédiatement sur les performances thermiques, nous allons exposer d'autres systèmes dont les performances relèvent de leur propre technicité.

**\* Mur massif à double vitrage :**

**a) Effet du nombre de vitres :**

Afin de voir l'influence du nombre de vitres sur les performances thermiques, on s'est intéressé à étudier un système à deux vitres. Les résultats comparatifs sont donnés par la figure (V.7).

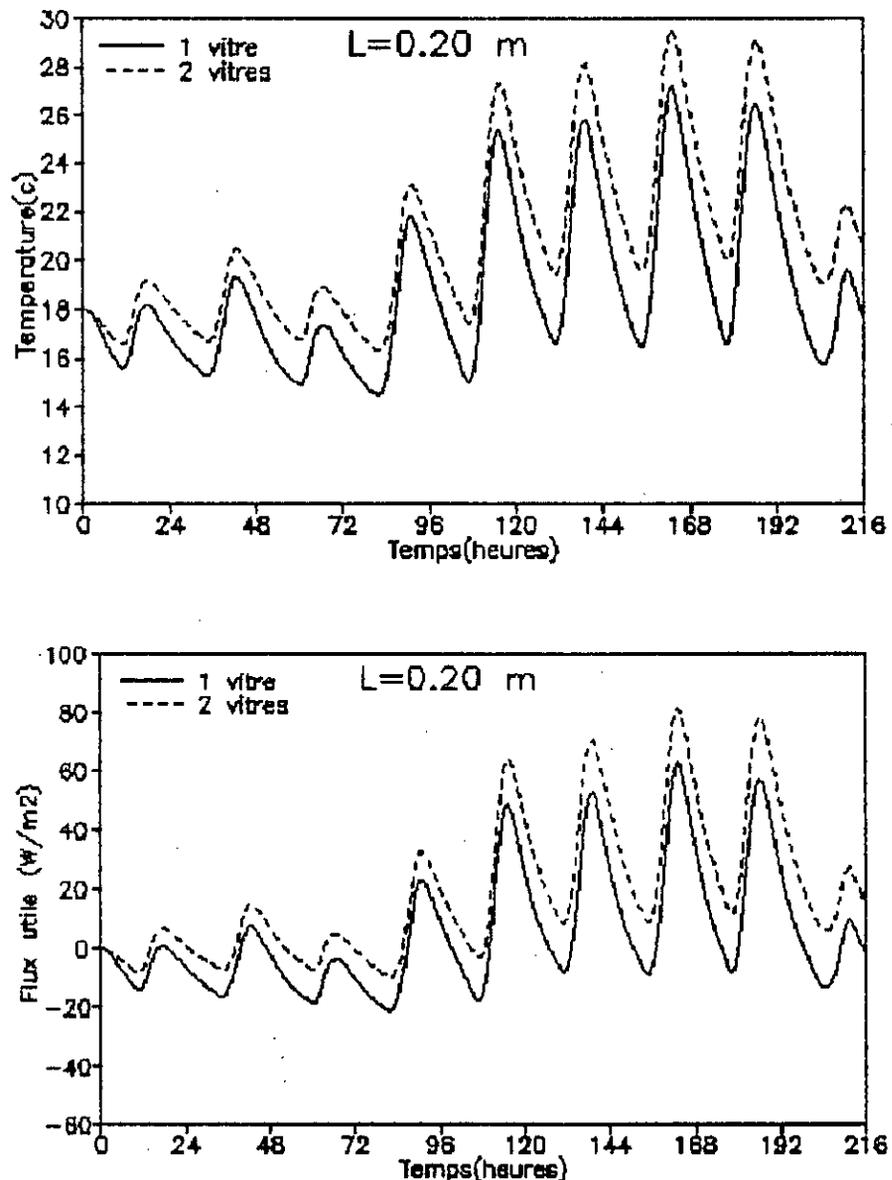


Fig. (V.7)

On constate qu'un système doté de deux vitres est plus performant que lorsqu'il est muni d'une seule. Une augmentation du nombre de vitres peut avoir l'effet inverse de ce que l'on espère obtenir, en effet la quantité d'énergie recueillie à la fin du dernier vitrage est très faible, suite aux phénomènes d'absorption et de réflexion multiples des vitres intermédiaires. Des recherches faites dans ce sens ont montré que les systèmes à double vitrage sont meilleurs que ceux d'un ou de plusieurs vitres.

**b) Effet du climat :**

Le système à deux vitrages est soumis à deux types de climats différents : le climat français plus clément et le climat canadien plus froid. Les résultats sont présentés dans la figure (V.8).

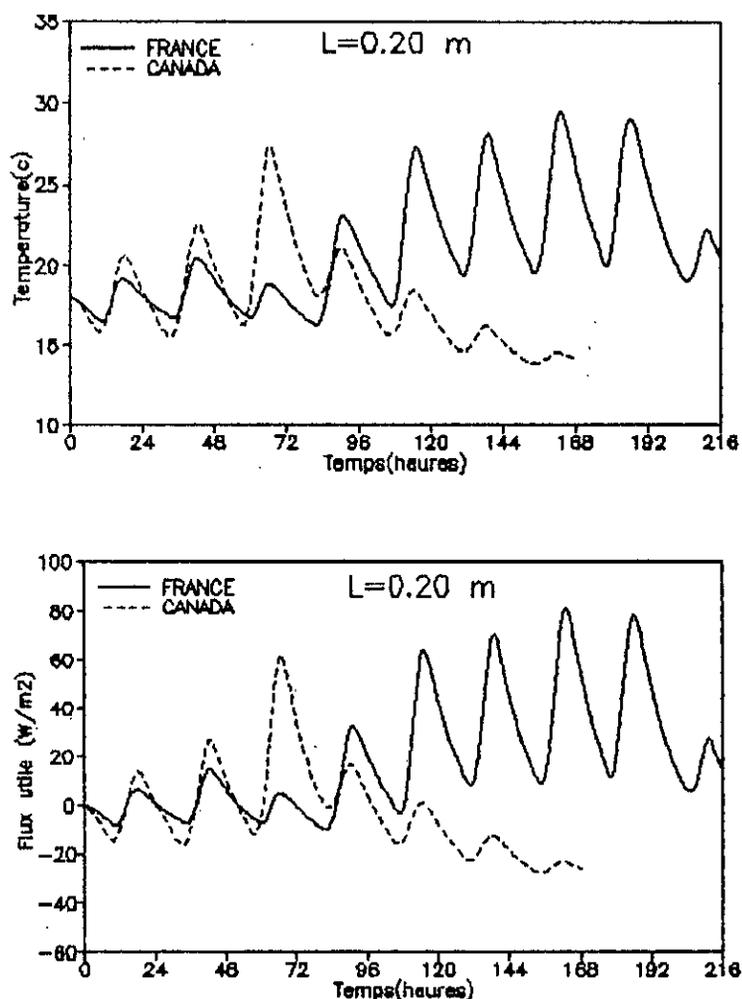


Fig.(V.8)

Ce système peut être jugé comme un système à performances moyennes ou même bonnes parfois. Il s'adapte pour tous les climats. Son seul inconvénient est peut être le coût de l'installation de la deuxième vitre.

Pour améliorer ce système, on essayera dans la partie suivante d'étudier le même système, quand le mur sera muni de deux orifices superposés permettant le transfert d'énergie par la thermocirculation (convection) en plus du transfert par conduction.

**\* Mur massif à double vitrage avec thermocirculation :**

**a) Effet de la thermocirculation :**

Ce système qui est identique au précédent, son mur est muni de deux orifices l'un en bas et l'autre en haut. Le rôle des orifices consiste à provoquer une circulation de l'air chaud exposé au rayonnement et à la face chaude du mur. L'air chaud, de faible densité, monte en créant une dépression en bas qui va aspirer l'air frais de l'habitat. En même temps une surpression apparaît au niveau de l'orifice supérieur, qui expulse l'air chaud vers l'habitat. L'étude est faite pour une épaisseur constante du mur ( $L=20\text{cm}$ ) et lorsque les orifices sont : soit ouverts tout le temps froid, soit pendant les périodes de temps chaud et fermés dans les périodes de temps froid. Pour effectuer cette étude comparative, nous avons supposé que les orifices sont guidés par des mécanismes automatiques pour s'ouvrir ou se fermer. Des mécanismes à sondes (thermostats) thermoélectriques peuvent régler la commande. A la fin, nous avons comparé les performances du système pour deux types de conditions climatiques (Fig. V.9) et (Fig.V.10).

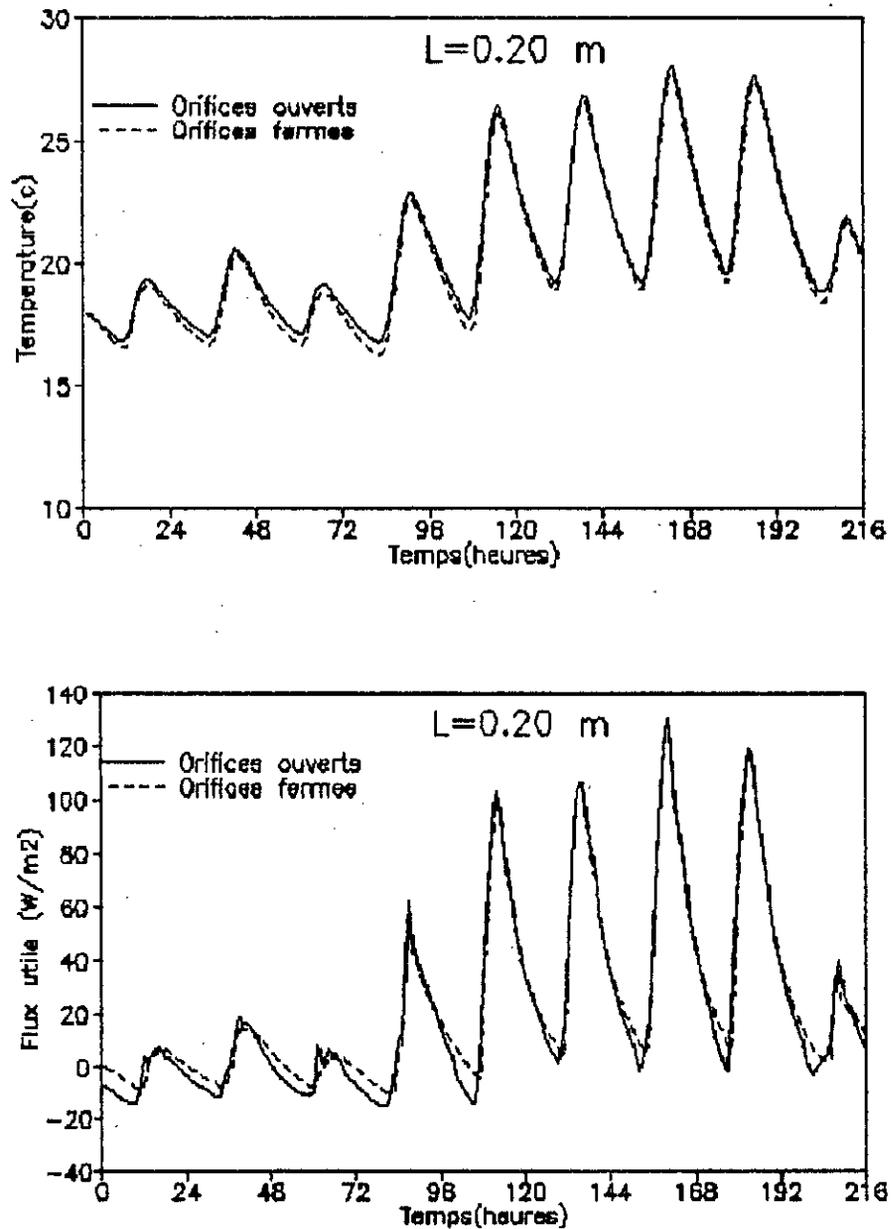


Fig. (V.9)

L'analyse des courbes de la figure (V.9) montre que dans les temps chauds, l'ouverture des orifices est très efficace puisqu'elle permet l'apport d'énergie par conduction et par convection de l'air en circulation. De plus l'effet est plus rapide. Elle montre aussi que pour les périodes froides, l'ouverture des orifices augmente rapidement les pertes. Donc une alternance d'ouverture et de fermeture, dans ce cas, est nécessaire et doit suivre l'alternance du climat extérieur, ce que confirme la figure (V.10).

