

50376  
1991  
204

N° d'ordre : 727

65 902

50376  
1991  
204

## THESE

Présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE FLANDRES ARTOIS

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

spécialité : électronique

par

**Kaddour LATEF**

**CONTRIBUTION : A LA PROPAGATION DES ONDES , AUX TRANSFERTS  
THERMIQUES DANS LES MATERIAUX MULTICOUCHES ET AUX  
MODELISATIONS DES ECHANGES THERMIQUES .**



Soutenu le 30 mai 1991 devant la Commission d'Examen :

Membres de Jury

MM

A . CHAPOTON	Président
A . LEBRUN	Directeur de thèse
P . THERY	Rapporteur
R . TORGUET	Rapporteur
C . DRUON	Examineur
D . LECLERCQ	Examineur
P . LOOSFELT	Examineur

A ma mère , à mon père  
à ma famille  
à tous ceux qui me sont chers...

## AVANT PROPOS

*Monsieur Le Professeur A. LEBRUN m'a accueilli dans le laboratoire de "mesure automatique", université des sciences et techniques de Lille I*

*Je tiens à le remercier de m'avoir confié ce travail, de sa disponibilité, de ses orientations.*

*Je tiens à remercier Monsieur CHAPOTON pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury de cette thèse.*

*Je remercie Messieurs les Professeurs THERY et TORGUET pour l'honneur qu'ils me font de juger ce travail.*

*Mes remerciements vont également à Messieurs DRUON, LECLERCQ, LOOSFELT qui ont acceptés de participer au jury.*

*Mes remerciements à Monsieur DEHORTER qui assuré l'impression de ce document.*

## SOMMAIRE

**Contribution : aux propagations d'ondes et transferts thermique dans un ensemble multicouche , modélisation des échanges thermiques .**

0) INTRODUCTION .....	1
I) CHAPITRE UN: Propagation des ondes E.M dans les matériaux homogènes .	
I.1 Introduction .....	6
I.2 Rappels sur l'étude d'une propagation aux ondes E.M.....	9
I.3 Etude des systèmes multicouche en hyperfréquence.....	11
I.3.1 Etude d'un matériau monocouche.....	11
I.3.2 Etude des matériaux multicouches.....	15
II) CHAPITRE DEUX : Etude des transfert thermique dans les ensembles multicouches .	
II.1 Introduction.....	19
II.2 Notion de propagation "fictive" équivalente à un transfert thermique de conduction en régime harmonique .....	20
II.3 Etude de la conduction thermique des matériaux en régime harmonique.....	25
II.3.1 Matériau unique.....	26
II.3.2 Ensemble multicouche .....	32
II.4 Etude thermique des matériaux mono et multicouches en fonction du temps ..	37
II.4.1 Matériau unique.....	37
II.4.2 Ensemble multicouche .....	40
II.4.3 Application à une paroi multicouche réelle ( bâtiment ).....	43
III CHAPITRE TROIS : Etude thermique expérimentale d' un local .	
III.1 Introduction .....	45
III.2 Etude de la structure légère configuration I .....	47
III.3 Etude de la structure mi-légère configuration II.....	66

III.4 Etude de la structure mi-lourde configuration III.....	74
III.5 Etude de la structure lourde configuration IV.....	81
III.6 Conclusion.....	85
IV CHAPITRE QUATRE : Modélisation thermique d'un local.	
IV.1 Introduction.....	88
IV.2 Modèle du régime permanent : analyses des réponses des parois.....	92
IV.3 Hypothèses pour obtenir un schéma en régime transitoire.....	96
IV.4 Rapport " impédance temporelle " des parois d'habitat.....	98
IV.4.3 Comparaison des résultats expérimentaux aux résultats théoriques.....	99
IV.5 Analyses des quotients .Flux entrant dans les parois - gradients de température air ambiant , face interne des parois .....	105
IV.6 Conclusion.....	112
IV.7 Essai de modèle simplifié pour l'analyse des températures et des flux dans un local d'habitation .....	114
IV.8 Comparaison des valeurs simulées aux valeurs expérimentales.....	118
IV.9 Conclusion.....	120
V)CHAPITRE CINQ : Dispositif expérimental	
V.1 Introduction.....	118
V.2 Présentation du local.....	118
V.3 Extraction d'air .....	119
V.4 Sources thermiques.....	119
V.5 Mesure des flux.....	121
V.6 Mesure des températures.....	123
V.7 Description du dispositif technique.....	124
VI) CONCLUSION.....	131
VII) ANNEXES.....	134
VIII) BIBLIOGRAPHIE.....	145

## INTRODUCTION

Notre travail est relatif aux propagations et aux transferts thermiques dans les systèmes multicouches , il comporte deux parties .

La première partie est centrée sur : les propagations , les transferts et les analogies .

La deuxième partie porte sur une étude expérimentale et une modélisation des transferts thermiques d'un local .

Le développement actuel des matériaux en particulier les matériaux multicouches demande un effort de caractérisation des propriétés des matériaux et de leurs associations et ceci dans tous les domaines de la physique , propriétés électriques , acoustiques , optiques , thermiques , mécaniques , etc...[1] , [2] .

Précisons les données de bases relatives aux propagations d'ondes ( électromagnétiques , optiques , ... ) dans les matériaux , les données sont bien connues mais la présentation des analogies entre les modes de traitement de ces propagations et les possibilités de généralisation d'une part dans les matériaux homogènes linéaires et dans les ensembles multicouches de matériaux est difficile à trouver dans la littérature [2] .

Les problèmes sont du type :

A partir des coefficients linéiques des matériaux relatifs à un type d'onde peut-on généraliser en introduisant des grandeurs annexes : impédance caractéristique , constante de propagation ?

La généralisation est-elle plus commode à partir de la notion de quadripôle ou à partir des notions de coefficient de réflexion , de transmission en particulier pour comprendre les problèmes des matériaux multicouches ?

Un deuxième groupe de problèmes est lié aux transferts d'énergie et aux transferts d'impulsions , certains transferts peuvent en première approximation être assimilés à des propagations " fictives " ce qui permet d'introduire les mêmes analogies et les mêmes modes de résolution des problèmes que pour la transmission .

La méthode du quadripôle " fictif " équivalent permet - elle de résoudre les problèmes de conduction thermique ou mécanique dans les matériaux multicouches ? et d'introduire les méthodes harmoniques et les méthodes en fonction du temps ?

L'objectif final des mesures est de définir de nouveaux matériaux ayant des propriétés données dans des domaines imposés ; il faut aussi montrer que les transferts : en thermique , en mécanique sont analogues à des propagations : ondes électromagnétiques , acoustiques , optiques,...

Il faut que dans le domaine considéré les matériaux soient linéaires et isotropes et qu'il n' y ait pas de conditions initiales.

Les méthodes et les logiciels utilisés doivent être applicables dans tous les domaines de la physique si on tient compte des conditions citées ci-dessus [3].

La première partie de notre travail chapitres I et II et annexe A est relative aux propagations réelles et fictives .

Le chapitre I est lié à la généralisation de la propagation des ondes électromagnétiques planes dans les milieux "diélectriques magnétiques " mono et multicouches et le choix des grandeurs annexes qui soient généralisables : impédance caractéristique , constante de propagation, coefficient de la matrice de chaîne du quadripôle élémentaire , systèmes multicouches et quadripôle équivalent réalisation de logiciels adaptés pour l'étude des problèmes en fonction de la fréquence et en fonction du temps .

Nous montrons en annexe A que les méthodes valables pour les ondes électromagnétiques sont utilisables pour certains types d'ondes acoustiques .

Pour conserver des notions globales nous considérons les transmissions ( air libre et lignes coaxiales ) .

Nous utilisons pour les tronçons de ligne remplie de matériaux , des quadripôles équivalents à partir des équations de propagation ( équations des télégraphistes ) [4] ou à partir des équations de MAXWELL [5] , nous montrons que l'introduction systématique des grandeurs complexes : impédance caractéristique et constante de propagation permet de caractériser facilement un tronçon de ligne de longueur  $l$  et d'obtenir à volonté soit des coefficients de matrice de chaîne , soit des coefficients de réflexion , de transmission ...

Nous traitons ensuite dans le deuxième chapitre le problème des transferts thermiques en régime harmonique de conduction et en régime transitoire fonction du temps pour des matériaux homogènes et linéaires en assimilant le transfert thermique à une propagation " fictive " d'ondes thermiques et par analogie nous définissons une notion d'impédance caractéristique " fictive " , une constante de propagation " fictive " , nous déterminons les coefficients de la matrice de chaîne et nous tentons de définir et de donner une interprétation du coefficient de réflexion d'entrée .

Nous étudions la conduction thermique des matériaux mono et multicouches en régime harmonique .

Nous faisons ensuite l'étude thermique des matériaux mono et multicouches en fonction du temps en régime établi et en régime transitoire et l'application à un ensemble multicouche réel appliqué au bâtiment .

Nous mettons en évidence le rôle d'un matériau léger : isolant ( par exemple le polystyrène extrudé ) dans le confort et l'économie d'énergie dans l'habitat .

La deuxième partie de notre travail chapitre III et IV est relative à l'étude thermique expérimentale et à une modélisation d'un local .

Dans le chapitre trois nous donnons les résultats d'une étude expérimentale d'un local aveugle de 14 m<sup>3</sup> de volume .

Nous étudions les réponses des parois pour trois modes de chauffage : chauffage par le sol par câble résistif , chauffage majoritairement radiatif utilisé couramment et chauffage majoritairement convectif utilisé aussi couramment et ceci pour deux modes de renouvellement d'air : extraction naturelle ( faible ) et extraction moyenne ( un volume par heure ) .

Nous étudions quatre types de structures du local :

- structure légère configuration I : plafond , plancher et parois latérales isolées intérieurement sauf une paroi lourde ( béton ) .
- structure mi-légère configuration II : structure I avec une paroi latérale plâtre .
- structure mi-lourde configuration III : structure II avec une deuxième paroi latérale lourde ( béton ) .
- structure lourde configuration IV : structure III avec plancher lourd ( béton ) .

Nous étudions les influences des parois plafond et plancher isolés et le rôle joué par le plafond et le plancher dans le chauffage du local .

Dans le quatrième chapitre , à partir des études expérimentales , nous proposons un modèle thermique du local expérimental en n'oubliant pas que des milliers de modèles thermiques ont déjà été proposés [6] , [8] , [7] .

Nous donnons un modèle amélioré du local en régime permanent en tenant compte d'un certain nombre de paramètres : influence de la source de chauffage , influence du plancher sur la stratification des couches d'air , influence de l'extraction d'air , ....

Nous posons quelques hypothèses pour obtenir un modèle du local en régime transitoire - modèle simplifié qui à notre connaissance n'existe pas dans la littérature -

Nous déterminons les impédances temporelles des parois mono et multicouches .

Dans un premier temps , nous comparons les résultats simulés aux résultats expérimentaux .

Nous déterminons les rapports des impédances temporelles - gradients de température des parois pour préciser la notion de coefficient d'échange thermique  $h$  , entre source et parois et nous donnons les valeurs de  $h$  du modèle simple proposé du local .

Nous comparons les valeurs simulées aux valeurs expérimentales .

Le modèle simplifié restant insuffisant , nous précisons des évolutions possibles.

Dans le chapitre cinq , nous présentons le dispositif expérimental que nous avons utilisé pour réaliser les expériences .