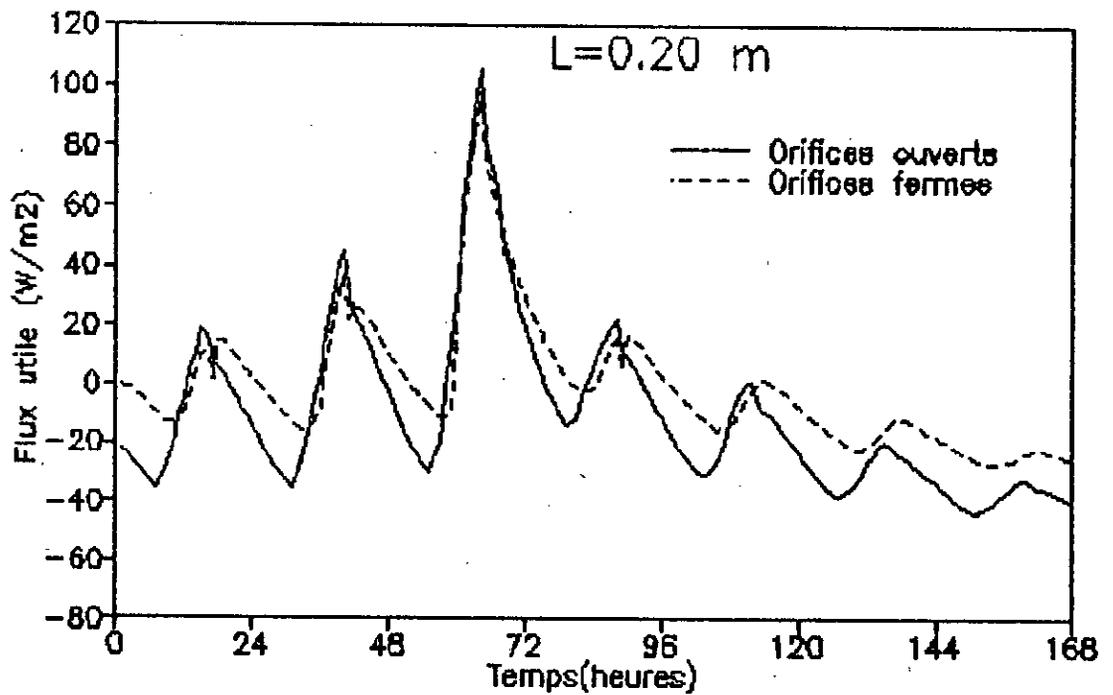
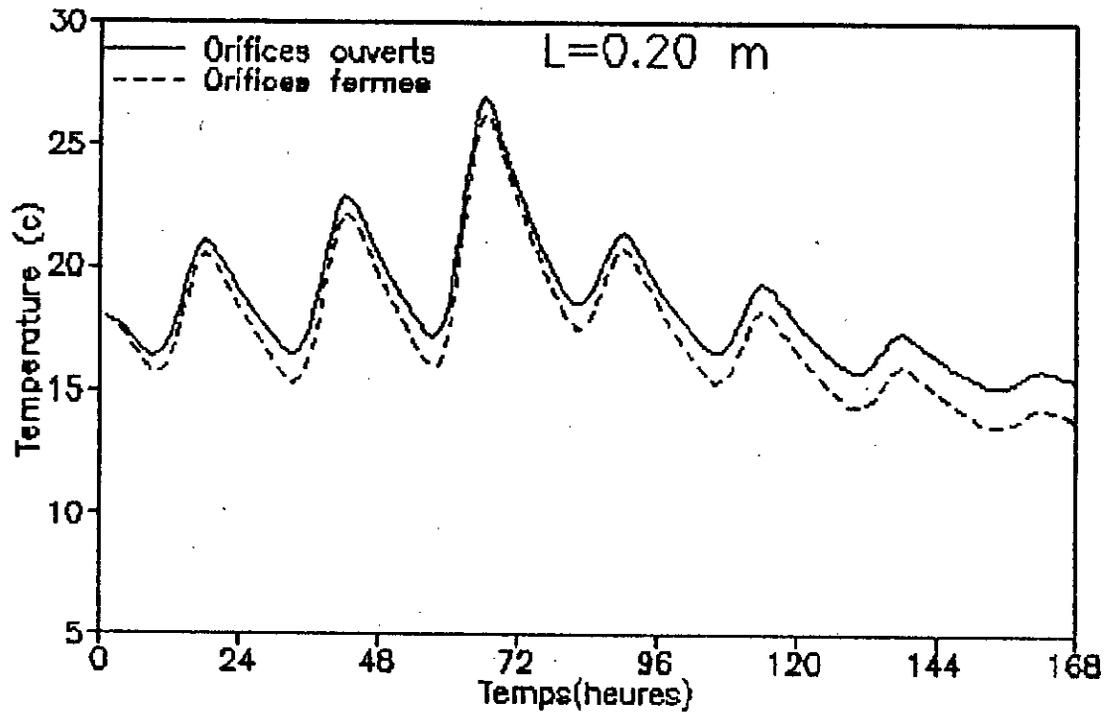


Fig. (V.10)

La figure (V.10) montre que ce système ne nécessite de mécanisme d'ouverture que pour les régions où la variation de conditions climatiques est rapide et aiguë.

b) Comparaison avec le système Mur Trombe :

Pour voir l'importance de la thermocirculation, on a comparé ce système avec celui de mur Trombe. La figure (V.11) montre la différence.

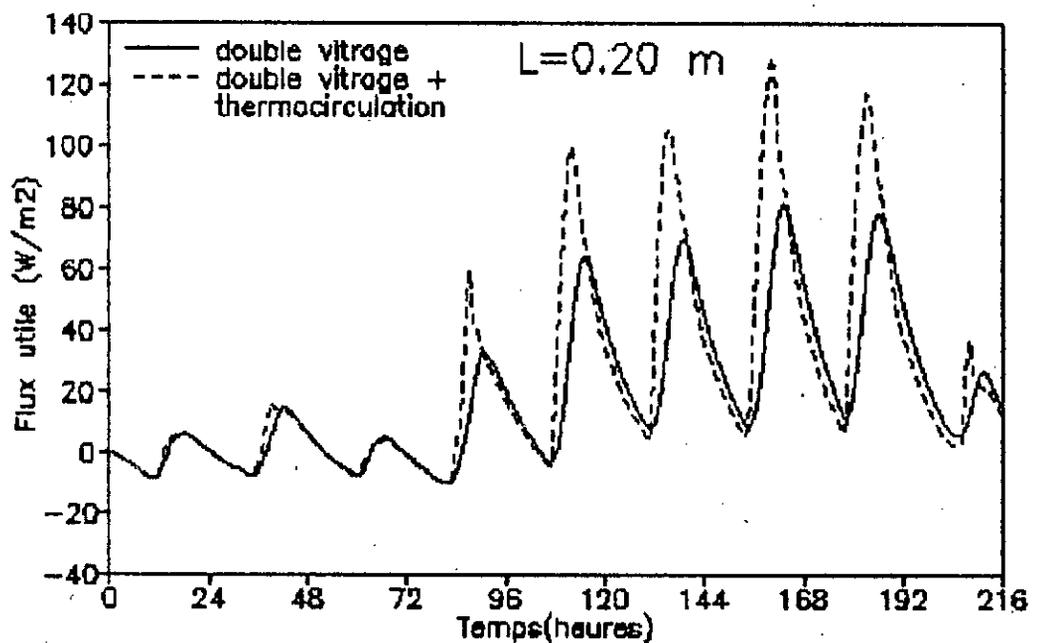
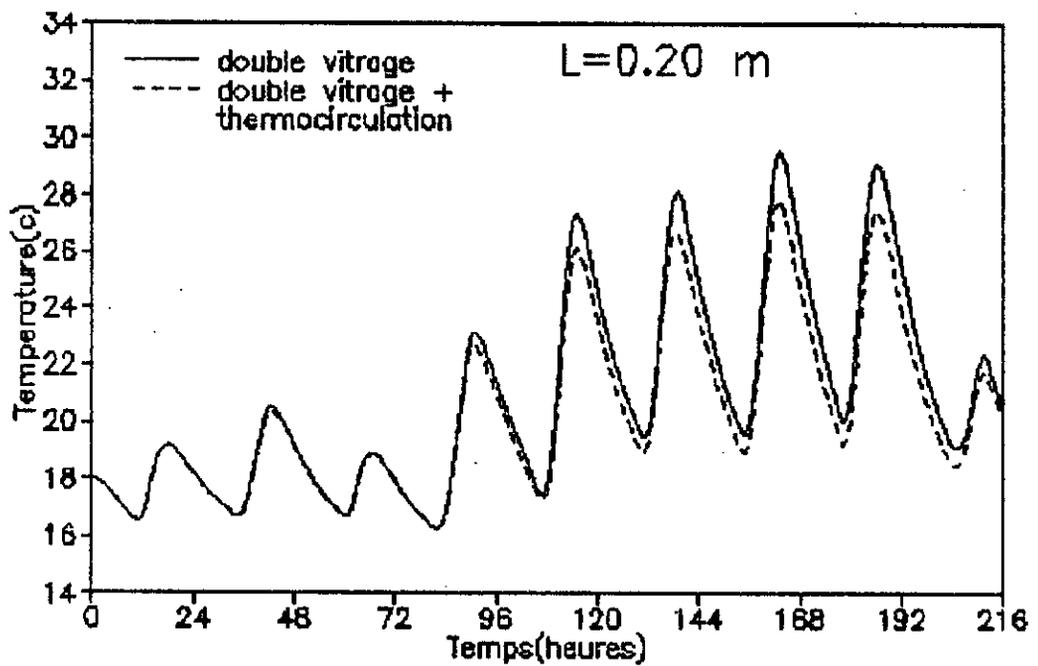


Fig. (V.11)

On remarque bien de ces courbes que la thermocirculation apporte d'énergie supplémentaire à la chambre malgré que la température de la face interne du mur a diminué, car la convection à travers la cheminée diminue la température de la face externe du mur. Donc il est très efficace de percer le mur pour permettre une thermocirculation de l'air chauffée par l'effet de serre.

c) Comparaison entre le flux conductif et convectif :

Pour voir l'importance du flux utile convectif (entrant par les orifices) par rapport au flux conductif (passant par le mur massif), nous les avons calculés séparément. Les résultats sont représentés sur la figure (V.12).

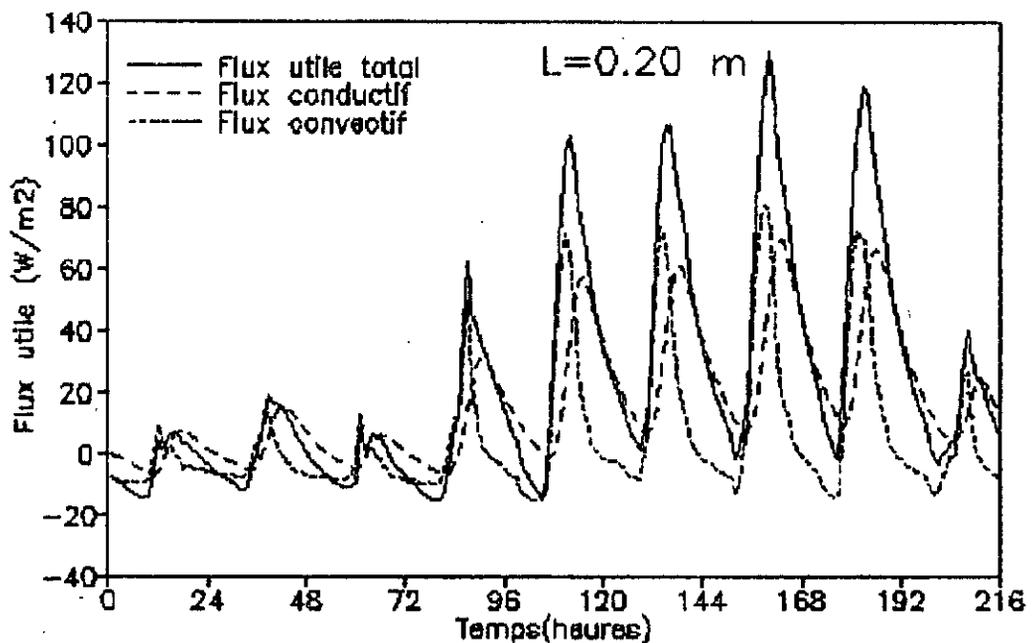


Fig. (V.12)

La figure (V.12) montre que le flux utile entrant par les orifices est plus important que le flux conductif ceci est dû à la rapidité de la thermocirculation de l'air chauffé comparé à l'énergie cédée par le mur massif après son stockage.

\* Mur massif à double vitrage et à isolation interne :

Ce système est constitué d'un mur massif, d'un double vitrage et d'un mur d'isolation interne doté de deux orifices disposés l'un au bas et l'autre au haut.

a) Effet de l'isolation :

Pour voir l'effet de l'isolation, on a comparé les performances de ce système avec le précédent en leur simulant des conditions climatiques identiques. Dans un premier temps, ils sont soumis à un climat modéré (FRANCE), puis à un climat très froid (CANADA). Les figures (V.13) et (V.14) montrent leurs performances.

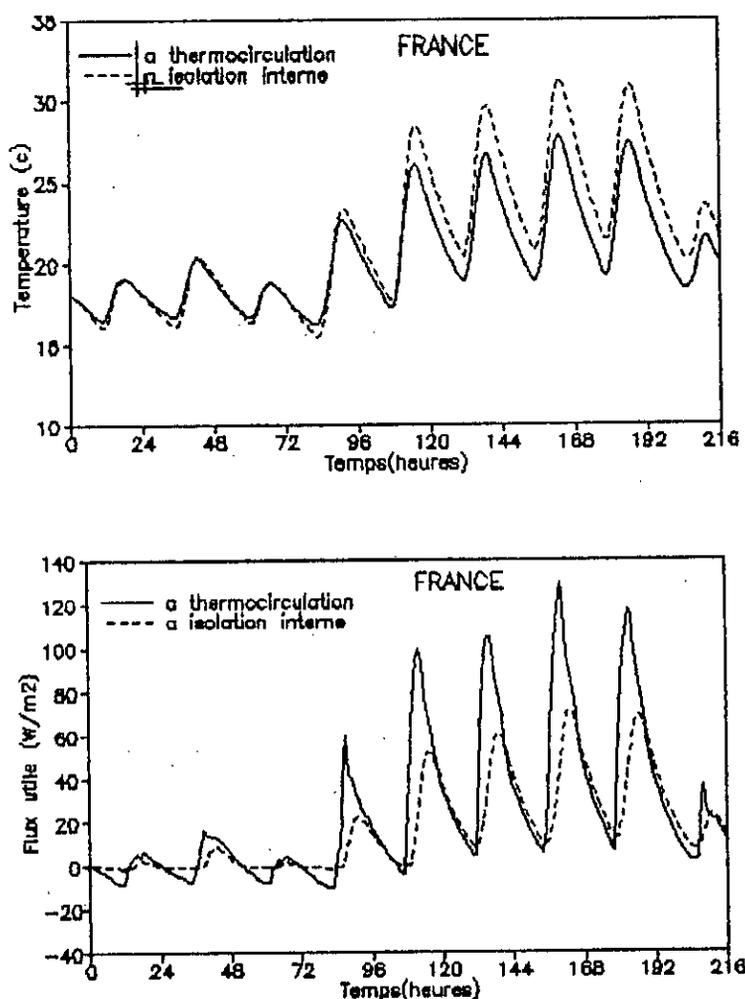


Fig. (V.13)

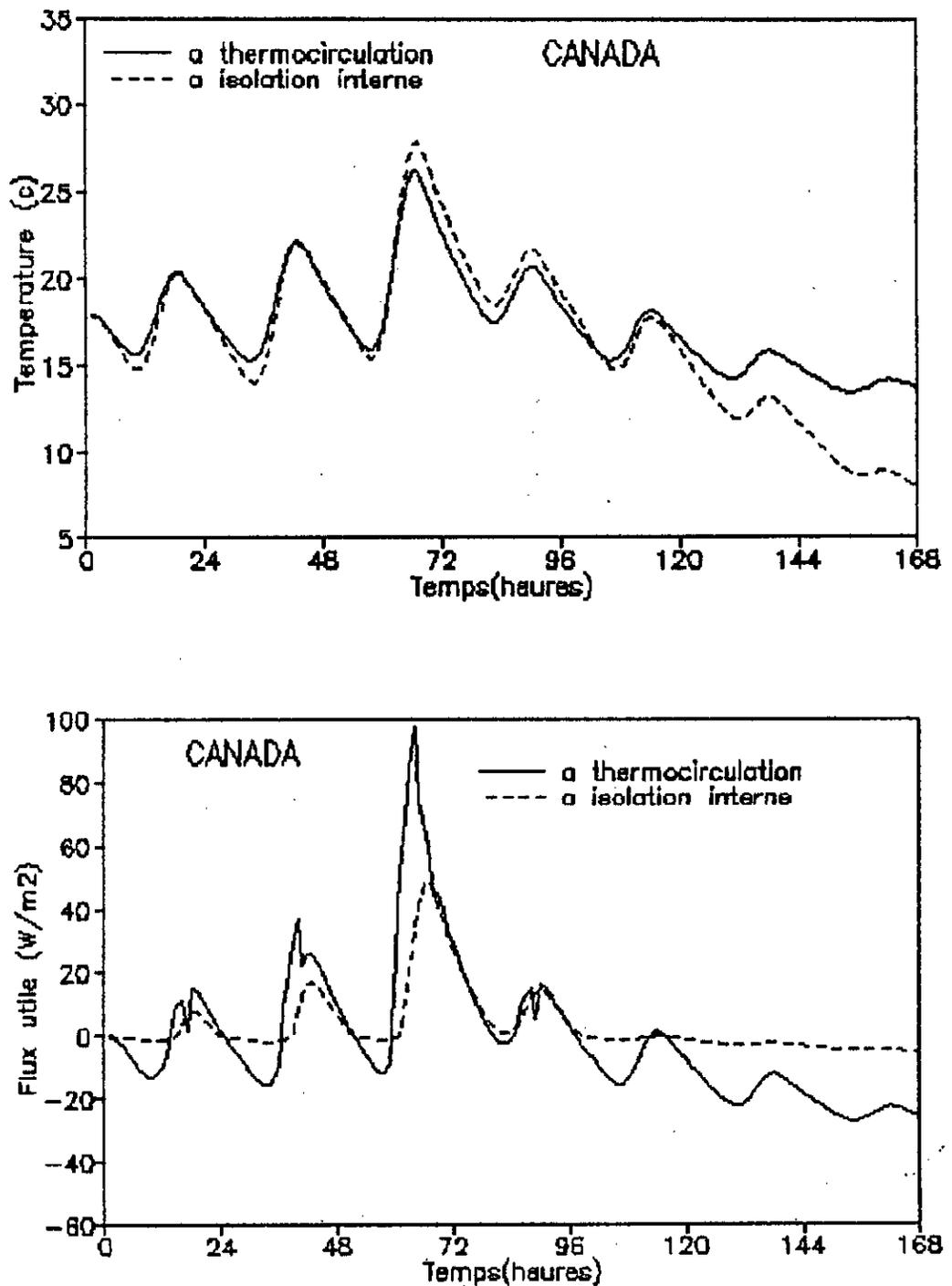


Fig. (V.14)

On constate que pour le premier climat (modéré), les performances thermiques sont comparables, alors que pour le deuxième climat (froid), l'isolation joue un rôle important dans la stabilisation du microclimat de l'habitat.

## b) Effet de l'épaisseur de la contre-cloison isolante :

En faisant varier la valeur de l'épaisseur de la contre-cloison isolante ( $d_1$ ) entre 2 et 8 cm alors que l'épaisseur ( $L$ ) du mur massif reste constante, on obtient les variations de la température de la face interne du mur et du flux utile comme les indique la figure (V.15).

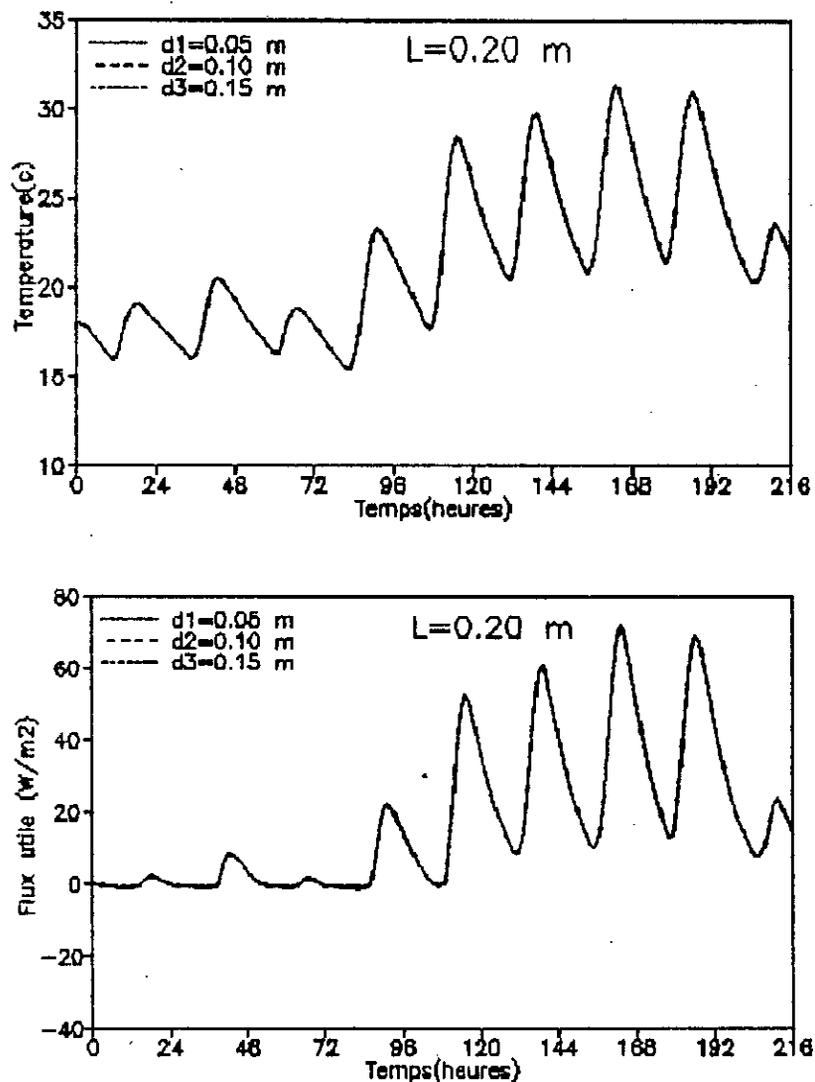


Fig. (V.15)

Il n'y a pratiquement aucun effet, ceci est dû au fait que la cloison isolante a une faible conduction, donc son inertie thermique (qui est très grande) n'agit que faiblement sur les longues durées de temps.