Les annexes sont relatives :

Annexe A . Nous donnons une approche à l'étude des ondes acoustiques dans les matériaux homogènes , linéaires et isotropes par la méthode du quadripôle équivalent en utilisant un logiciel adapté .

Nous déterminons une constante de propagation et une impédance caractéristique du matériau .

Annexe B : Nous donnons la résolution de l'équation de diffusion de la chaleur .

Nous développons le calcul de l'impédance d'entrée " fictive " d'un matériau monocouche en thermique par la méthode du quadripôle équivalent .

Nous généralisons le calcul de l'impédance d'entrée " fictive " pour un ensemble multicouche .

PREMIER CHAPITREI.1 INTRODUCTION

La propagation des ondes : électromagnétiques , acoustiques , mécaniques , etc... , dans les milieux multicouches est très développée dans les ouvrages classiques mais les notations , les méthodes très différentes , pour chacune des propagations , laissent les étudiants et les chercheurs désemparés . Les efforts faits pour une discipline donnée , par exemple les ondes électromagnétiques , sont peu considérés par les chercheurs de l'acoustique de la mécanique par ailleurs des transferts qui peuvent dans certaines conditions être considérées par analogie comme des "propagations fictives" ne sont pas souvent associées aux propagations réelles .

Rappelons le problème de base:

Une onde ( E. M par exemple ) rencontre un milieu multicouche , chaque couche étant caractérisée par des coefficients caractéristiques et par son épaisseur - les problèmes sont complexes-

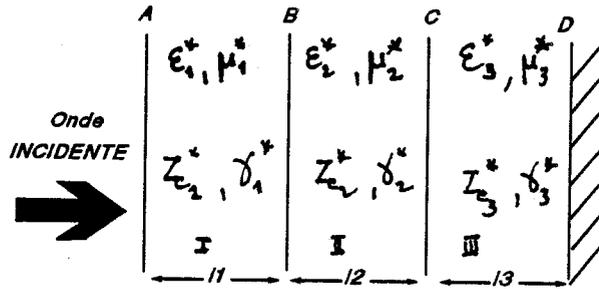
- L'onde peut être : plane , l'incidence normale , mais surtout les matériaux peuvent être isotropes , homogènes ou les matériaux peuvent être des mélanges plus ou moins complexes.

- Les surfaces d'entrée sont planes ou granuleuses relativement à la longueur d'onde .

Les remarques qui suivent sont relatives à :

- des ondes E.M , acoustiques , mécanique... planes .
- des milieux homogènes et isotropes .
- des surfaces de séparation , entre les milieux , planes.

Les ondes sont normales à la surface d'entrée.



### Les méthodes d'étude

Les matériaux sont d'abord caractérisés par des coefficients linéiques : permittivité électrique complexe  $\epsilon^* = \epsilon'_1 - j\epsilon''_1$  ; perméabilité magnétique complexe  $\mu^* = \mu'_1 - j\mu''_1$  pour les ondes électromagnétiques .

Pour les ondes acoustiques  $M^* = M' - jM''$  module complexe d'élasticité acoustique<sup>(1)</sup>  
 A partir des coefficients linéiques , on peut obtenir des grandeurs dérivées par exemple constante de propagation et impédance caractéristique qui ne sont liées pour un type d'onde donné qu'au matériau

Un troisième groupe de coefficients est lié au système choisi et en particulier les méthodes liées aux coefficients de réflexion et aux coefficients de transmission et les méthodes liées aux coefficients de la matrice de chaîne.

A notre avis une méthode favorable pour généraliser : la notion de propagation et la " propagation fictive " équivalente à des transferts<sup>(2)</sup> dans les systèmes multicouches [9]  
 [2] est la suivante:

- Connaître ou mesurer les coefficients linéiques , pour les ondes considérées , des matériaux constituants .

(1)  $V^*(f) = \sqrt{M^* / \rho}$  :  $V^*(f)$  vitesse complexe ;  $\rho$  masse volumique .

(2) en particulier en thermique.

- Obtenir les grandeurs caractéristiques : constante de propagation et impédance caractéristique .

- Déterminer les coefficients de matrice de chaîne de chaque matériau et définir des impédances ou des admittances à partir de logiciels adaptés [4] [3] .

- Obtenir l' influence dans le plan d'entrée des systèmes multicouches à partir de méthodes matricielles et de logiciels appropriés [10].

- Passer s'il y a lieu aux coefficients de réflexion , de transmission etc ...

Pour bien comprendre la méthode , nous présentons successivement :

1 - Un système multicouche aux ondes E.M

2 - Un système en transfert thermique

3- En annexe un système multicouche aux ondes acoustiques.

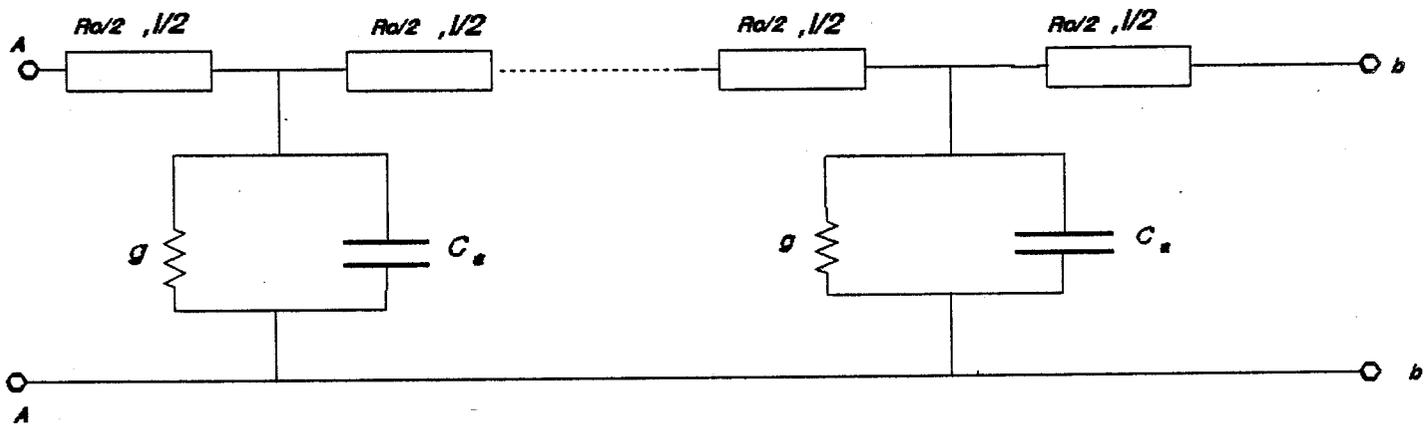
## I.2 RAPPELS SUR L'ETUDE D'UNE PROPAGATION AUX ONDES E.M

Nous montrons par la théorie des lignes de transmissions [4] et par la théorie de Maxwell [5] l'importance des coefficients linéiques de l'impédance caractéristique et de la constante de propagation  $Z_c^*$  ;  $\gamma_c^*$ .

Rappelons que les matériaux et éventuellement l'air sont caractérisés par les grandeurs complexes permittivité  $\epsilon^*$  et perméabilité  $\mu^*$ .

### I.2.1 Ligne de transmission

Un tronçon de ligne est équivalent au schéma ci-dessous où  $r$ ,  $l$ ,  $c$ ,  $g$  sont des coefficients par unité de longueur. Matériaux à constantes réparties



Tronçon de ligne

A partir des équations des télégraphistes, on définit une constante de propagation  $\gamma$  par :

$$\gamma^* = \sqrt{zy} = \alpha + j\beta$$

L'impédance caractéristique  $Z_c^* = \sqrt{z/y}$

Avec

$z = r + j\omega l$  impédance linéique série

$y = g + j\omega c$  admittance linéique shunt de la ligne.

Pour une ligne avec diélectrique  $\epsilon^*$ ,  $\mu^*$

$$Z_c^* = 1/c \sqrt{1/\mu^* \epsilon^*} \quad ; \quad \gamma^* = j \omega/c \sqrt{\epsilon^* \mu^*}$$

La matrice de chaîne de ce tronçon de ligne est

$$a = \begin{bmatrix} \operatorname{Ch} \gamma l & Z_c^* \operatorname{Sh} \gamma l \\ \frac{\operatorname{Sh} \gamma l}{Z_c^*} & \operatorname{Ch} \gamma l \end{bmatrix}$$

*Matrice chaîne*

### 1.2.2 Equations de Maxwell.

A partir des équations de Maxwell nous obtenons l'impédance caractéristique  $Z_c^*$   
 $= E/H = \sqrt{\mu^*/\epsilon^*}$  identique à  $Z_c^*$  obtenue par la théorie des lignes, la constante de propagation  $\gamma = j \omega \sqrt{\mu^* \epsilon^*}$

Donc l'étude d'un milieu " diélectrique magnétique " peut s'effectuer à partir de la théorie des quadripôles.

### I.3 ETUDE DES SYSTEMES MULTICOUCHES EN HYPERFREQUENCE.

Pour comprendre les influences des paramètres perméabilité  $\mu', \mu''$ , permittivité  $\epsilon', \epsilon''$  des matériaux sur les ensembles multicouches, nous présentons :

-D'une part la réponse de matériaux monocouches d'épaisseur  $5.10^{-3}m$  dans la bande de fréquence 0.1GHZ-20GHZ. On admet que les paramètres sont des constantes dans cette bande de fréquence .

-D'autre part la réponse d'un système multicouche réalisé à partir de monocouches dont les caractéristiques sont connues.

Un logiciel adapté [2] permet de calculer et de connaître les grandeurs caractéristiques impédance, admittance, coefficient de réflexion à partir des coefficients linéiques .

Le tableau I<sub>1</sub> ci-dessous donne pour quelques matériaux des valeurs de  $\mu', \mu'', \epsilon'$  et  $\epsilon''$ , le module et la phase de l'admittance caractéristique, la partie réelle et la partie imaginaire de la constante de propagation.

Matériau	$\epsilon^*$	$\mu^*$	l(m)	$ Y_c $	$ Y_c  \theta$	A	B
1	4-2j	1-0j	5.10	2.11	-.23	.49	2
2	8-j	12-4j	5.10	.8	-.09	2.22	9.85
3	8-j	8-j	5.10	1	0	1	8

Tableau I<sub>1</sub>

#### I.3.1 Etude d'un matériau monocouche.

Nous présentons dans un abaque de Smith modulaire figure I ( fréquence variable ) - propagation en mode T.E.M - et pour les trois matériaux d'épaisseur  $5.10^{-3} m$  l'admittance d'entrée en fonction de la fréquence .

Remarque sur l'allure des courbes (pseudo-spirales)obtenues.

I.3.1.a Matériau 1  $\epsilon' = 4, \epsilon'' = 2, \mu' = 1, \mu'' = 0$  (diélectrique pur)

-L'admittance caractéristique a pour valeur  $Y_c = 2.11 \angle -0.23 \text{rd}$ .

Pour des fréquences infinies l'admittance d'entrée plan aa tend vers l'admittance caractéristique (coefficient de réflexion  $\rho < 1$  ). Schéma figure I<sub>1</sub> page 16 .