## c) Variation de l'épaisseur du mur massif :

Pour une épaisseur constante de la contre-cloison isolante (5cm), nous avons fait varier l'épaisseur du mur massif (entre 10 et 20 cm). Les résultats obtenus sont enregistrés sur la figure (V.16).

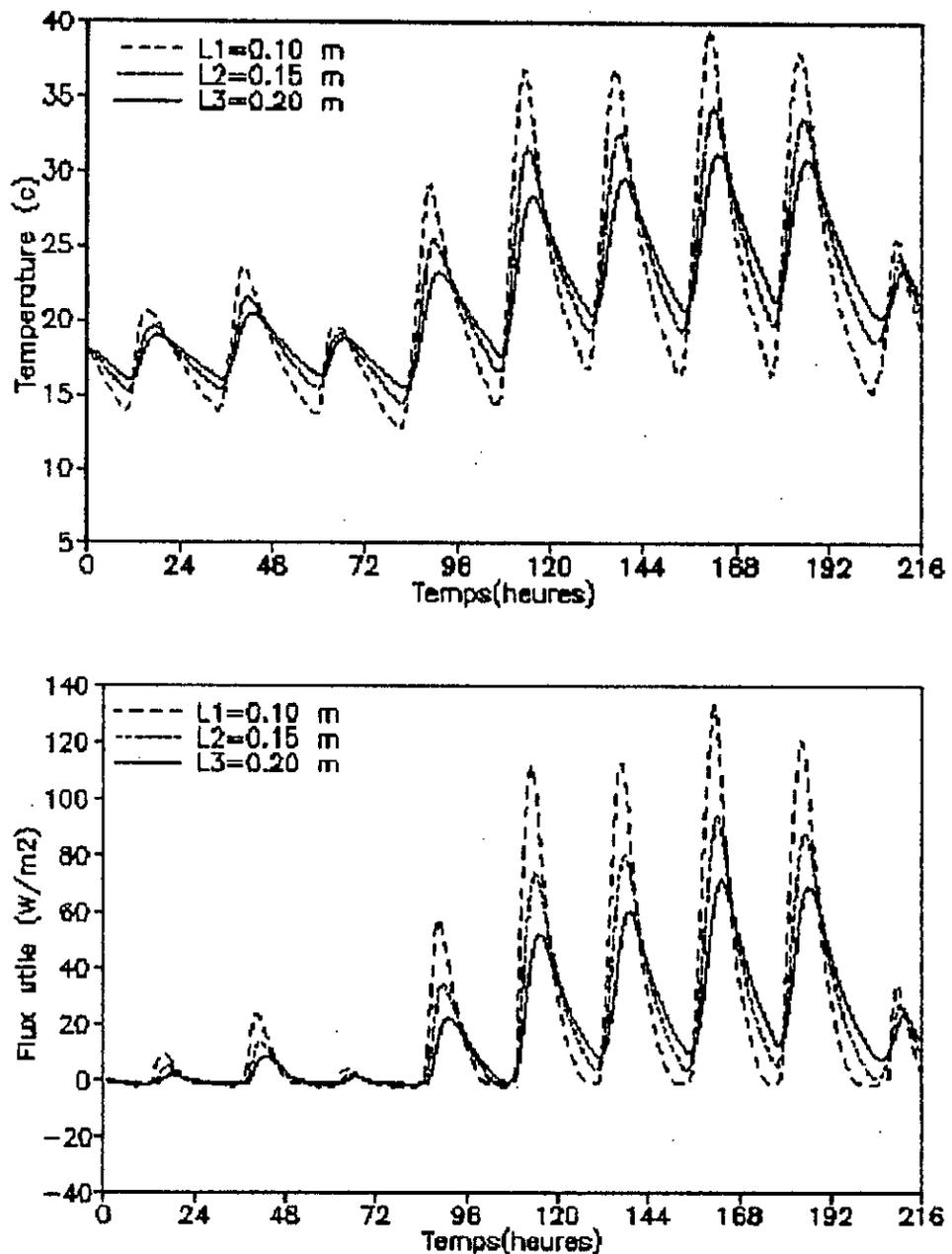


Fig.(V.16): La température de la face interne du mur et le flux utile en fonction de l'épaisseur(L).

Les résultats précédents montrent que l'épaisseur du mur massif est efficace lorsqu'elle est faible. L'explication de ce phénomène repose sur l'effet d'isolation qui ne permet pas la conduction et sur le fait que la température de la face interne du mur massif est diminuée lorsque son épaisseur est considérable, alors que c'est cette face même qui participe à l'échange avec l'air en circulation.

Dans les temps modérés il serait préférable que cette épaisseur soit petite pour que la face intérieure du mur massif ait une température relativement élevée afin de transmettre son énergie à l'air de la cheminée qui va le transmettre par convection à la chambre.

#### d) Comparaison entre le flux conductif et convectif :

Comme dans le cas du système précédent, on a essayé de voir l'importance du flux utile entrant par les orifices, mais cette fois ci en présence d'un mur isolant. Les résultats sont présentés sur la figure (V.17).

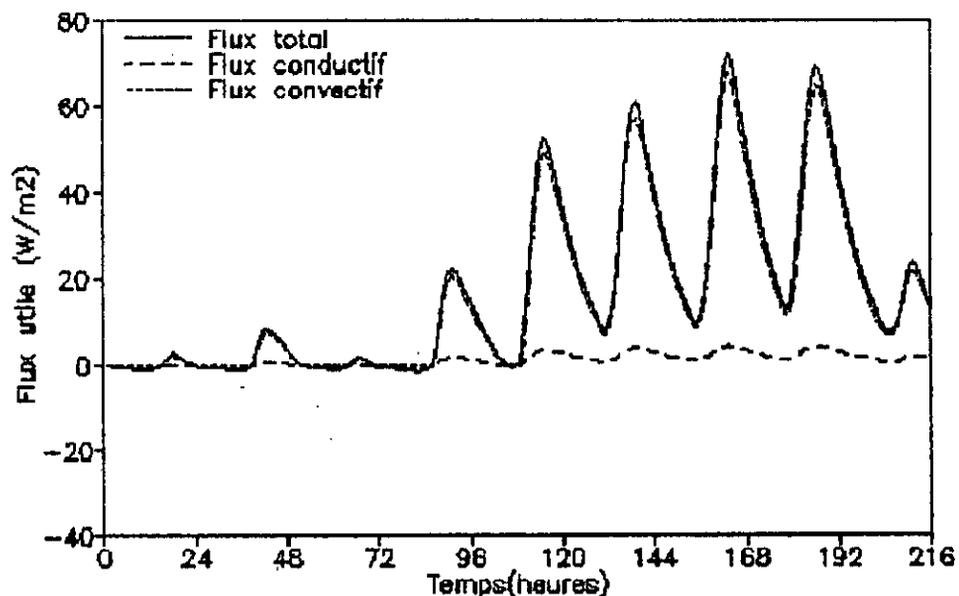


Fig. (V.17)

On constate que le flux utile conductif (cédé par le mur isolant) est négligeable par rapport au flux convectif, ceci confirme le rôle de ce mur (isolant) qui est très important dans les périodes très froides.

## V.2- DISCUSSION :

Grâce au modèle de simulation mathématique établi précédemment, on a essayé de voir les performances thermiques de plusieurs systèmes, et ceci en utilisant les données météorologique à pas horaire de deux sites : l'un en FRANCE et l'autre au CANADA. On s'est intéressé dans notre étude à une comparaison entre les différents systèmes, en gardant les mêmes propriétés physiques pour tout les systèmes mais en changeant les paramètres géométriques.

Les résultats présentés sous forme de graphes ont fait ressortir certaines remarques, ils montrent que le premier système (à simple vitrage ) est inefficace comparé aux autres systèmes. Le deuxième système (mur Trombe) est de performances moyennes et peut s'adapter pour des régions de climats modérés.

Le système le plus avantageux pour les climats froids est le modèle Trombe composite (à isolation interne), alors que le système Trombe à thermocirculation semble mieux adapté pour les climats modérés où les conditions climatiques fluctuent énormément entre le jour et la nuit.

## CONCLUSION

Les résultats obtenus montrent que les modèles mathématiques proposés constituent une base pour l'analyse théorique du comportement thermique de l'habitat où interviennent les phénomènes de convection (naturelle ou forcée), de conduction et du rayonnement.

Ils montrent que :

- l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage est possible et rentable pour tous les climats.
- Parmi les systèmes étudiés notons que le modèle Trombe à thermocirculation et le modèle Trombe composite sont les plus performants, en effet : pour les climats froids le modèle Trombe composite donne de meilleurs résultats que les autres, alors que le modèle Trombe à thermocirculation s'adapte mieux pour les climats modérés.
- Le modèle Trombe composite représente une réduction appréciable en masse par rapport au modèle Trombe à thermocirculation.

Pour pouvoir faire une étude complète sur les systèmes de chauffage passif, l'examen d'autres modèles est nécessaire, en particulier le système à isolation externe.

Afin d'apprécier au mieux l'analyse théorique du problème, la validation expérimentale de ces résultats s'impose et la nécessité de pouvoir disposer d'une installation expérimentale devient impérative. Parmi les résultats importants de la simulation expérimentale du système qu'on se propose d'étudier, l'aspect taux de participation d'énergie d'appoint comparativement à l'apport énergétique solaire.

# ANNEXES

**CALCUL DE FLUX SOLAIRE SUR LA FACE EXTERIEURE  
DU MUR MASSIF**

On considère deux parois verticales aux températures ( $T_1$ ) et ( $T_2$ ) et le flux solaire qui traverse la surface (1). La surface 2 correspond à la face extérieure du mur massif, elle a un coefficient d'absorption solaire  $\alpha_2$ . Le détail des réflexions des rayons solaires entre les deux surfaces est présenté sur la figure (1).

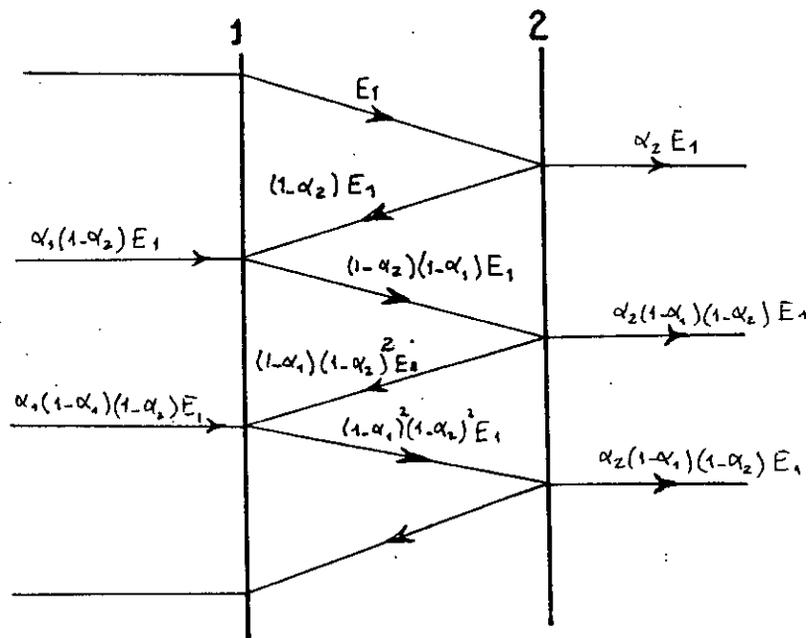


Fig.1: Bilan des réflexions des rayons solaires entre deux parois verticales parallèles.

La quantité de rayonnement solaire absorbée par la paroi (2) est :

$$Q = S[\alpha_2 E_1 + \alpha_2 (1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2) E_1 + \alpha_2 (1 - \alpha_1)^2 (1 - \alpha_2)^2 E_1 + \dots] \quad (1)$$

S : est la surface des parois.

On a :

$$1 - \alpha_1 = \rho_1 \quad (2)$$

$$1 - \alpha_2 = \rho_2 \quad (3)$$

donc :

$$Q = S[\alpha_2 E_1 + \alpha_2 \rho_1 \rho_2 E_1 + \alpha_2 (\rho_1 \rho_2)^2 E_1 + \dots] \quad (4)$$

La densité du flux absorbée par la paroi (2) est :

$$Q_2 = \frac{dQ}{dS} = \alpha_2 E_1 [1 + \rho_1 \rho_2 + (\rho_1 \rho_2)^2 + (\rho_1 \rho_2)^3 + \dots] \quad (5)$$

L'expression entre parenthèse est une suite géométrique de raison  $\rho_1 \rho_2$ , on pose :

$$A = 1 + \rho_1 \rho_2 + (\rho_1 \rho_2)^2 + \dots \quad (6)$$

La multiplication des deux membres de (6) par  $\rho_1 \rho_2$  conduit à :

$$A = \frac{1 - (\rho_1 \rho_2)^n}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad n \rightarrow \infty \quad (7)$$

Pratiquement on a  $(\rho_1 \rho_2) < 1$ , ainsi :

$$A = \frac{1}{1 - \rho_1 \rho_2} = \frac{1}{1 - \rho_1 (1 - \alpha_2)} \quad (8)$$

Finalelement:

$$Q_2 = \frac{\alpha_2 E_1}{1 - \rho_1 (1 - \alpha_2)} \quad (9)$$

La paroi (1) joue le rôle du système de vitrage exposé au rayonnement solaire. Si à chaque type du rayonnement solaire (direct, diffus et diffus par le sol) on associe une transmittance ( $\tau_i$ ), E1 s'écrit:

$$E_1 = \tau_d G_d + \tau_b G_b + \tau_{gr} G_{gr} \quad (10)$$

et

$$Q_2 = \frac{\alpha_2 (\tau_d G_d + \tau_b G_b + \tau_{gr} G_{gr})}{1 - \rho_1 (1 - \alpha_2)} \quad (11)$$

En pratique  $\rho_1$  et  $\rho_2$  sont faibles, ce qui permet d'approximer  $Q_2$  par:

$$Q_2 = \alpha_2 (\tau_b G_b + \tau_d G_d + \tau_{gr} G_{gr}) \quad (12)$$



```

      READ(1,*) (Gt(I),I=1,Te)
      READ(1,*) (Ta(I),I=1;Te)
      DO 4 I=1,Te
      Ta(I)=Ta(I)+273
4     CONTINUE
      READ(1,*) L
      READ(1,*) NN
      DX=L/(NN-1)
      Fe12=1/((1/E1)+(1/E2)-1)
      Fe13=1/((1/E1)+(1/E3)-1)
      Fe23=1/((1/E2)+(1/E3)-1)
      Fenm=1/((1/En)+(1/Em)-1)
      Fen1=1/((1/En)+(1/Ei)-1)
      Fen2=En*Ei
      Feq1=1/((1/Eq)+(1/Ei)-1)
      Feq2=Eq*Ei
      Ao=LAMBDA/(RHO*Cp)
      Hw=5.7+3.8*V
      Fo=Ao*Dt/DX**2
      Fol=Fo*DX/LAMBDA
      S1=Fen1*Fn1+2*Fen2*(Fn2+Fn3)
      S2=Feq1*Fn1+2*Feq2*(Fn2+Fn3)
      A1=H/D1
      A2=H/D2
      A3=H/D3
      IF(L.EQ.0.1) THEN
      Cd=0.67
      ELSE
      IF(L.EQ.0.2) THEN
      Cd=0.66
      ELSE
      IF(L.EQ.0.3) THEN
      Cd=0.63
      ELSE
      Cd=0.60
      ENDIF
      ENDIF
      ENDIF
      Clf=Cd*Cf*RHO*F*(G*H)**0.5

```

```

c=====
      WRITE(*,*) '*****'
1*****
      WRITE(*,*) '          LE CHOIX DU SYSTEME'
      WRITE(*,*) '*****'
1*****
      WRITE(*,*) ' SI VOUS VOULEZ : '
      WRITE(*,*) '
      WRITE(*,*) 'Mur massif à simple vitrage .....Taper: 1'
      WRITE(*,*) 'Mur massif à double vitrage.....Taper: 2'
      WRITE(*,*) 'Mur massif à double vitrage avec
      thermocirculation'
      WRITE(*,*) ' --- orifices ouverts .....Taper: 3'
      WRITE(*,*) ' --- orifices ouverts .....Taper: 4'
      WRITE(*,*) 'Mur massif a double vitrage avec isolation'
      WRITE(*,*) 'interne.....Taper: 5'
      WRITE(*,*) '*****'
1*****
c=====

```

```

READ(*,*) n1
IF(n1.EQ.1) GO TO 1000
IF(n1.EQ.2) GO TO 2000
IF(n1.EQ.3) GO TO 3000
IF(n1.EQ.4) GO TO 4000
IF(n1.EQ.5) GO TO 5000

```

```

c =====
c *** Mur massif avec simple vitrage ***
c =====
1000 N=NN+1
      DO 10 I=1,N
      T(I)=291
10    CONTINUE
      Hrw=10
      H12=10
      Hr12=10
      Hni=10
      Hrni=10
      WRITE(*,450) 'J', 'Tn', 'Qu'
      DO 20 J=1,Te
      DO 95 I=1,N
      TO(I)=T(I)
95    CONTINUE
      DO 60 P=1,Pmax
      Y(1)=Hrw
      Y(2)=H12
      Y(3)=Hr12
      Y(4)=Hni
      Y(5)=Hrni
      Bi12=H12*DX/LAMBDA
      Bir12=Hr12*DX/LAMBDA
      Bini=Hni*DX/LAMBDA
      Birni=Hrni*DX/LAMBDA
      DO 30 I=1,N
      DO 30 J1=1,N
      a(I,J1)=0
30    CONTINUE
      a(1,1)=Hw+Hrw+H12+Hr12
      a(1,2)=-(H12+Hr12)
      a(2,1)=-2*Fo*(Bi12+Bir12)
      a(2,2)=1+2*Fo*(1+Bi12+Bir12)
      a(2,3)=-2*Fo
      DO 40 I=3,N-1
      a(I,I)=1+Fo
      a(I,I-1)=-0.5*Fo
      a(I,I+1)=-0.5*Fo
40    CONTINUE
      a(N,N-1)=-2*Fo
      a(N,N)=1+2*Fo*(1+Bini+Birni)
      b(1)=ALPHA1*Gt(J)+Ta(J)*(Hw+Hrw)
      b(2)=TO(2)+2*Fo1*ALPHA3*TAU1*Gt(J)
      DO 50 I=3,N-1
      b(I)=(1-Fo)*TO(I)+0.5*Fo*(TO(I-1)+TO(I+1))
50    CONTINUE
      b(N)=TO(N)+2*Fo*(Bini+Birni)*Ti

```

```

CALL GS(A,B,T,N,Kmax,Emax,W)
Hrw=E1*SIGMA*(T(1)+Ta(J))*(T(1)**2+Ta(J)**2)
Hr12=SIGMA*Fe13*(T(1)+T(2))*(T(1)**2+T(2)**2)
Hrni=S1*SIGMA*(T(N)+Ti)*(T(N)**2+Ti**2)
Rad1=ABS(0.71*2*G*D1**3*(T(2)-T(1))/(Nu**2*(T(2)+T(1))))
b1=0.288*(Rad1/A1)**0.25
c1=0.039*Rad1**0.33
IF(b1.GE.c1) THEN
IF(b1.GE.1) THEN
Nu12=b1
ELSE
Nu12=1
ENDIF
ELSE
IF(c1.GE.1) THEN
Nu12=c1
ELSE
Nu12=1
ENDIF
ENDIF
H12=Nu12*LAMBDA/D1
Rah=ABS(0.71*2*G*H**3*(T(N)-Ti)/(Nu**2*(T(N)+Ti)))
IF(Rah.LE.1E9) THEN
IF(Rah.GE.1E4) THEN
Nuni=0.59*Rah**0.25
ELSE
GO TO 45
ENDIF
ELSE
IF(Rah.LE.1E12) THEN
Nuni=0.1*Rah**0.33
ELSE
GO TO 45
ENDIF
ENDIF
GO TO 55
45 WRITE(*,*) 'Rah= ',Rah
PAUSE
55 Hni=Nuni*LAMBDA/H
Ep(1)=ABS(Hrw-Y(1))/ABS(Hrw)
Ep(2)=ABS(H12-Y(2))/ABS(H12)
Ep(3)=ABS(Hr12-Y(3))/ABS(Hr12)
Ep(4)=ABS(Hni-Y(4))/ABS(Hni)
Ep(5)=ABS(Hrni-Y(5))/ABS(Hrni)
DO 100 I=1,5
IF(Ep(I).GT.Epmax) GO TO 60
100 CONTINUE
GO TO 110
60 CONTINUE
110 Qu(J)=(Hni+Hrni)*(T(N)-Ti)
WRITE(*,400) J,T(N)-273,Qu(J)
WRITE(2,400) J,T(N)-273,Qu(J)
20 CONTINUE
WRITE(*,*) 'LES RESULTATS SONT DANS LE FICHER : ',RESULTAT
GO TO 1111