Il faut une fréquence supérieure à 20GHz pour obtenir un tour d'abaque . Rappelons que  $\epsilon' = 4; \epsilon'' = 2; \mu' = 1$  et alors l'admittance d'entrée est voisine de l'admittance caractéristique ( coefficient de réflexion  $\rho < 1$  )

L'adaptation du matériau aux ondes E.M incidentes est impossible pour ce matériau.

A une fréquence  $f = 7\text{GHz}$ , on a la valeur la plus proche de l'adaptation  $Y_c \approx 0.73 \angle -0.27 \text{rd}$ .

I.3.1.b Matériau 2  $\epsilon' = 8; \epsilon'' = 1; \mu' = 12; \mu'' = 4$ ; non symétrique en  $\mu^*$  et  $\epsilon^*$

-Le matériau a un point asymptôte en admittance à fréquence infinie de  $0.8 \angle -0.09 \text{rd}$ , sa constante de propagation  $B = 9.85$  (coefficient de réflexion  $\rho < 0.13 \angle -0.09$ ).

Ce matériau s'enroule rapidement pratiquement pour une fréquence  $f > 3\text{GHz}$  , l'admittance d'entrée ( voisine de l'admittance caractéristique  $Y_c = 0.71 \angle -0.09 \text{rd}$  ) est constante :schéma figure I<sub>2</sub> .

L'adaptation du matériau aux ondes incidentes  $f > 3\text{GHz}$  est bonne ( coefficient de reflexion  $\rho < 0.13 \angle -0.09$  ) .

L'allure de la courbe montre l'influence de la dissymétrie du matériau en  $\mu^*$  et  $\epsilon^*$ .

I.3.1.c Matériau 3  $\epsilon' = 8; \epsilon'' = 1; \mu' = 8; \mu'' = 1$ ; symétrique en  $\mu^*$  et  $\epsilon^*$

-On a un matériau quasi-idéal ( corps noir ) pour une adaptation aux ondes

électromagnétiques incidentes  $Y_c = 110$ ,  $B=8$  schéma figure I<sub>2</sub>.

Le lieu de l'admittance d'entrée pour un matériau symétrique et de longueur 5mm est atteint pour les fréquences  $f > 2$  GHz. Le coefficient de réflexion d'entrée est 0

Remarquons que le lieu de l'admittance d'entrée pour un matériau d'épaisseur dix fois plus petite  $0.5 \cdot 10^{-3}$ m est atteint pour les fréquences  $f > 6$ GHz. Le coefficient de réflexion est alors voisin de 0.

#### I.3.1.d Conclusion:

L'ensemble des courbes montrent l'influence de la symétrie de  $\mu^*$  et  $\epsilon^*$  et l'intérêt du choix de la valeur absolue de  $\mu^*$  et de  $\epsilon^*$  (valeur de B) pour l'adaptation aux ondes incidentes.

Nous montrons par ces trois exemples que pour avoir une bonne adaptation aux ondes incidentes, il faut choisir des matériaux plus ou moins symétriques en permittivité complexe et en perméabilité complexe.

Ces types de matériaux sont quelque fois difficile à préparer, à notre connaissance des matériaux de ce type existent en particulier aux USA.

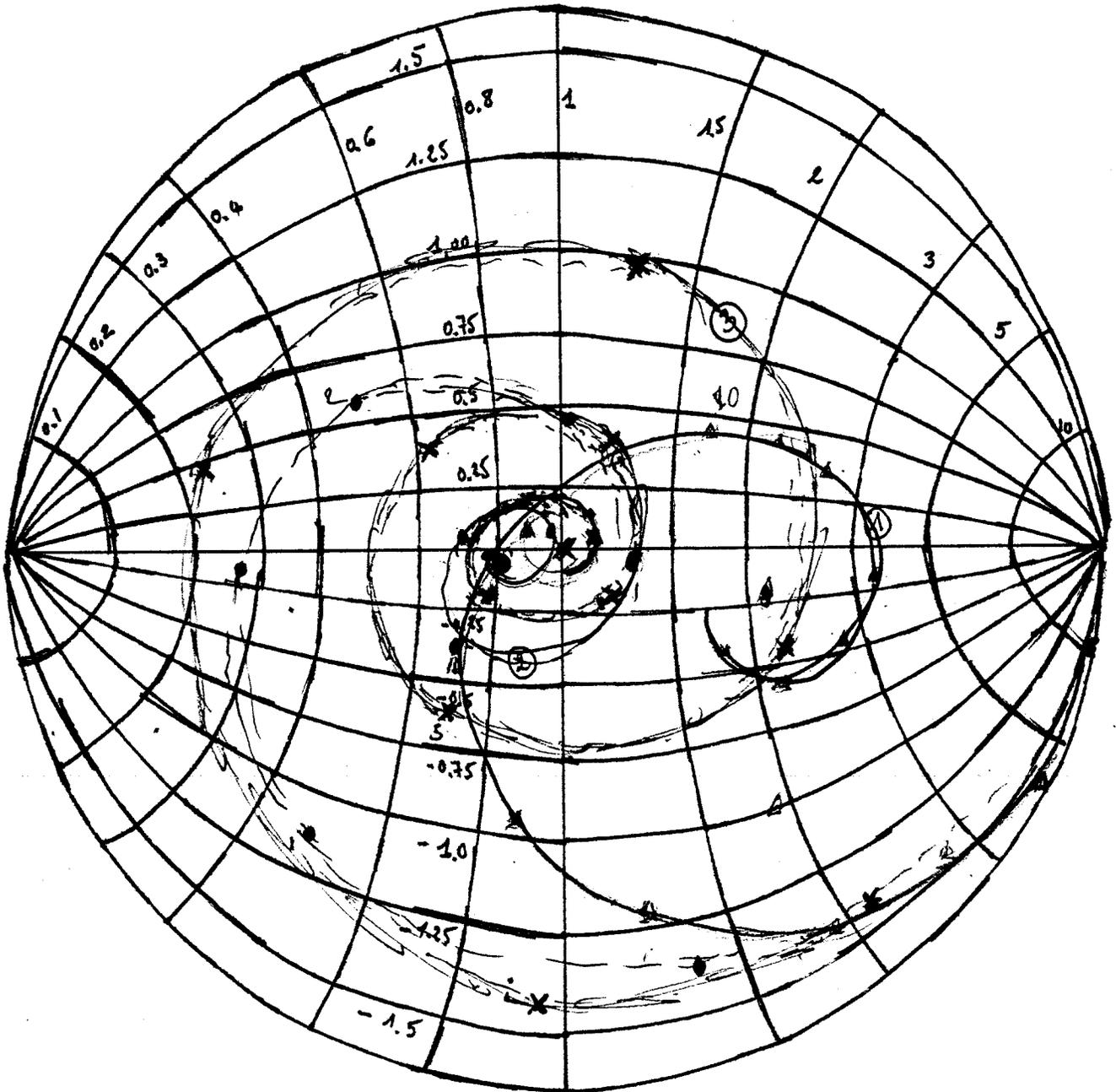


Figure 1<sub>2</sub>

- [1] Matériau diélectrique pur
- [2] Matériau non symétrique en  $\epsilon$  et en  $\mu$
- [3] Matériau symétrique en  $\epsilon$  et en  $\mu$

### 1.3.2 Etude des matériaux multicouches.

Nous étudions des systèmes multicouches réalisés par association des monocouches étudiés.

Le tableau I<sub>2</sub> ci-dessous donne les différentes associations étudiées.

Système	Configuration	l (cm)	Y <sub>c</sub>	φ	A	B			
E <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr></table>	1	2	3	A	3x5	2.11	-0.23	.49	2.06
1	2	3							
E <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr></table>	3	2	1	B	3x5	1	0	1	8
3	2	1							
E <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>3</td><td>2</td></tr></table>	1	3	2	C	3x5	2.11	-0.23	.49	2.06
1	3	2							

Tableau I<sub>2</sub>

Nous présentons seulement le module et la phase du coefficient de réflexion à l'entrée du système multicouche en fonction de la fréquence . Nous disposons d'ailleurs de toutes les autres informations au niveau des interfaces .

Les schémas figures I<sub>4</sub> et I<sub>5</sub> représentent le module et la phase du coefficient de réflexion plan aa du système multicouche .

#### 1.3.2.a. Configuration A (1,2,3)Matériau 1 en tête .

La présence en tête du complexe tricouche du matériau diélectrique pur masque partiellement les effets des autres matériaux constituant le système .

A l'exception du point  $f = 2$  GHz l'adaptation est impossible à obtenir et ceci quelque soit la fréquence et la longueur du matériau.

Pour des fréquences  $f > 3$ GHz le module du coefficient de réflexion reste voisin de 0.4 ( point asymptote  $Y_c^* = 2.11 \angle -0.23rd$  ).

1.3.2 .b Configuration B (3.2.1)Matériau 3 symétrique en  $\mu^*$ et  $\epsilon^*$  en tête.

A partir de 3GHz le coefficient de réflexion à l'entrée plan aa est inférieur à 0.1 et pour  $f > 6\text{GHz}$  , il est inférieur à 0.05.

Le système se comporte rapidement comme une couche d'épaisseur infinie . La courbe de phase figure I<sub>5</sub> traduit bien cet effet .

1.3.2.c Configuration C (1.3.2)Matériau 1 en tête suivi du matériau 3

Nous obtenons le même mécanisme que pour la configuration A ce qui évident à partir de l'interprétation des coefficients d'entrée des matériaux uniques .

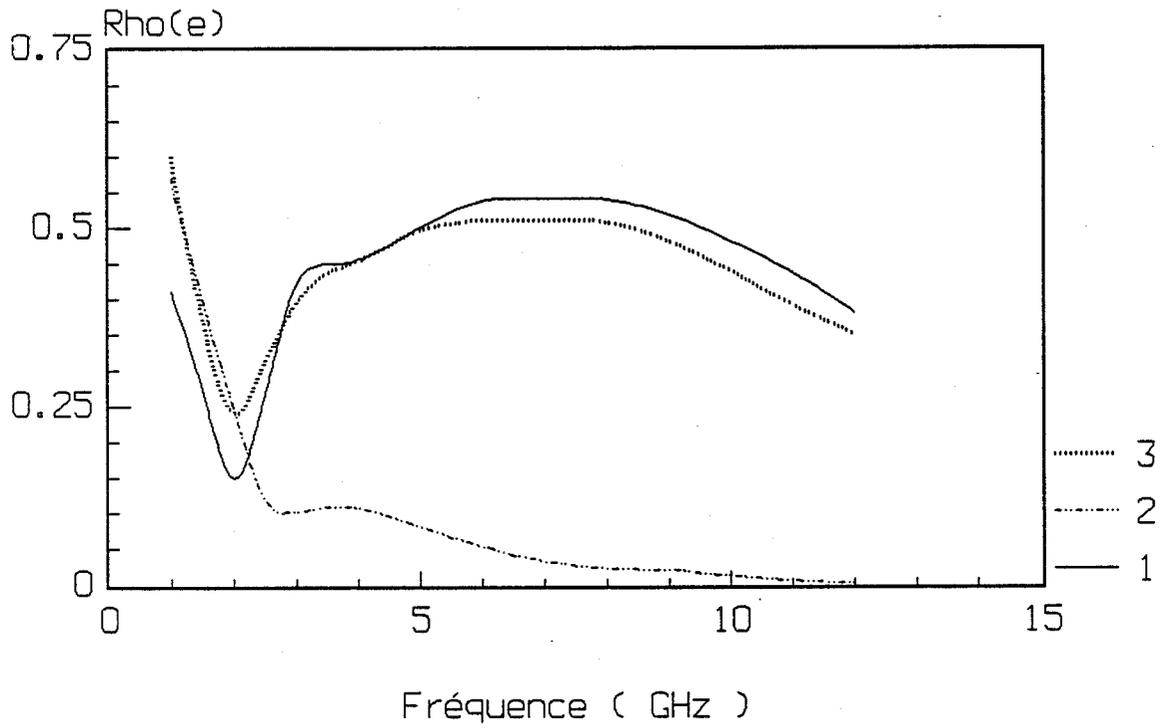
1.3.2.d Comparaison

Pour bien comprendre l'effet du matériau placé en tête du système tricouche - avec les réserves sur les coefficients linéiques et les ondes planes - nous comparons le multicouche A avec un bicouche obtenu en enlevant la première couche.