```

```

c =====
c      ***          Mur massif avec double vitrage          ***
c =====
2000  N=NN+2
      DO 11 I=1,N
      T(I)=291
11    CONTINUE
      Hrw=10
      H12=10
      Hr12=10
      H23=10
      Hr23=10
      Hni=10
      Hrni=10
      WRITE(*,450) 'J', 'Tn', 'Qu'
      DO 21 J=1,Te
      DO 96 I=1,N
      TO(I)=T(I)
96    CONTINUE
      DO 61 P=1,Pmax
      Y(1)=Hrw
      Y(2)=H12
      Y(3)=Hr12
      Y(4)=H23
      Y(5)=Hr23
      Y(6)=Hni
      Y(7)=Hrni
      Bi23=H23*DX/LAMBDA
      Bir23=Hr23*DX/LAMBDA
      Bini=Hni*DX/LAMBDA
      Birni=Hrni*DX/LAMBDA
      DO 31 I=1,N
      DO 31 J1=1,N
      a(I,J1)=0
31    CONTINUE
      a(1,1)=Hw+Hrw+H12+Hr12
      a(1,2)=- (H12+Hr12)
      a(2,1)=- (H12+Hr12)
      a(2,2)=H12+Hr12+H23+Hr23
      a(2,3)=- (H23+Hr23)
      a(3,2)=-2*Fo*(Bi23+Bir23)
      a(3,3)=1+2*Fo*(1+Bi23+Bir23)
      a(3,4)=-2*Fo
      DO 41 I=4,N-1
      a(I,I)=1+Fo
      a(I,I-1)=-0.5*Fo
      a(I,I+1)=-0.5*Fo
41    CONTINUE
      a(N,N-1)=-2*Fo
      a(N,N)=1+2*Fo*(1+Bini+Birni)
      b(1)=ALPHA1*Gt(J)+Ta(J)*(Hw+Hrw)
      b(2)=ALPHA2*TAU1*Gt(J)
      b(3)=TO(3)+2*Fo1*TAU1*TAU2*ALPHA3*Gt(J)
      DO 51 I=4,N-1
      b(I)=(1-Fo)*TO(I)+0.5*Fo*(TO(I-1)+TO(I+1))
51    CONTINUE
      b(N)=TO(N)+2*Fo*(Bini+Birni)*Ti

```

```

CALL GS(A,B,T,N,Kmax,Emax,W)
Hrw=E1*SIGMA*(T(1)+Ta(J))*(T(1)**2+Ta(J)**2)
Hr12=SIGMA*Fe12*(T(1)+T(2))*(T(1)**2+T(2)**2)
Hr23=SIGMA*Fe23*(T(2)+T(3))*(T(2)**2+T(3)**2)
Hrni=S1*SIGMA*(T(N)+Ti)*(T(N)**2+Ti**2)
Rad1=ABS(0.71*2*G*D1**3*(T(2)-T(1))/(Nu**2*(T(2)+T(1))))
Rad2=ABS(0.71*2*G*D2**3*(T(3)-T(2))/(Nu**2*(T(2)+T(3))))
b1=0.288*(Rad1/A1)**0.25
b2=0.288*(Rad2/A2)**0.25
c1=0.039*Rad1**0.33
c2=0.039*Rad2**0.33
IF(b1.GE.c1) THEN
IF(b1.GE.1) THEN
Nu12=b1
ELSE
Nu12=1
ENDIF
ELSE
IF(c1.GE.1) THEN
Nu12=c1
ELSE
Nu12=1
ENDIF
ENDIF
H12=Nu12*LAMBDA/D1
IF(b2.GE.c2) THEN
IF(b2.GE.1) THEN
Nu23=b2
ELSE
Nu23=1
ENDIF
ELSE
IF(c2.GE.1) THEN
Nu23=c2
ELSE
Nu23=1
ENDIF
ENDIF
H23=Nu23*LAMBDA/D2
Rah=ABS(0.71*2*G*H**3*(T(N)-Ti)/(Nu**2*(T(N)+Ti)))
IF(Rah.LE.1E9) THEN
IF(Rah.GE.1E4) THEN
Nuni=0.59*Rah**0.25
ELSE
GO TO 46
ENDIF
ELSE
IF(Rah.LE.1E12) THEN
Nuni=0.1*Rah**0.33
ELSE
GO TO 46
ENDIF
ENDIF
GO TO 56
46 WRITE(*,*) 'Rah= ',Rah
PAUSE
56 Hni=Nuni*LAMBDA/H
Ep(1)=ABS((Hrw-Y(1))/Hrw)

```

```

      Ep(2)=ABS((H12-Y(2))/H12)
      Ep(3)=ABS((Hr12-Y(3))/Hr12)
      Ep(4)=ABS((H23-Y(4))/H23)
      Ep(5)=ABS((Hr23-Y(5))/Hr23)
      Ep(6)=ABS((Hni-Y(6))/Hni)
      Ep(7)=ABS((Hrni-Y(7))/Hrni)
      DO 101 I=1,7
      IF(Ep(I).GT.Epmax) GO TO 61
101  CONTINUE
      GO TO 111
61   CONTINUE
111  Qu(J)=(Hni+Hrni)*(T(N)-Ti)
      WRITE(*,400) J,T(N)-273,Qu(J)
      WRITE(2,400) J,T(N)-273,Qu(J)
21   CONTINUE
      WRITE(*,*) 'LES RESULTATS SONT DANS LE FICHER:',RESULTAT
      GO TO 1111

```

```

c =====
c   *** Mur massif a double vitrage avec thermocirculation ***
c   ***                               (jours et nuits)                               ***
c =====
3000 N=NN+2
      DO 12 I=1,N
      T(I)=291
12   CONTINUE
      To=291
      Tf=291
      Hrw=10
      H12=10
      Hr12=10
      Hf2=10
      H23=10
      Hr23=10
      Hf3=10
      Hni=10
      Hrni=10
      WRITE(2,450) 'J', 'Tn', 'Qu', 'Que', 'To'
      DO 22 J=1,Te
      DO 97 I=1,N
      TO(I)=T(I)
97   CONTINUE
      DO 62 P=1,Pmax
      Y(1)=Hrw
      Y(2)=H12
      Y(3)=Hr12
      Y(4)=Hf2
      Y(5)=H23
      Y(6)=Hr23
      Y(7)=Hf3
      Y(8)=Hni
      Y(9)=Hrni
      Bif2=Hf2*DX/LAMBDA
      Bi23=H23*DX/LAMBDA
      Bir23=Hr23*DX/LAMBDA
      Bif3=Hf3*DX/LAMBDA

```

```

      Bini=Hni*DX/LAMBDA
      Birni=Hrni*DX/LAMBDA
      DO 32 I=1,N
      DO 32 J1=1,N
      a(I,J1)=0
32    CONTINUE
      a(1,1)=Hw+Hrw+H12+Hr12
      a(1,2)=- (H12+Hr12)
      a(2,1)=- (H12+Hr12)
      a(2,2)=H12+Hr12+Hf2+Hr23
      a(2,3)=-Hr23
      a(3,2)=-2*Fo*Bir23
      a(3,3)=1+2*Fo*(1+Bif3+Bir23)
      a(3,4)=-2*Fo
      DO 42 I=4,N-1
      a(I,I)=1+Fo
      a(I,I-1)=-0.5*Fo
      a(I,I+1)=-0.5*Fo
42    CONTINUE
      a(N,N-1)=-2*Fo
      a(N,N)=1+2*Fo*(1+Bini+Birni)
      b(1)=ALPHA1*Gt(J)+Ta(J)*(Hw+Hrw)
      b(2)=ALPHA2*TAU1*Gt(J)+Hf2*Tf
      b(3)=TO(3)+2*Fo1*TAU1*TAU2*ALPHA3*Gt(J)+2*Fo*Bif3*Tf
      DO 52 I=4,N-1
      b(I)=(1-Fo)*TO(I)+0.5*Fo*(TO(I-1)+TO(I+1))
52    CONTINUE
      b(N)=TO(N)+2*Fo*(Bini+Birni)*Ti
      CALL GS(A,B,T,N,Kmax,Emax,w)
      DO 603 M=1,50
      Z=To
      Tf=(To+Ti)/2
      Rah2=ABS(0.71*2*G*(Tf-T(2))/(Nu**2*(Tf+T(2))))
      Rah3=ABS(0.71*2*G*(Tf-T(3))/(Nu**2*(Tf+T(3))))
      IF(Rah2.GT.1E9) THEN
      Nuf2=(0.825+0.324*Rah2**0.17)**2
      ELSE
      Nuf2=0.68+0.513*Rah2**0.25
      ENDIF
      Hf2=Nuf2*LAMBDA/H1
      IF(Rah3.GT.1E9) THEN
      Nuf3=(0.825+0.324*Rah3**0.17)**2
      ELSE
      Nuf3=0.68+0.513*Rah3**0.25
      ENDIF
      Hf3=Nuf3*LAMBDA/H1
      Qf=Hf2*(T(2)-Tf)+Hf3*(T(3)-Tf)
      M1=(To+Ti)**(1./3.)
      M2=(Qf/C1f)**2
      IF(Qf.GE.0) THEN
      To=Ti+M1*M2**(1./3.)
      ELSE
      To=Ti-M1*M2**(1./3.)
      ENDIF
      Ef=ABS((To-Z)/To)
      IF(Ef.LT.1E-8) GO TO 608
603    CONTINUE
608    Hrw=E1*SIGMA*(T(1)+Ta(J))*(T(1)**2+Ta(J)**2)

```

```

Hr12=SIGMA*Fe12*(T(1)+T(2))*(T(1)**2+T(2)**2)
Hr23=SIGMA*Fe23*(T(2)+T(3))*(T(2)**2+T(3)**2)
Hrni=S1*SIGMA*(T(N)+Ti)*(T(N)**2+Ti**2)
Rad1=ABS(0.71*2*G*D1**3*(T(2)-T(1))/(Nu**2*(T(2)+T(1))))
Rad2=ABS(0.71*2*G*D2**3*(T(3)-T(2))/(Nu**2*(T(2)+T(3))))
b1=0.288*(Rad1/A1)**0.25
b2=0.288*(Rad2/A2)**0.25
c1=0.039*Rad1**0.33
c2=0.039*Rad2**0.33
IF(b1.GE.c1) THEN
IF(b1.GE.1) THEN
Nu12=b1
ELSE
Nu12=1
ENDIF
ELSE
IF(c1.GE.1) THEN
Nu12=c1
ELSE
Nu12=1
ENDIF
ENDIF
H12=Nu12*LAMBDA/D1
IF(b2.GE.c2) THEN
IF(b2.GE.1) THEN
Nu23=b2
ELSE
Nu23=1
ENDIF
ELSE
IF(c2.GE.1) THEN
Nu23=c2
ELSE
Nu23=1
ENDIF
ENDIF
H23=Nu23*LAMBDA/D2
Rah=ABS(0.71*2*G*H**3*(T(N)-Ti)/(Nu**2*(T(N)+Ti)))
IF(Rah.LE.1E9) THEN
IF(Rah.GE.1E4) THEN
Nuni=0.59*Rah**0.25
ELSE
GO TO 47
ENDIF
ELSE
IF(Rah.LE.1E12) THEN
Nuni=0.1*Rah**0.33
ELSE
GO TO 47
ENDIF
ENDIF
GO TO 57
47 WRITE(*,*) 'Rah= ',Rah
PAUSE
57 Hni=Nuni*LAMBDA/H
Ep(1)=ABS((Hrw-Y(1))/Hrw)
Ep(2)=ABS((H12-Y(2))/H12)
Ep(3)=ABS((Hr12-Y(3))/Hr12)

```

```

Ep(4)=ABS((Hf2-Y(4))/Hf2)
Ep(5)=ABS((H23-Y(5))/H23)
Ep(6)=ABS((Hr23-Y(6))/Hr23)
Ep(7)=ABS((Hf3-Y(7))/Hf3)
Ep(8)=ABS((Hni-Y(8))/Hni)
Ep(9)=ABS((Hrni-Y(9))/Hrni)
DO 102 I=1,9
IF(Ep(I).GT.Epmax) GO TO 62
102 CONTINUE
GO TO 112
62 CONTINUE
112 Quc(J)=(Hni+Hrni)*(T(N)-Ti)
Qu(J)=Quc(J)+Qf
WRITE(*,400) J,T(N)-273,Qu(J),Quc(J),To-273
WRITE(2,400) J,T(N)-273,Qu(J),Quc(J),To-273
22 CONTINUE
WRITE(*,*) 'LES RESULTATS SONT DANS LE FICHER:',RESULTAT
GO TO 1111

```

```

c =====
c           Mur massif a double vitrage avec thermocirculation
c           (orifices fermes pendant la nuit)
c =====
4000 N=NN+2
DO 13 I=1,N
T(I)=291
13 CONTINUE
To=291
Tf=291
Hrw=10
H12=10
Hr12=10
Hf2=10
H23=10
Hr23=10
Hf3=10
Hni=10
Hrni=10
JJ=1
WRITE(2,450) 'J', 'Tn', 'Qu', 'Quc', 'To'
DO 24 J=1,Te
DO 98 I=1,N
TO(I)=T(I)
98 CONTINUE
Jd=JJ
DO 263 P=1,Pmax
Y(1)=Hrw
Y(2)=H12
Y(3)=Hr12
Y(4)=Hf2
Y(5)=H23
Y(6)=Hr23
Y(7)=Hf3
Y(8)=Hni
Y(9)=Hrni
Bi23=H23*DX/LAMBDA
Bir23=Hr23*DX/LAMBDA

```

```

Bif3=Hf3*DX/LAMBDA
Bini=Hni*DX/LAMBDA
Birni=Hrni*DX/LAMBDA
DO 33 I=1,N
DO 33 J1=1,N
a(I,J1)=0
33 CONTINUE
a(1,1)=Hw+Hrw+H12+Hr12
a(1,2)=-(H12+Hr12)
a(2,1)=-(H12+Hr12)
IF(Jd.EQ.1) THEN
a(2,2)=H12+Hr12+H23+Hr23
a(2,3)=-(H23+Hr23)
a(3,2)=-2*Fo*(Bi23+Bir23)
a(3,3)=1+2*Fo*(1+Bi23+Bir23)
ELSE
a(2,2)=H12+Hr12+Hf2+Hr23
a(2,3)=-Hr23
a(3,2)=-2*Fo*Bi23
a(3,3)=1+2*Fo*(1+Bif3+Bir23)
ENDIF
a(3,4)=-2*Fo
DO 44 I=4,N-1
a(I,I)=1+Fo
a(I,I-1)=-0.5*Fo
a(I,I+1)=-0.5*Fo
44 CONTINUE
a(N,N-1)=-2*Fo
a(N,N)=1+2*Fo*(1+Bini+Birni)
b(1)=ALPHA1*Gt(J)+Ta(J)*(Hw+Hrw)
IF(Jd.EQ.1) THEN
b(2)=ALPHA2*TAU1*Gt(J)
b(3)=TO(3)+2*Fo1*ALPHA3*TAU1*TAU2*Gt(J)
ELSE
b(2)=ALPHA2*TAU1*Gt(J)+Hf2*Tf
b(3)=TO(3)+2*Fo1*TAU1*TAU2*ALPHA3*Gt(J)+2*Fo*Bif3*Tf
ENDIF
DO 54 I=4,N-1
b(I)=(1-Fo)*TO(I)+0.5*Fo*(TO(I-1)+TO(I+1))
54 CONTINUE
b(N)=TO(N)+2*Fo*(Bini+Birni)*Ti
CALL GS(A,B,T,N,Kmax,Emax,W)
IF(Jd.EQ.1) THEN
Qf=0
ELSE
DO 604 M=1,50
Z=To
Tf=(To+Ti)/2
Rah2=ABS(0.71*2*G*(Tf-T(2))/(Nu**2*(Tf+T(2))))
Rah3=ABS(0.71*2*G*(Tf-T(3))/(Nu**2*(Tf+T(3))))
IF(Rah2.GT.1E9) THEN
Nuf2=(0.825+0.324*Rah2**0.17)**2
ELSE
Nuf2=0.68+0.513*Rah2**0.25
ENDIF
Hf2=Nuf2*LAMBDA/H1
IF(Rah3.GT.1E9) THEN
Nuf3=(0.825+0.324*Rah3**0.17)**2

```

```

ELSE
Nuf3=0.68+0.513*Rah3**0.25
ENDIF
Hf3=Nuf3*LAMBDA/H1
Qf=Hf2*(T(2)-Tf)+Hf3*(T(3)-Tf)
M1=(To+Ti)**(1./3.)
M2=(Qf/C1f)**2
IF(Qf.GE.0) THEN
To=Ti+M1*M2**(1./3.)
ELSE
To=Ti-M1*M2**(1./3.)
ENDIF
Ef=ABS((To-Z)/To)
IF(Ef.LT.1E-8) GO TO 607
604 CONTINUE
607 ENDIF
Hrw=E1*SIGMA*(T(1)+Ta(J))*(T(1)**2+Ta(J)**2)
Hr12=SIGMA*Fe12*(T(1)+T(2))*(T(1)**2+T(2)**2)
Hr23=SIGMA*Fe23*(T(2)+T(3))*(T(2)**2+T(3)**2)
Hrni=S1*SIGMA*(T(N)+Ti)*(T(N)**2+Ti**2)
Rad1=ABS(0.71*2*G*D1**3*(T(2)-T(1))/(Nu**2*(T(2)+T(1))))
Rad2=ABS(0.71*2*G*D2**3*(T(3)-T(2))/(Nu**2*(T(2)+T(3))))
b1=0.288*(Rad1/A1)**0.25
b2=0.288*(Rad2/A2)**0.25
c1=0.039*Rad1**0.33
c2=0.039*Rad2**0.33
IF(b1.GE.c1) THEN
IF(b1.GE.1) THEN
Nu12=b1
ELSE
Nu12=1
ENDIF
ELSE
IF(c1.GE.1) THEN
Nu12=c1
ELSE
Nu12=1
ENDIF
ENDIF
H12=Nu12*LAMBDA/D1
IF(b2.GE.c2) THEN
IF(b2.GE.1) THEN
Nu23=b2
ELSE
Nu23=1
ENDIF
ELSE
IF(c2.GE.1) THEN
Nu23=c2
ELSE
Nu23=1
ENDIF
ENDIF
H23=Nu23*LAMBDA/D2
Rah=ABS(0.71*2*G*H**3*(T(N)-Ti)/(Nu**2*(T(N)+Ti)))
IF(Rah.LE.1E9) THEN
IF(Rah.GE.1E4) THEN
Nuni=0.59*Rah**0.25

```

```

ELSE
GO TO 48
ENDIF
ELSE
IF(Rah.LE.1E12) THEN
Nuni=0.1*Rah**0.33
ELSE
GO TO 48
ENDIF
ENDIF
GO TO 58
48 WRITE(*,*) 'Rah= ',Rah
PAUSE
58 Hni=Nuni*LAMBDA/H
Ep(1)=ABS((Hrw-Y(1))/Hrw)
Ep(2)=ABS((H12-Y(2))/H12)
Ep(3)=ABS((Hr12-Y(3))/Hr12)
Ep(4)=ABS((Hf2-Y(4))/Hf2)
Ep(5)=ABS((H23-Y(5))/H23)
Ep(6)=ABS((Hr23-Y(6))/Hr23)
Ep(7)=ABS((Hf3-Y(7))/Hf3)
Ep(8)=ABS((Hni-Y(8))/Hni)
Ep(9)=ABS((Hrni-Y(9))/Hrni)
DO 117 I=1,9
IF(Ep(I).GT.Epmax) GO TO 263
117 CONTINUE
GO TO 114
263 CONTINUE
114 Quc(J)=(Hni+Hrni)*(T(N)-Ti)
Qu(J)=Quc(J)+Qf
WRITE(*,400) J,T(N)-273,Qu(J),Quc(J),To-273
WRITE(2,400) J,T(N)-273,Qu(J),Quc(J),To-273
IF(Jd.EQ.1) THEN
Tf=(T(2)+T(3))/2
ELSE
Tf=(To+Ti)/2
ENDIF
IF(Tf.LE.Ti) THEN
JJ=1
ELSE
JJ=0
ENDIF
24 CONTINUE
WRITE(*,*) 'LES RESULTATS SONT DANS LE FICHIER:',RESULTAT
GO TO 1111

```

```

c =====
c           Mur massif à double vitrage avec isolation interne
c =====
5000 N=NN+2
      DO 14 I=1,N
      T(I)=291
14    CONTINUE
      T(N+1)=291.001
      T(N+2)=291.001
      To=291
      Tf=291

```

```

Hrw=10
H12=10
Hr12=10
H23=10
Hr23=10
Hrnm=10
Hnf=10
Hmf=10
Hnm=10
Hqi=10
Hrqi=10
JJ=1
WRITE(2,450) 'J', 'Tn', 'Qu', 'Quc', 'Tq', 'To'
DO 26 J=1,Te
DO 99 I=1,N+2
TO(I)=T(I)
99 CONTINUE
Jd=JJ
DO 264 P=1,Pmax
Y(1)=Hrw
Y(2)=H12
Y(3)=Hr12
Y(4)=H23
Y(5)=Hr23
Y(6)=Hnf
Y(7)=Hmf
Y(8)=Hnm
Y(9)=Hrnm
Y(10)=Hqi
Y(11)=Hrqi
Bi23=H23*DX/LAMBDA
Bir23=Hr23*DX/LAMBDA
Binf=Hnf*DX/LAMBDA
Binm=Hnm*DX/LAMBDA
Birnm=Hrnm*DX/LAMBDA
DO 34 I=1,N+2
DO 34 J1=1,N+2
a(I,J1)=0
34 CONTINUE
a(1,1)=Hw+Hrw+H12+Hr12
a(1,2)=-(H12+Hr12)
a(2,1)=-(H12+Hr12)
a(2,2)=H12+Hr12+H23+Hr23
a(2,3)=-(H23+Hr23)
a(3,2)=-2*Fo*(Bi23+Bir23)
a(3,3)=1+2*Fo*(1+Bi23+Bir23)
a(3,4)=-2*Fo
DO 144 I=4,N-1
a(I,I)=1+Fo
a(I,I-1)=-0.5*Fo
a(I,I+1)=-0.5*Fo
144 CONTINUE
a(N,N-1)=-2*Fo
IF(Jd.EQ.1) THEN
a(N,N)=1+2*Fo*(1+Binm+Birnm)
a(N,N+1)=-2*Fo*(Binm+Birnm)
a(N+1,N)=-(Hnm+Hrnm)
a(N+1,N+1)=Hnm+Hrnm+(LAMBDAi/Di)