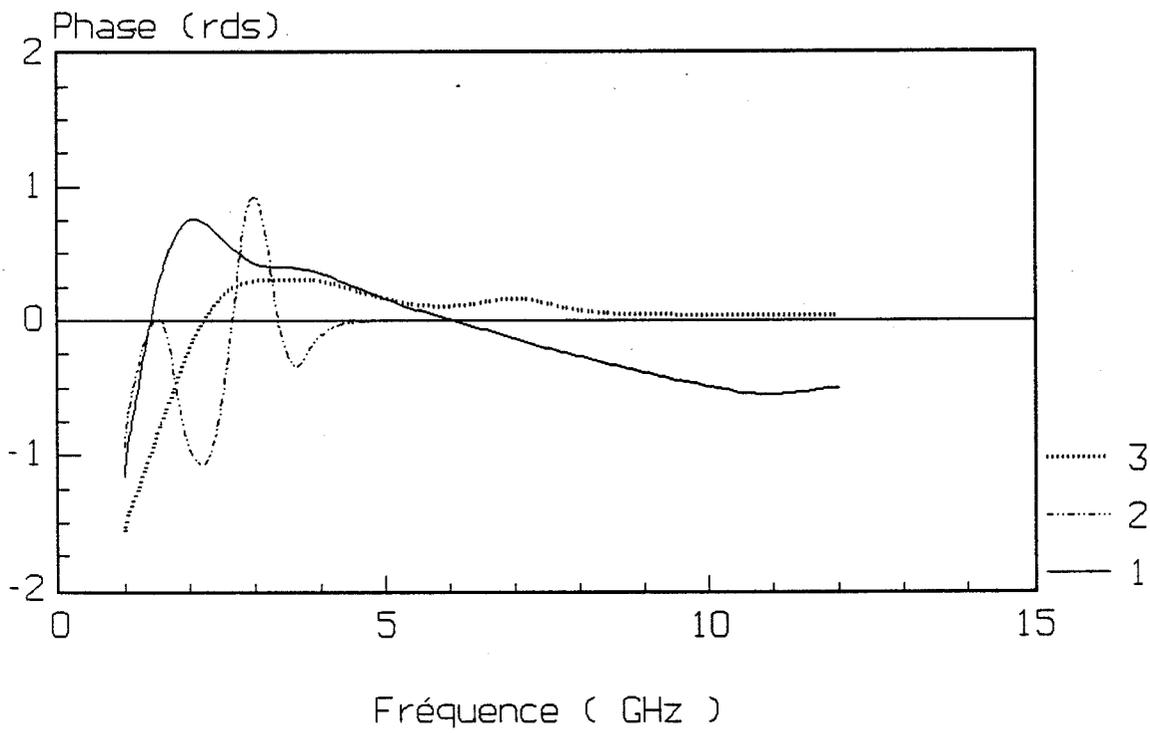
Comparons ce bicouche au tricouche A : on améliore facilement l'adaptation pour une fréquence  $f > 3\text{GHz}$ , le coefficient de réflexion à l'entrée  $\rho < 0.11$

Cette comparaison montre l'effet marquant de la permittivité  $\epsilon^*$  du dielectrique en tête d'un système multicouche.

figI4



figI5



### I.3.2.e Conclusion

Nous montrons que le coefficient de réflexion d'un système multicouche dépend majoritairement du premier matériau qui voit arriver l'énergie.

Le coefficient de réflexion d'entrée d'un système bicouche matériau symétrique en  $\mu^*$  et  $\epsilon^*$  en tête est voisin du coefficient de réflexion d'entrée d'un système tricouche matériau symétrique en  $\mu^*$  et  $\epsilon^*$  en tête .

Connaissant la permittivité complexe , la perméabilité complexe , donc l'admittance caractéristique complexe  $Y_c^*$  et la constante de propagation complexe , on peut prédire qualitativement toutes les propriétés des associations multicouches et l'effet des épaisseurs et de la fréquence.

#### Remarques:

-La méthode que nous présentons présente un avantage sur d'autres , elle permet de faire comprendre les difficultés rencontrées pour obtenir l'adaptation avec de nombreux matériaux.

-Pour la réalisation d'un système multicouche , il est évident que le choix de la qualité et de la symétrie en  $\mu^*$  et en  $\epsilon^*$  de la première couche est indispensable .

-Plus le matériau constituant la première couche du multicouche est symétrique en plus l'adaptation est commode.

Remarquant aussi qu'une couche symétrique en  $\mu^*$  et en  $\epsilon^*$  peut être obtenue par la réalisation de matériau diélectrique de type nid d'abeille avec incrustation de matériau magnétique .

Le problème complexe des ondes incidentes rencontrant des surfaces hétérogènes granuleuses n'est pas ici étudié .

Une étude complète de ces matériaux n'est pas prévue dans le cadre de ce travail , qui veut montrer l'intérêt de la méthode pour les différents matériaux multicouches et ceci dans tous les domaines de la physique:propagation d'ondes et transfert d'énergie (propagation fictive).

CHAPITRE IIETUDE DES TRANSFERTS THERMIQUES DANS LES SYSTEMES  
MULTICOUCHES1) INTRODUCTION.

Rappelons que le transfert d'énergie thermique dans les matériaux (parois) -flux thermique de conduction - gradient de température obéissent aux lois classiques de la thermique.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad \text{Equation de propagation de la chaleur dans un solide .}$$

Nous donnons annexe B la résolution de l'équation générale de diffusion de la chaleur dans un milieu fluide

$\theta(x,t)$ : variation locale de la température à l'instant  $t$  et à la position  $x$ .

$a$  : diffusivité thermique.

Pour un matériau donné, on peut définir un coefficient de conductivité thermique linéique  $\lambda_0$  et un coefficient caractéristique de l'énergie thermique stockée: capacité thermique volumique  $C_0$ .

Ces deux coefficients  $\lambda_0$  et  $C_0$  permettent de décrire le comportement thermique du matériau.

Pour une épaisseur  $l$ , on a un schéma figure II<sub>1</sub> équivalent en posant :

$$R_0 = l / \lambda_0 \quad \text{avec un grand nombre de cellules}$$

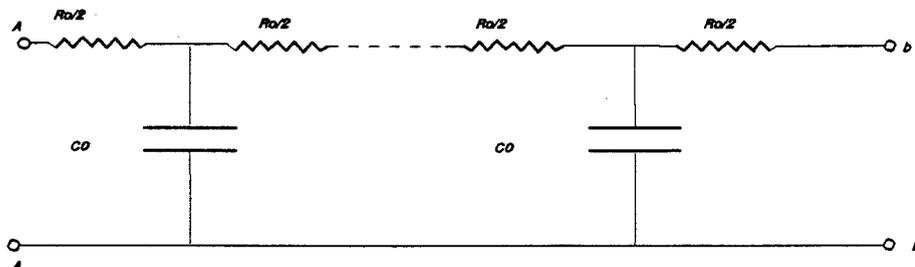


Figure II<sub>1</sub>

II. Notion de "propagation fictive" équivalente à un transfert thermique de conduction en régime harmonique.

II.1. Impédance caractéristique.

A partir de la représentation d'un transfert thermique par un schéma figure II<sub>1</sub> ; on remarque qu'on a l'équivalent d'un effet série représenté par Z et un effet shunt représenté par Y ; Rappelons qu'il s'agit d'un circuit équivalent à valeurs distribuées, on peut donc introduire par analogie avec les notations classiques de la propagation : électricité , optique , acoustique,...

-Une impédance caractéristique complexe par:

$$Z_c^* = \sqrt{z/y} = \sqrt{R/j\omega C_0}$$

-Une admittance caractéristique complexe par:

$$Y_c^* = 1/Z_c = \sqrt{j\omega C_0/R_0} = G_c + jB_c = Y_c \underline{\mathcal{L}}$$

$$\text{avec } G_c = B_c$$

On peut aussi admettre une "constante de propagation fictive" par:

$$\delta_f^* = zy = \sqrt{j\omega C_0 R_0} = \alpha_f + j\beta_f = A + jB$$

$$\text{avec } A = \frac{\omega}{c} \alpha \quad \text{et} \quad B = \frac{\omega}{c} \beta$$

### II.2.2 Facteurs thermiques caractéristiques d'un matériau.

A partir des coefficients  $\lambda_0$  et  $C_0$ , on peut introduire :

- La grandeur diffusivité par  $a = \lambda_0 / C_0$  en  $m^2/sec$  ,  $a$  : facteur qui apparaît dans l'équation de la diffusion de la chaleur .

- La grandeur effusivité par:  $b = C_0 \lambda_0$  en  $J/m^2 \cdot ^\circ C \sqrt{sec}$

L'effusivité  $b$  est une composante essentielle de l'admittance caractéristique et jouera donc un rôle essentiel en régime transitoire .

On peut introduire aussi d'autres grandeurs liées à la notion de transfert et de propagation fictive avec :

$$Y_c^* = b \sqrt{j\omega} = b(1+j) \sqrt{\omega/2} = b \sqrt{\omega/2} + j b \sqrt{\omega/2} = G_c + jB_c$$

$$\gamma_f^* = \alpha_f + j\beta_f = \sqrt{j\omega C_0 / \lambda_0} = (1+j) \sqrt{\omega/2a} = (1+j) b / \lambda_0 \sqrt{\omega/2}$$

$$\text{avec } \alpha_f = \beta_f = \sqrt{\omega C_0 / 2\lambda_0} = b / \lambda_0 \sqrt{\omega/2}$$

Pour un matériau donné :

- Une longueur d'onde fictive  $\lambda' = 2\pi / \beta = 2\pi \lambda_0 / b \sqrt{2/\omega}$
- Une vitesse de phase  $V_p = \omega / \beta = \sqrt{2a\omega} = \lambda_0 / b \sqrt{2\omega}$ .