```

```

ELSE
a(N,N)=1+2*Fo*(1+Binf+Birnm)
a(N,N+1)=-2*Fo*Birnm
a(N+1,N)=-Hrnm
a(N+1,N+1)=Hrnm+Hmf+(LAMBDAi/Di)
ENDIF
a(N+1,N+2)=- (LAMBDAi/Di)
a(N+2,N+1)=- (LAMBDAi/Di)
a(N+2,N+2)=Hqi+Hrqi+(LAMBDAi/Di)
b(1)=ALPHA1*Gt(J)+Ta(J)*(Hw+Hrw)
b(2)=ALPHA2*TAU1*Gt(J)
b(3)=T0(3)+2*Fo1*TAU1*TAU2*ALPHA3*Gt(J)
DO 153 I=4,N-1
153 b(I)=(1-Fo)*T0(I)+0.5*Fo*(T0(I-1)+T0(I+1))
CONTINUE
IF(Jd.EQ.1) THEN
b(N)=T0(N)
b(N+1)=0
ELSE
b(N)=T0(N)+2*Fo*Binf*Tf
b(N+1)=Hmf*Tf
ENDIF
b(N+2)=(Hqi+Hrqi)*Ti
CALL GS(A,B,T,N+2,Kmax,Emax,W)
IF(Jd.EQ.1) THEN
Qf=0
ELSE
DO 605 M=1,50
Z=Te
Ti=(To+Ti)/2
Rahn=ABS(0.71*2*G*H1**3*(Tf-T(N))/(Nu**2*(T(N)+Tf)))
Rahm=ABS(0.71*2*G*H1**3*(Tf-T(N+1))/(Nu**2*(T(N+1)+Tf)))
IF(Rahn.GT.1E9) THEN
Nunf=(0.825+0.324*Rahn**0.17)**2
ELSE
Nunf=0.68+0.513*Rahn**0.25
ENDIF
Hnf=Nunf*LAMBDAA/H1
IF(Rahm.GT.1E9) THEN
Numf=(0.825+0.324*Rahm**0.17)**2
ELSE
Numf=0.68+0.513*Rahm**0.25
ENDIF
Hmf=Numf*LAMBDAA/H1
Qf=Hnf*(T(N)-Tf)+Hmf*(T(N+1)-Tf)
M1=(To+Ti)**(1./3.)
M2=(Qf/C1f)**2
IF(Qf.GT.0) THEN
To=Ti+M1*M2**(1./3.)
ELSE
To=Ti-M1*M2**(1./3.)
ENDIF
Ef=ABS((To-Z)/To)
IF(Ef.LE.1E-8) GO TO 606
605 CONTINUE
606 ENDIF
Hrw=E1*SIGMA*(T(1)+Ta(J))*(T(1)**2+Ta(J)**2)
Hr12=SIGMA*Fe12*(T(1)+T(2))*(T(1)**2+T(2)**2)

```

```

Hr23=SIGMA*Fe23*(T(2)+T(3))*(T(2)**2+T(3)**2)
Hrnm=SIGMA*Fenm*(T(N)+T(N+1))*(T(N)**2+T(N+1)**2)
Hrqi=S2*SIGMA*(T(N+2)+Ti)*(T(N+2)**2+Ti**2)
Rad1=ABS(0.71*2*G*D1**3*(T(2)-T(1))/(Nu**2*(T(2)+T(1))))
Rad2=ABS(0.71*2*G*D2**3*(T(3)-T(2))/(Nu**2*(T(2)+T(3))))
Rad3=ABS(0.71*2*G*D3**3*(T(N+1)-T(N))/(Nu**2*(T(N+1)+T(N))))
b1=0.288*(Rad1/A1)**0.25
b2=0.288*(Rad2/A2)**0.25
b3=0.288*(Rad3/A3)**0.25
c1=0.039*Rad1**0.33
c2=0.039*Rad2**0.33
c3=0.039*Rad3**0.33
IF(b1.GE.c1) THEN
IF(b1.GE.1) THEN
Nu12=b1
ELSE
Nu12=1
ENDIF
ELSE
IF(c1.GE.1) THEN
Nu12=c1
ELSE
Nu12=1
ENDIF
ENDIF
H12=Nu12*LAMBDA/D1
IF(b2.GE.c2) THEN
IF(b2.GE.1) THEN
Nu23=b2
ELSE
Nu23=1
ENDIF
ELSE
IF(c2.GE.1) THEN
Nu23=c2
ELSE
Nu23=1
ENDIF
ENDIF
H23=Nu23*LAMBDA/D2
IF(b3.GE.c3) THEN
IF(b3.GE.1) THEN
Nunm=b3
ELSE
Nunm=1
ENDIF
ELSE
IF(c3.GE.1) THEN
Nunm=c3
ELSE
Nunm=1
ENDIF
ENDIF
Hnm=Nunm*LAMBDA/D3
Rah=ABS(0.71*2*G*H**3*(T(N+2)-Ti)/(Nu**2*(T(N+2)+Ti)))
IF(Rah.LE.1E9) THEN
IF(Rah.GE.1E4) THEN

```

```

      Nuqi=0.59*Rah**0.25
      ELSE
      GO TO 145
      ENDIF
      ELSE
      IF(Rah.LE.1E12) THEN
      Nuqi=0.1*Rah**0.33
      ELSE
      GO TO 145
      ENDIF
      ENDIF
      GO TO 155
145  WRITE(*,*) 'Rah= ',Rah
      PAUSE
155  Hqi=Nuqi*LAMBDA/H
      Ep(1)=ABS((Hrw-Y(1))/Hrw)
      Ep(2)=ABS((H12-Y(2))/H12)
      Ep(3)=ABS((Hr12-Y(3))/Hr12)
      Ep(4)=ABS((H23-Y(4))/H23)
      Ep(5)=ABS((Hr23-Y(5))/Hr23)
      Ep(6)=ABS((Hnf-Y(6))/Hnf)
      Ep(7)=ABS((Hmf-Y(7))/Hmf)
      Ep(8)=ABS((Hnm-Y(8))/Hnm)
      Ep(9)=ABS((Hrnm-Y(9))/Hrnm)
      Ep(10)=ABS((Hqi-Y(10))/Hqi)
      Ep(11)=ABS((Hrqi-Y(11))/Hrqi)
      DO 106 I=1,11
      IF(Ep(I).GT.Epmax) GO TO 264
106  CONTINUE
      GO TO 116
264  CONTINUE
116  Quc(J)=(Hqi+Hrqi)*(T(N+2)-Ti)
      Qu(J)=Quc(J)+Qf
      WRITE(*,400) J,T(N)-273,Qu(J),Quc(J),T(N+2)-273,To-273
      WRITE(2,400) J,T(N)-273,Qu(J),Quc(J),T(N+2)-273,To-273
      IF(Jd.EQ.1) THEN
      Tf=(T(N)+T(N+1))/2
      ELSE
      Tf=(To+Ti)/2
      ENDIF
      IF(Tf.LE.Ti) THEN
      JJ=1
      ELSE
      JJ=0
      ENDIF
26  CONTINUE
400  FORMAT(4X,I3,4X,F8.2,4X,F9.2,3X,F8.2,3X,F8.2,3X,F8.2)
450  FORMAT(6X,A,9X,A,10X,A,9X,A,8X,A,8X,A)
      WRITE(*,*) 'LES RESULTATS SONT DANS LE FICHER: ',RESULTAT
1111 STOP
      END

```

```
C -----  
C   METHODE DE RELAXATION POUR LA RESOLUTION DE [A](T)=(B)  
C -----  
      SUBROUTINE GS(A,B,T,N,Kmax,Emax,W)  
      DIMENSION A(100,100),B(100),E(100),X(100),T(100)  
      DO 510 K=1,Kmax  
      DO 505 I=1,N  
      X(I)=T(I)  
505   CONTINUE  
      DO 520 I=1,N  
      S1=0  
      DO 530 J=I,N  
      S1=S1+a(I,J)*T(J)  
530   CONTINUE  
      S2=0  
      DO 540 J=1,I-1  
      S2=S2+a(I,J)*T(J)  
540   CONTINUE  
      T(I)=T(I)+W*(b(I)-S1-S2)/a(I,J)  
520   CONTINUE  
      DO 550 I=1,N  
      E(I)=ABS(T(I)-X(I))  
550   CONTINUE  
      DO 560 I=1,N  
      IF(E(I).GE.Emax) GO TO 510  
560   CONTINUE  
      GO TO 600  
510   CONTINUE  
c600  WRITE(*,607) 'k=',K  
c607  FORMAT(2X,A,1X,I4)  
600   RETURN  
      END
```

FIN DU PROGRAMME

# BIBLIOGRAPHIE

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Z. ZRIKEM et B. BILGEN, Theoretical study of a composite TROMBE-MICHEL wall solar collecteur system, Solar Energy, VOL.39, p 409-419 (1987).
- [2] : N. KHIREDDINE, Détermination des performances énergétiques de parois opaques de bâtiment, Thèse de Magister de l'université de Constantine.
- [3] : F.P. INCROPERA et D.P. DEWITT, Fundamentals of heat and Mass transfert, Second édition.
- [4] : J.A. DUFFIE et W.A. BECKMAN, Solar Engineering of thermal processes, Wiley, New York (1980).
- [5] : N.E. WIJEYSUNDERA, A net radiation method for the transmittance and absorptivity of a series of parallel regions, Solar Energy, VOL.23, p75-77 (1975).
- [6] : J.D. BALCOMB et C.D. BARLEY, Passive Solar Design Handbook, VOL.11, Washington (1980).
- [7] : G.D. RAITHBY et K.G.T. HOLLANDS, Analysis of heat transfert by natural convection across vertical fluid layers, J. Heat Transfert, 99, 287-293, (1977).
- [8] : S.W. CHURCHILL et H. CHU, Correlating Equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, J. Heat and Mass Transfer, 18, 1323-1329 (1975).
- [9] : N.M. OZISIK, Basic Heat Transfer, Mc graw-Hill, New York (1977).
- [10] : F. TROMBE, Maisons Solaires, Techniques de l'ingenieur 3, C777 (1974).

- [11]: J. LAFON, Chauffage, Pr evision de consommations, Techniques de l'ing enieur, VOL. Chauffage, Paris (1972).
- [12]: D.M. UTZINGER et S.A. KLEIN, The effect of air flow rate in collector-storage walls, Solar Energy VOL.28, p 511-519 (1980).
- [13]: A.AKBARZADEH et D.A. LESSLIE, Thermocirculation characteristics of a Trombe wall passive test cell, Solar Energy, VOL.25, p 461-468 (1982).
- [14]: T.R. BORGERST et H.AKBARI, Free convective turbulent flow within the Trombe wall channel, Solar Energy, VOL.33, p 253-264 (1984).
- [15]: J.F. SACADURA, Initiation aux transferts thermiques, Techniques et documentations, Paris (1982).
- [16]: R. PEYTURAUX, L' nergie Solaire, 'Que Sais-je' N.1224, Deuxième  dition.
- [17]: CH. CHAUIIGUE, P. BARATCABAL, Energie Solaire dans le bâtiment, Edition Eynolles, 4 ed. (1981).
- [18]: R. DUMON, Energie Solaire et stockage d'énergie, Masson 77.
- [19]: CH. PERRIN et CH. VAUGE, Le gissement solaire (Evaluation de la ressource énergétique).