### II.2.3 Notion d'impédance d'entrée "fictive" en régime harmonique d'un transfert thermique dans un matériau.

Pour un matériau  $M_1$  d'épaisseur infinie on a :

-L'impédance complexe d'entrée:

$$Z_e^* = Z_c^* = (1+j)/b\sqrt{w/2a}$$

-L'admittance complexe d'entrée:

$$Y_e^* = Y_c^* = b\sqrt{w/2} + jb\sqrt{w/2}$$

Pour un matériau  $M_2$  d'épaisseur finie  $l_2$  terminé par un court-circuit thermique (puits), plan bb :

Avec :  $(\theta_1, \Phi_1)$  gradient de température et flux à l'entrée

$(\theta_2, \Phi_2)$  gradient de température et flux à la sortie

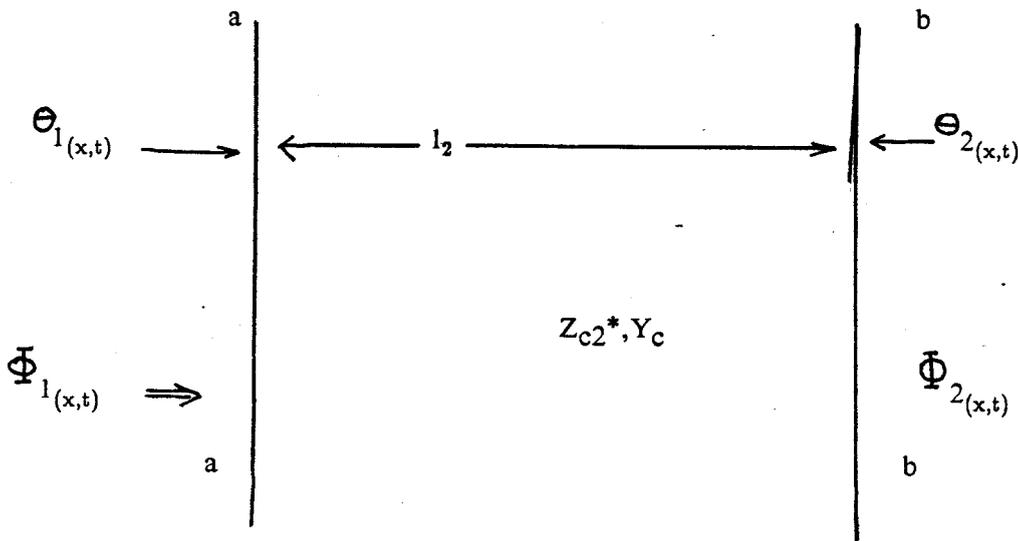


Figure II<sub>2</sub>

On peut représenter le transfert par un quadripôle fictif équivalent

$$\begin{pmatrix} \theta_1(x,t) \\ \Phi_1(x,t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Ch \delta l & Z_c^* Sh \delta l \\ Sh \delta l / Z_c^* & Ch \delta l \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \theta_2(x,t) \\ \Phi_2(x,t) \end{pmatrix}$$

Un matériau est caractérisé en régime harmonique par des coefficients thermiques linéique et volumique  $\lambda_0$  et  $C_0$  mais aussi par une impédance (ou admittance) caractéristique et par une constante de propagation fictive .

On peut donc étudier les matériaux multicouches en thermique par la méthode d'analyse des multicouches aux ondes E.M et à partir de produit matriciel , paramètres de chaine , on peut aussi définir toutes les grandeurs caractéristiques .

Peut-on introduire un coefficient de réflexion ? Et quelle signification donner à cette grandeur?

Rappelons qu'un coefficient de réflexion est caractéristique d'un dipôle et demande que l'on considère une onde incidente ( énergie incidente ) , une onde réfléchie , une onde transmise...

Nous pensons que le coefficient de réflexion peut être introduit avec réserve en thermique.

Supposons qu'un flux thermique  $\Phi_i$  arrive sur un puits thermique de capacité thermique infinie (court-circuit) , ce flux est absorbé en totalité par le puits et la température dans le plan d'entrée du puits est constante .

En appelant  $\Phi_i$  le flux incident ,  $\Phi_t$  le flux entrant ,  $\Phi_e$  le flux radiant émis figure II<sub>3</sub>:

-L'impédance caractéristique du puits est nulle puisque  $\Delta T$  est très faible ( nulle ) , il n'y a pas de variation de température .

Supposons un matériau monocouche béton ou marbre à grande capacité thermique , il a une impédance caractéristique  $Z_c^*$  faible, le flux incident  $\Phi_i$  est majoritairement absorbé , le flux émis  $\Phi_e$  est faible , le bilan des flux est  $\Phi_i = \Phi_t$  ;  $\Phi_e \neq 0$

Supposons qu'un flux thermique  $\Phi_i$  arrive sur une surface fortement isolante , le gradient de température à l'interface monte rapidement , le flux radiant émis  $\Phi_e$  est important , le flux transmis  $\Phi_t$  est très faible et le bilan des flux est  $\Phi_i \neq \Phi_e$  ;

$\Phi_t \neq 0$

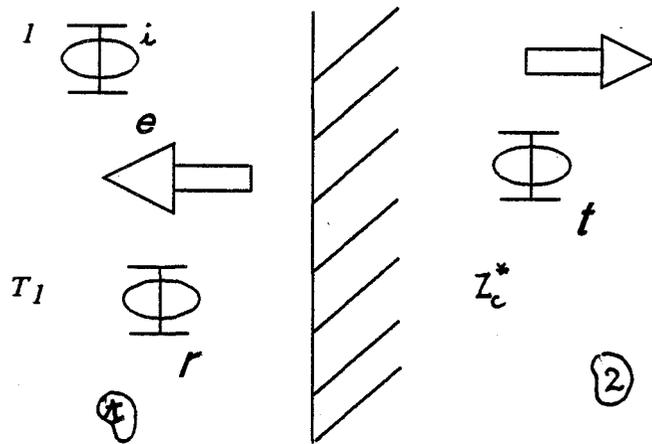


Figure 11.3

Il apparaît qu'en ne considérant que des flux radiatifs la notion de coefficient de réflexion "fictif" a peut être une signification physique .

Lorsque  $\Phi_i$  augmente de  $\Delta\Phi_i$ ,  $\Delta T_1$  augmente plus ou moins lentement de  $\Delta T_1$ ,  $\Phi_t$  existe,  $\Phi_r$  augmente avec  $\Delta T_1$ ; en passant aux impédances pour définir le coefficient de réflexion, il faudrait définir une impédance caractéristique équivalente du milieu 1, une impédance d'entrée du milieu 2 plan aa .

Pratiquement dans le cas d'un local rempli d'air, on peut remplacer l'impédance caractéristique du milieu 1 par un coefficient d'échange, par exemple pour un flux radiatif  $\Phi_r \approx 5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $Z_c \approx 0.2 \Omega$

$$\rho_{aa} = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}}$$

II.3 Etude de la conduction thermique des matériaux multicouches en régime harmonique.

Nous avons développé une méthode matricielle pour l'étude des transferts thermiques de conduction [ 2 ] .

Rappelons que la résolution de l'équation linéaire de la propagation de la chaleur dans un milieu semi-infini en tenant compte des conditions d'entrée et de sortie du matériau figure II<sub>4</sub> , donne la matrice de chaîne du transfert thermique.

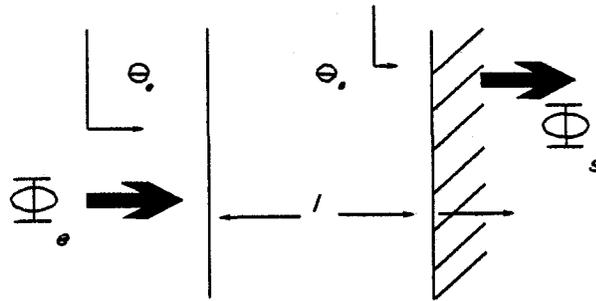


Figure II<sub>4</sub>

avec  $(\Theta_e, \Phi_e)$  Température et flux à l'entrée du matériau

$(\Theta_s, \Phi_s)$  Température et flux à la sortie du matériau

L'analogie avec la propagation classique dans les matériaux à constantes réparties est évidente

avec

$$Z_c^* = \frac{1 - j}{\sqrt{2\pi \lambda_0 c_0 \omega}} \quad \text{Impédance caractéristique "fictive"}$$

$$\gamma^* = \frac{1 + j}{\sqrt{\omega / 2a}} \quad \text{constante de propagation "fictive"}$$

Nous avons effectué de nombreuses études expérimentales [2] de matériaux monocouches et multicouches en régime transitoire et en régime permanent , nous donnons ici des résultats théoriques en régime harmonique pour faire mieux comprendre la comparaison de l'analogie des transferts thermiques et des mécanismes de la propagation d'ondes E.M, ondes acoustiques etc...

### II.3.1 Matériau unique.

Nous avons étudié théoriquement plusieurs matériaux de construction utilisés dans le bâtiment .

Rappelons que nous utilisons les coefficients de la matrice de chaîne , admittance caractéristique fictive et une constante de propagation équivalente fictive.

Nous donnons le module et la phase de l'impédance d'entrée "fictive" en fonction de la fréquence.

Le tableau II<sub>1</sub> ci-dessous donne les caractéristiques thermophysiques des matériaux étudiés.

Matériau	$\lambda_0$ J/m°C/√s	$C_0$ J/m°C	b J/M	l(m)	R(Ω)
Polystyrène	.03	5.10	50	6.10	2
Bois aggl	.15	36.10	300	6.10	.4
Béton	1.15	208.10	2000	6.10	.015

Tableau II<sub>1</sub>

La figure II<sub>5</sub> représente le schéma d'un matériau unique terminé par un puits thermique (court-circuit thermique) avec  $(\Theta_e, \Phi_e)$  température et flux à l'entrée du matériau et  $(\Theta_s, \Phi_s)$  température et flux à la sortie du matériau.

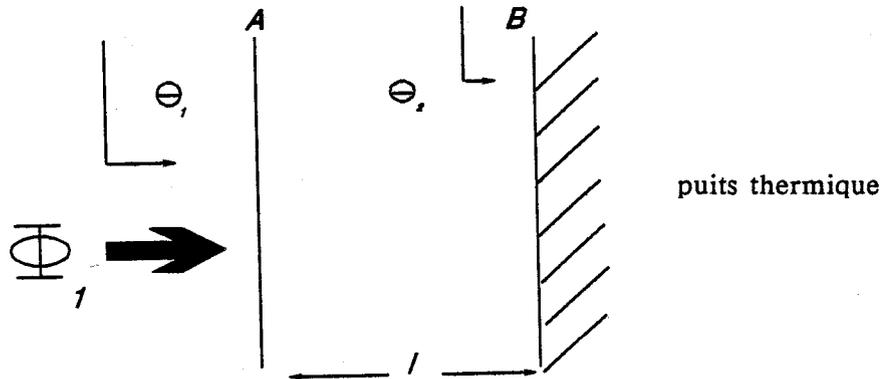


Figure II<sub>5</sub>

Nous donnons une représentation en régime harmonique de l'impédance d'entrée du matériau ( $l=10^{-2}m$ ) en fonction de la fréquence croissante (échelle logarithmique)

La représentation des transferts thermiques dans un abaque de Smith n'est pas commode, on a toujours pour l'impédance d'entrée  $R_e(Z_e)=\text{Im}(Z_e)$ .

A titre d'exemple nous donnons figure II<sub>6</sub> l'admittance d'entrée dans un tel abaque.

### II.3.1.a Polystyrène extrudé

La réponse de l'impédance en fonction de la fréquence est donnée par les figures II<sub>7</sub> et II<sub>8</sub>

Nous distinguons trois régimes:

- Très basses fréquences ( $f < 10^{-4} \text{Hz}$ ): On a pratiquement le régime permanent ; le module de l'impédance d'entrée est  $Z_e = l/\lambda_0$

-Très hautes fréquences ( $f > 10^{-2}$ Hz) : On a le régime d'effusivité ; rappel l'effusivité est liée à la fréquence par  $b = \frac{2\sqrt{\lambda}}{\Delta T} \sqrt{\pi f}$  ; l'impédance d'entrée est  $Z_e = \ell/b$

-Fréquences intermédiaires ( $10^{-4}$ - $10^{-2}$ Hz) : La matrice de transmission permet le calcul à toutes les fréquences l'impédance d'entrée partie réelle, partie imaginaire ou module et phase.

### II.3.1.b bois aggloméré

Nous donnons figures  $II_{7b}$  et  $II_{8b}$  la réponse de l'impédance d'entrée du bois en fonction de la fréquence .

A nouveau nous distinguons trois régimes :

- Très basses fréquences ( $f < 10^{-4}$  Hz) : Régime permanent .
- Très hautes fréquences ( $f > 10^{-1}$  Hz) : Régime d'effusivité .
- Régime intermédiaire pour la plage de fréquences ( $10^{-4}$ - $10^{-2}$ Hz) .

### II.3.1.c. béton

Nous retrouvons les trois régimes

- Très basses fréquences ( $f < 10^{-6}$ Hz) : régime permanent .
- Très hautes fréquences ( $f > 1$  Hz) : régime d'effusivité .
- Régime intermédiaire fréquence  $10^{-6}$ Hz-  $10^{-1}$  Hz .

### II.3.1.d conclusion.

L'étude de la réponse de l'impédance d'entrée en fonction de la fréquence met en évidence les trois phases du comportement thermique du matériau.

Nous donnons le rapport des modules de l'impédance d'entrée du polystyrène et du bois aggloméré tableau  $II_2$  en fonction de la fréquence

La courbe traduit bien le rapport des résistances thermiques des matériaux de même épaisseur ici: le béton , le bois aggloméré et le polystyrène extrudé.

Aux très basses fréquences le rapport des impédances d'entrée des matériaux sont

proportionnels aux rapports des conductivités thermiques liniéques de ces matériaux :

$$\frac{Z_e(Po) \quad \lambda(Bo)}{Z_e(Po) \quad \lambda(Po)}$$

Aux très hautes fréquences (régimes d'effusivité), nous retrouvons ici les rapports des impedances d'entrée des matériaux proportionnels aux rapports d'effusivité.

Les phases de raccordement sont données par l'équation matricielle.

$$\frac{Z_e(Bo) \quad b(Bo)}{Z_e(Po) \quad b(Po)}$$

Rapport	B.F 10 -10 Hz régime établi	F.I 10 -10 Hz régime inerméd	F élevée effusivité
$\frac{Z_e(Po)}{Z_e(Bo)}$	# 3	7	7
$\frac{\lambda_o(Bo)}{\lambda_o(Po)}$	0.5	0.5	0.5

Tableau II<sub>2</sub>

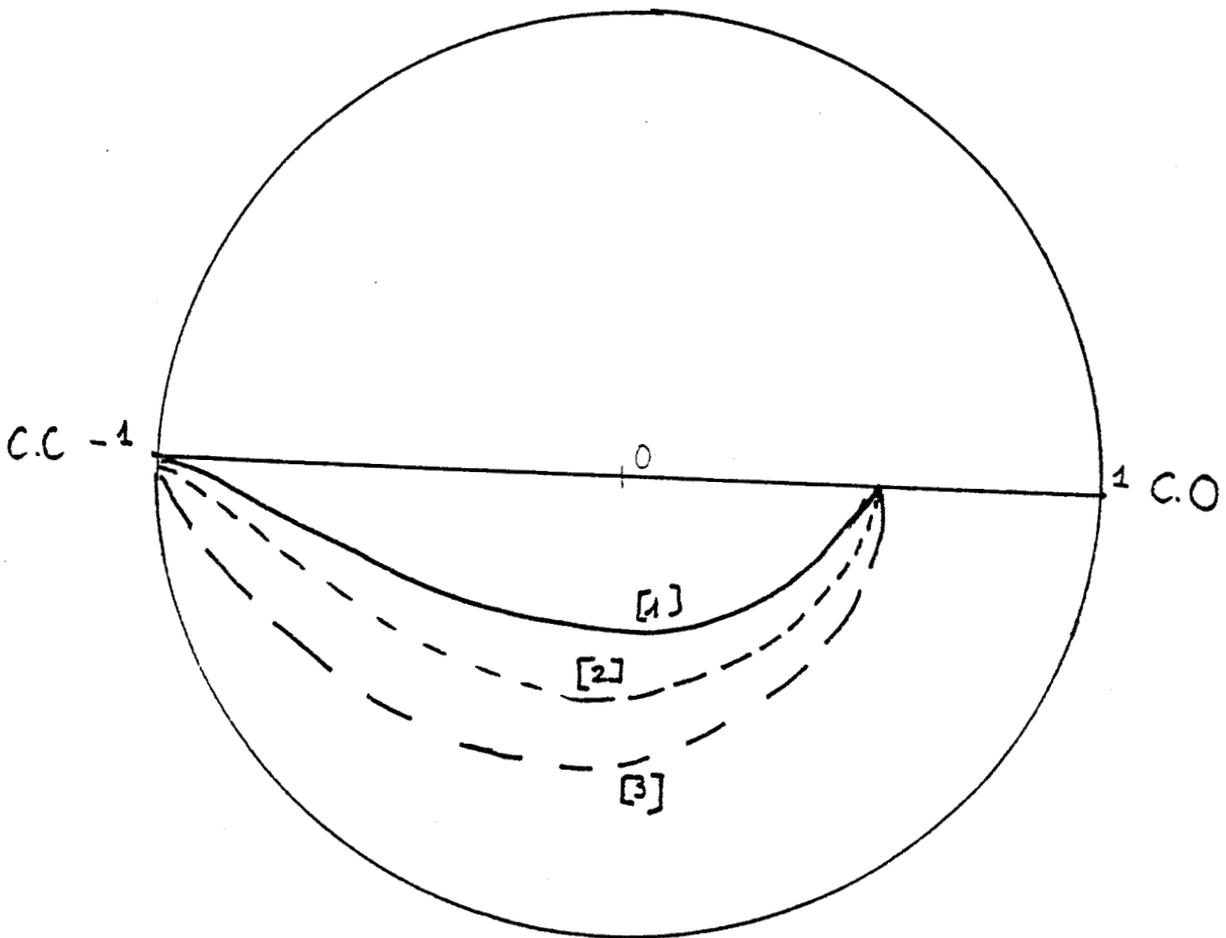
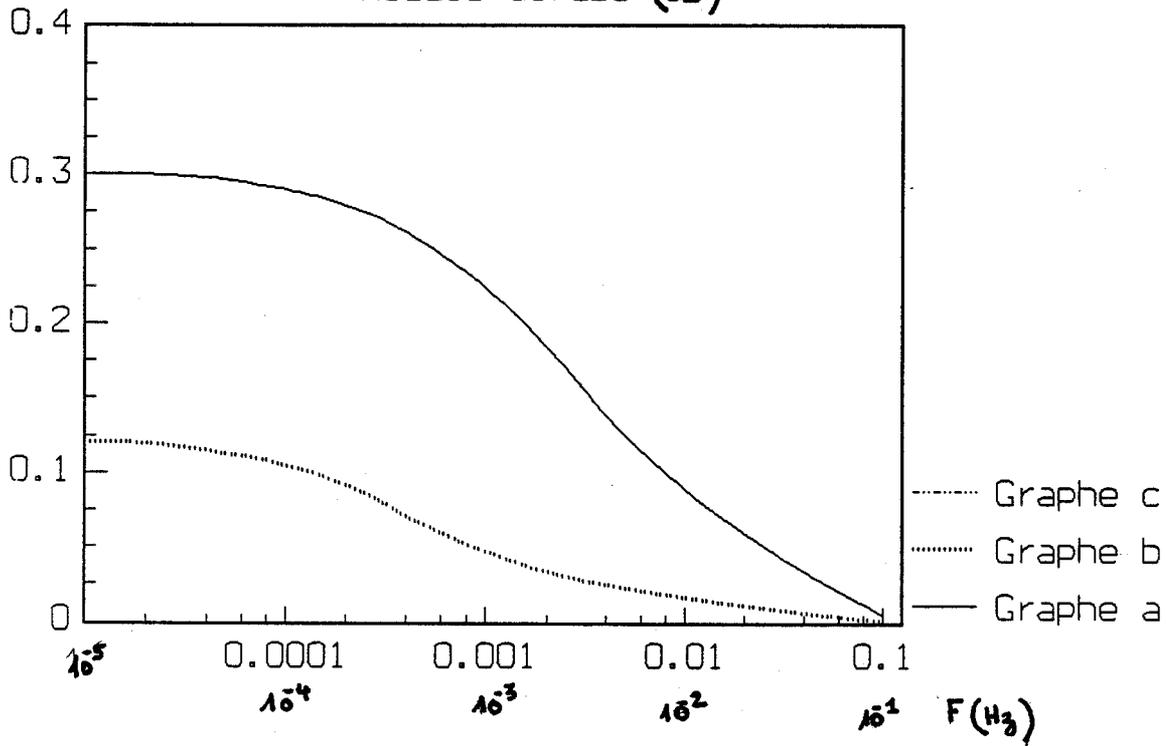
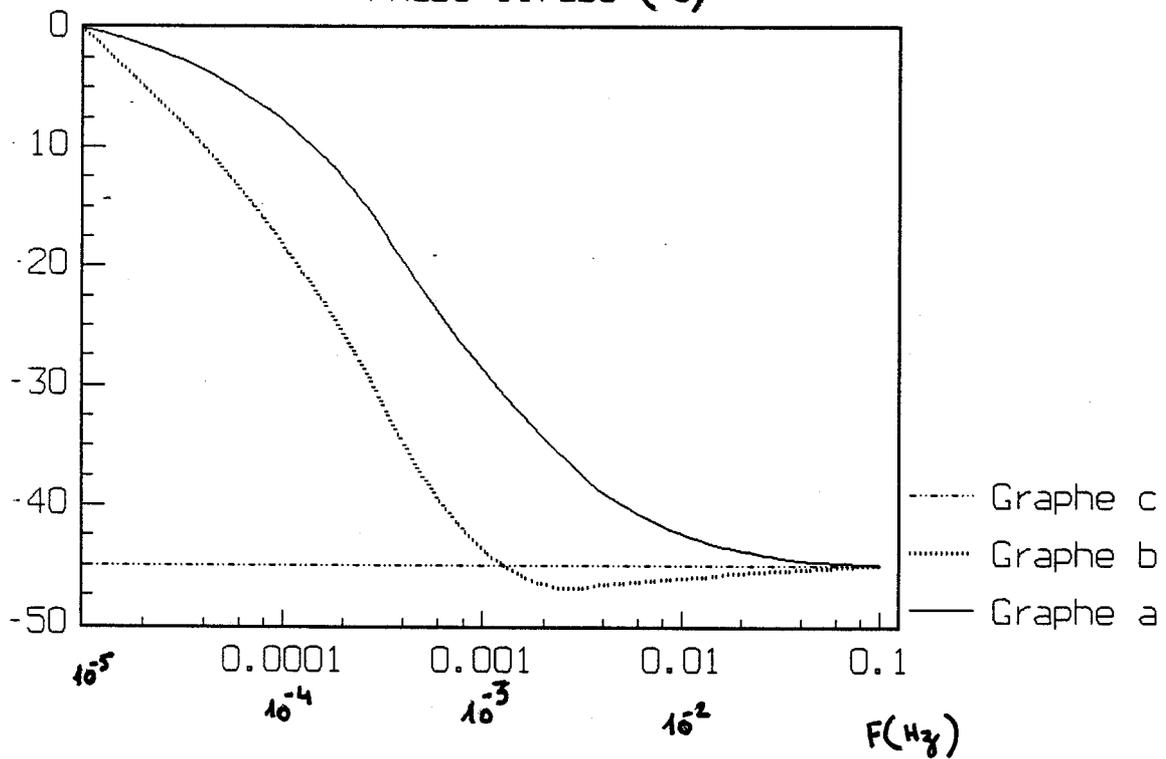


Fig. 11. Fig. 11.6

COEFFICIENT DE REFLEXION DANS DIFFERENTS TRICOUCHES :

- 1 POLYSTYRENE- BOIS - BETON
- 2 BOIS - POLYSTYRENE - BETON
- 3 BETON - POLYSTYRENE - BOIS

Module II7abc ( $\Omega$ )Phase II7abc ( $^{\circ}C$ )

### II.3.2 LES TRANSFERTS THERMIQUES DANS LES ENSEMBLES

#### MULTICOUCHES.

Il n'y a aucune difficulté à appliquer le formalisme matriciel à l'analyse des transferts thermiques (propagation "fictive") dans un ensemble multicouche constitué de plusieurs matériaux de nature différentes. Nous admettons que chaque matériau est homogène et d'épaisseur constante.

Nous montrons ici que la disposition des couches revêt une grande importance dans les problèmes d'isolation thermique en régime transitoire.

Nous avons effectué une étude complète théorique sur une paroi tricouche.

Nous avons choisi les matériaux dont les caractéristiques thermiques sont connues tableau II<sub>1</sub>.

Nous donnons un schéma équivalent de l'ensemble tricouche figure II<sub>9</sub>

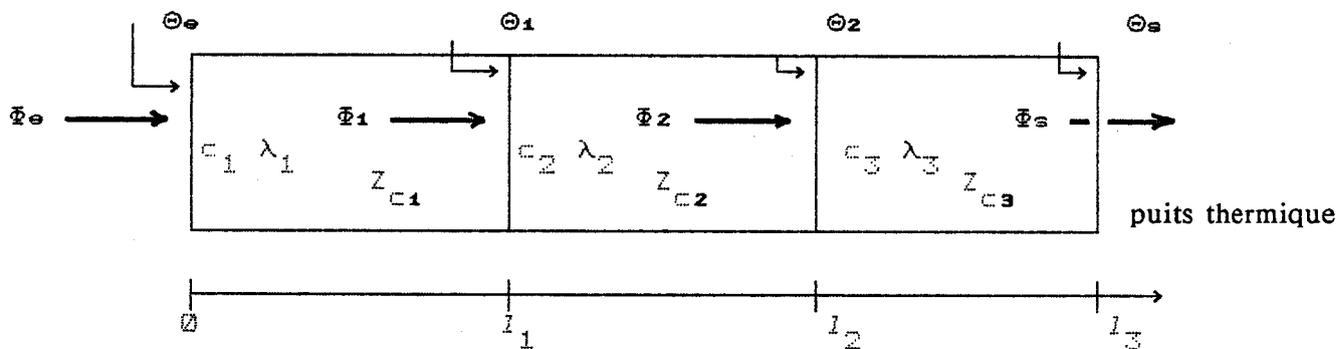


figure II<sub>9</sub>

La matrice de chaîne d'une paroi multicouche similaire à celle d'une paroi monocouche, est égale au produit des matrices des différentes couches constitutives dans l'ordre où sont disposées ces couches dans la paroi.

$$\begin{bmatrix} \Theta_e \\ \Phi_e \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^n \begin{bmatrix} Ch \gamma_i l_i & z_{c_i}^* Sh \gamma_i l_i \\ \frac{Sh \gamma_i l_i}{z_{c_i}^*} & Ch \gamma_i l_i \end{bmatrix}$$

Un logiciel de simulation développé dans le laboratoire [3] permet de calculer le module et la phase de l'impédance d'entrée d'une paroi multicouche débitant sur un puits thermique ou sur une impédance donnée en fonction de la fréquence . De même au niveau de chaque interface les informations sont disponibles.

Nous donnons en annexe B les détails des calculs permettant d'obtenir de façon analytiques l'impédance d'entrée  $Z_e$

$$Z_e = Z_{c1}Z_{c2} \frac{Z_{c1}th\gamma_1 + Z_{c2}th\gamma_2 + \frac{Z_{c1}Z_{c3}}{Z_{c2}}th\gamma_1th\gamma_3 + Z_{c3}th\gamma_3}{Z_{c1}Z_{c2} + Z_{c2}^2th\gamma_1th\gamma_2 + Z_{c1}Z_{c2}th\gamma_3th\gamma_2 + Z_{c2}Z_{c3}th\gamma_3th\gamma_1}$$

Le tableau II<sub>3</sub> ci-dessous donne les désignations des parois utilisées.

Configurat	POBOBE	BEPOBO	BOBEPO
Désignation	Polystyrène- -bois-béton	Béton-polystyrène- -ne-bois	Bois-béton- polystyrène
Epaisseur ( m )	$(6+6+6)10^{-2}$	$(6+6+6)10^{-2}$	$(6+6+6)10^{-2}$

Tableau II<sub>3</sub>

Les figures II<sub>10</sub> et II<sub>11</sub> donnent respectivement le module et la phase de l'impédance d'entrée en fonction de la fréquence .

### II.3.2.a Paroi "POBOBE" ( Courbe I )

Dans le domaine des basses fréquences  $f < 2.10^{-6} \text{ Hz}$  , l'impédance d'entrée est égale à la somme des résistances thermiques quelque soit l'ordre dans lequel sont superposées les couches .

L'impédance ( résistance thermique ) est constante quelque soit l'ordre de groupement . La mesure du comportement en très basses fréquences permet de déterminer la résistance thermique.

La mesure du comportement en très basses fréquences permet de déterminer la résistance thermique.

Dans le domaine des très hautes fréquences  $f > 10^{-3} \text{Hz}$ , le module de l'impédance d'entrée est égale à l'impédance caractéristique du matériau polystyrène qui voit arriver l'énergie (premier matériau)

Dans cette plage de fréquences, c'est l'effusivité du premier matériau qui régit majoritairement l'ensemble du phénomène thermique en régime transitoire figure II.

Rappelons qu'entre le béton et le polystyrène extrudé le rapport d'effusivité est de 400.

Dans le domaine des fréquences intermédiaires ( $2 \cdot 10^{-6} \text{Hz} - 10^{-3} \text{Hz}$ ), l'influence du matériau de la deuxième couche de la paroi se fait sentir, c'est la phase intermédiaire et le calcul est possible par la matrice de transmission thermique ou par tout autre méthode utilisant des calculateurs ou des abaques.

#### II.3.2.b Paroi "BOPOBE" (Courbe II)

Dans le domaine des basses fréquences  $f < 10^{-7} \text{Hz}$ , l'impédance d'entrée est égale à la somme des résistances thermiques des couches.

Dans le domaine des hautes fréquences  $f > 10^{-4} \text{Hz}$ , on a la phase d'effusivité du bois (effusivité du premier matériau est  $b = 300 \text{w/m}^2\text{°C}$ ).

Dans le domaine des fréquences intermédiaires ( $10^{-7} \text{Hz} - 10^{-4} \text{Hz}$ ) de l'ordre de trois modules, l'influence du deuxième matériau constituant la paroi tricouche est très sensible. Plus le deuxième matériau est lourd plus cette phase est importante, il faut donc fournir plus d'énergie pour obtenir le régime permanent.

#### II.3.2.c Paroi "BEPOBO" (Courbe III)

A nouveau nous avons trois régimes:

- Très basses fréquences ( $f < 10^{-7} \text{Hz}$ ): régime permanent.

Il faut des fréquences beaucoup plus basses pour atteindre le régime permanent, ceci est dû au béton qui est un matériau ayant une grande capacité thermique ( $b = 2000 \text{w/m}^2\text{°C}$ )

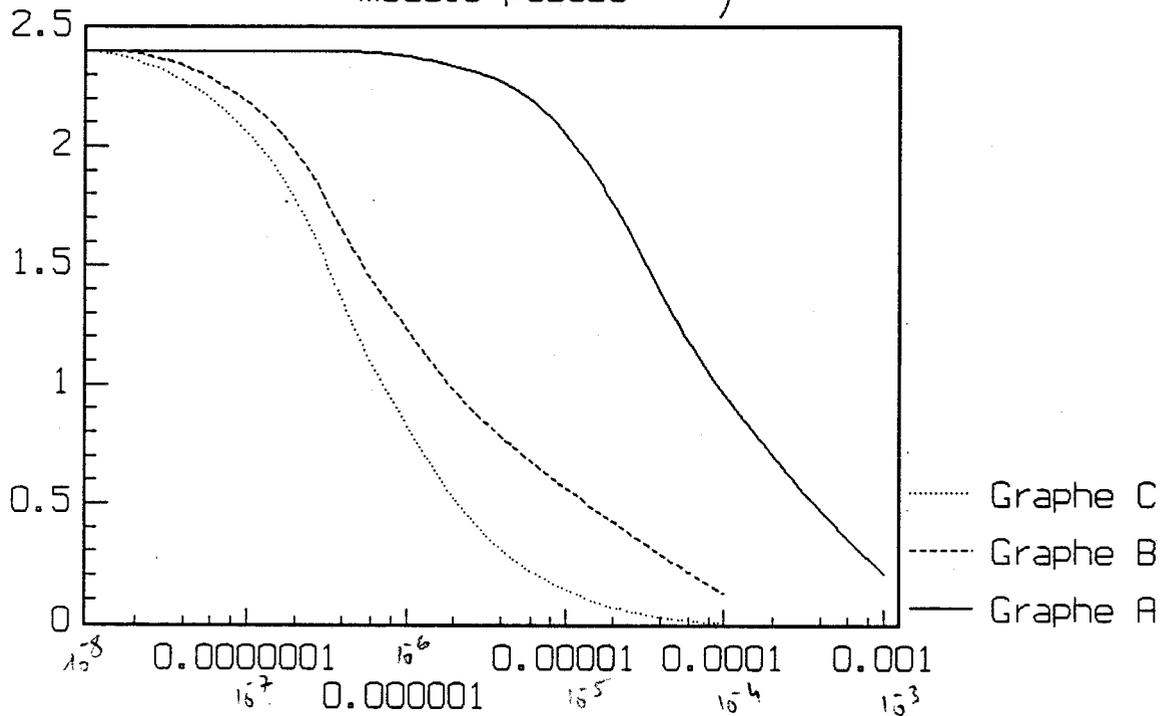
-Très hautes fréquences ( $f > 210^{-2}$ Hz) . La phase d'effusivité est régie par le premier matériau ( béton ).

Les courbes I et III montrent un décalage important des fréquences.

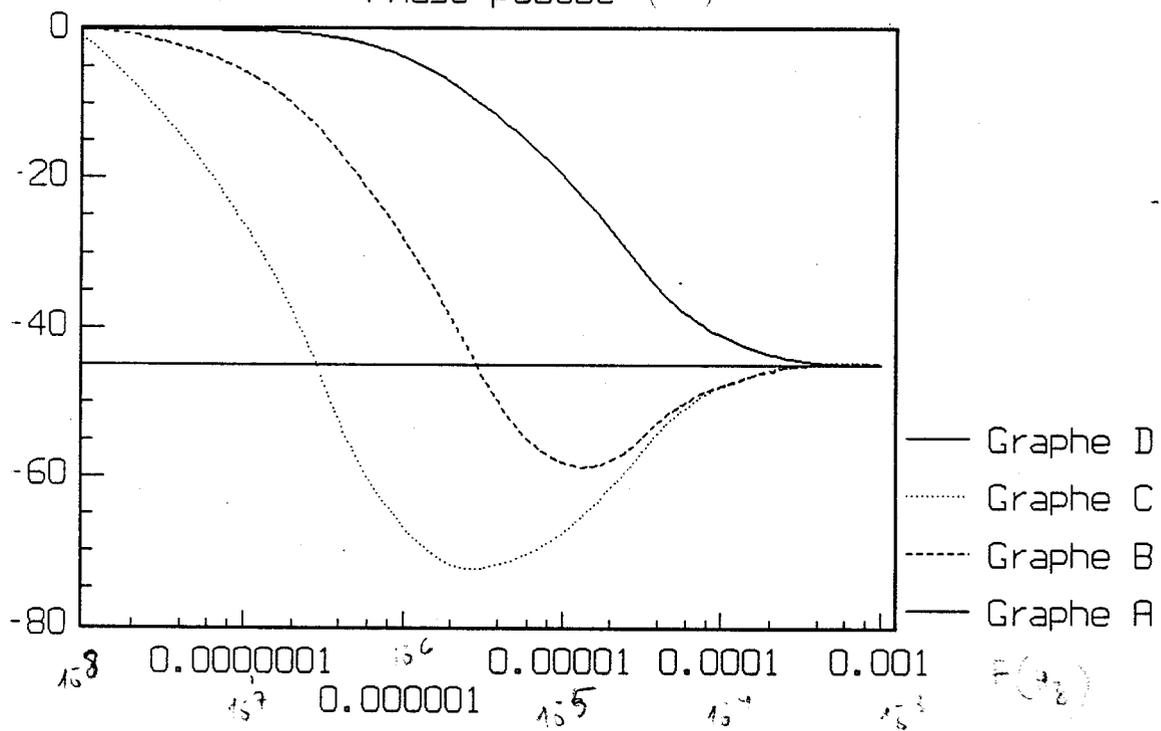
La comparaison des trois parois I , II et III composées des mêmes matériaux ayant des caractéristiques différentes met en évidence le rôle essentiel du premier matériau constituant la paroi.

En effet le régime lié à l'effusivité de la paroi " BEPOBO " apparait à une fréquence 50 fois plus faible que celle de la paroi " BOPOBE " et 400 fois plus faible que celle de la paroi "POBOBE", il faut donc fournir une énergie plus importante pour obtenir le régime permanent.

module pobobe ( $\Omega$ )



Phase pobobe ( $^{\circ}$ C)



## II.4 Etude thermique des matériaux mono et multicouches en fonction du temps.(Régimes transitoires)

Nous avons étudié théoriquement et expérimentalement le comportement thermique .

-D'une part la réponse temporelle du gradient de température air ambiant-surface de parois des matériaux uniques utilisés en bâtiment excité par un flux thermique constant

-D'autre part la réponse gradient de température air ambiant-surface de parois en fonction du temps des matériaux multicouches excités par un flux thermique constant .

### II.4.1 Matériau unique.

Nous donnons la réponse du gradient de température en fonction du temps des matériaux : polystyrène , bois ,béton .

Nous rappelons que le gradient de température est fonction du flux d'excitation et du temps  $\Delta T=f(\Phi, t)$

$$- \Delta T = \frac{2\Phi}{b} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \quad \text{en régime d'effusivité [12 ]}$$

$$- \Delta T = \Delta \Phi R \quad \text{en régime permanent}$$

Dans la suite les courbes des réponses  $\Delta T = f ( t )$  sont données en échelle bilogarithmique.

Nous donnons la réponse du gradient de température en fonction du temps des matériaux cités page 26.

#### II.4.1.a. Matériau polystyrène extrudé.

La figure II<sub>12a</sub> donne la réponse du gradient de température d'une feuille de polystyrène extrudé d'épaisseur  $510^{-3}m$

On distingue trois zones :

-Zone d'effusivité(temps inférieur à 120 secondes) partie A de pente est égale à une constante 1/2 (echelle bilogarithmique)

-Zone de régime établi (temps supérieur à 300 sec ) partie B le module de l'impédance d'entrée  $Z_e$  est égale à la résistance thermique du matériau qui est constante .

-Zone transitoire partie C comprise entre les deux phases précédentes ( entre 2 et 5 min) est calculée à partir du calcul matriciel .

#### II.4.1.b Matériau bois aggloméré.

La figure II<sub>12b</sub> donne la réponse du gradient de température d'une feuille de bois aggloméré d'épaisseur  $510^{-3}m$ .

Les trois zones apparaissent :

- Zone d'effusivité ( temps inférieur à 7 min ) .
- Zone du régime établi ( temps supérieur à une heure ) .
- Zone intermédiaire ( temps compris entre 7 minutes et 1 heure ) .

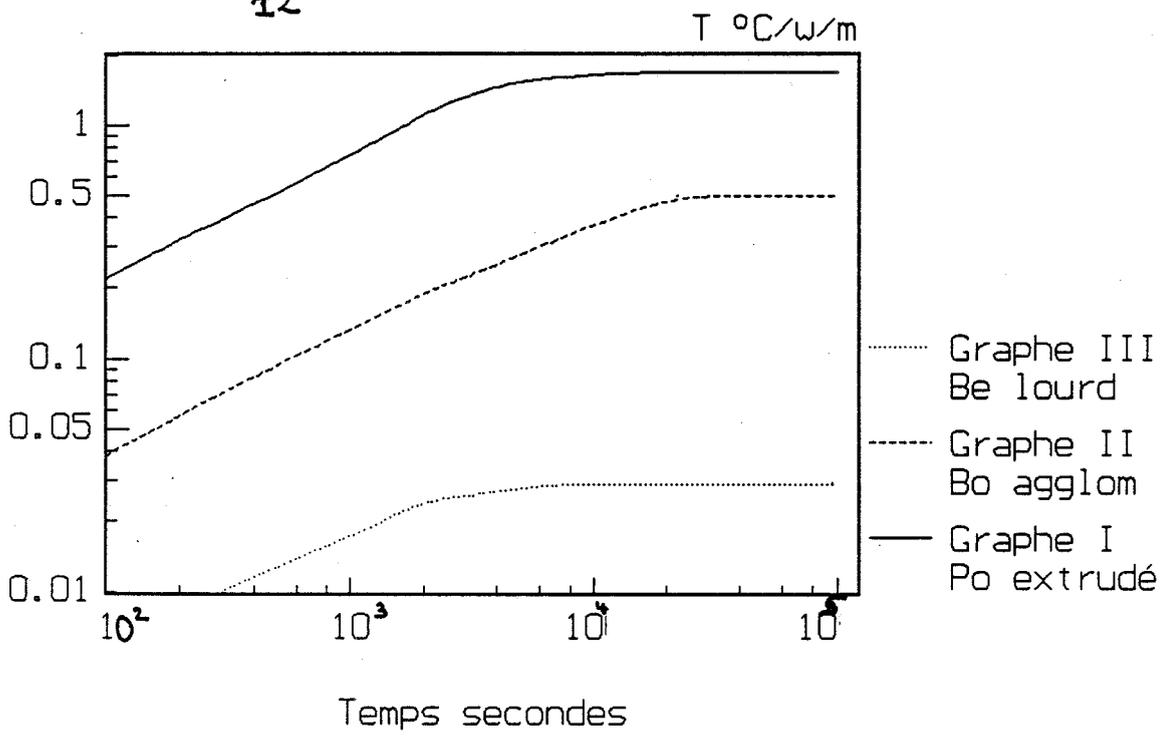
#### II.4.1.c Matériau béton.

La figure II<sub>12c</sub> donne la réponse du gradient de température d'une feuille de béton d'épaisseur  $510^{-3}m$ .

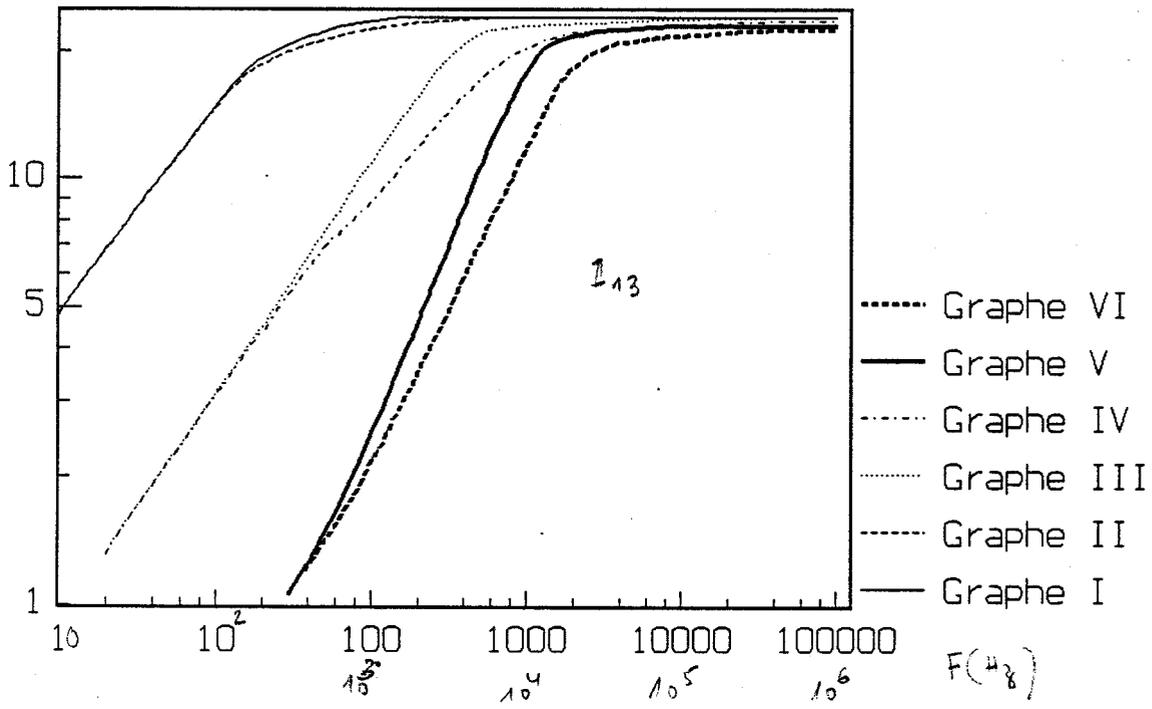
A nouveau trois zones :

- Zone d'effusivité ( temps inférieur à 15 minutes ) .
- Zone du régime établi ( temps supérieur à 3 heures ) .
- Zone intermédiaire ( temps compris entre 15 minutes et 3 heures ) .

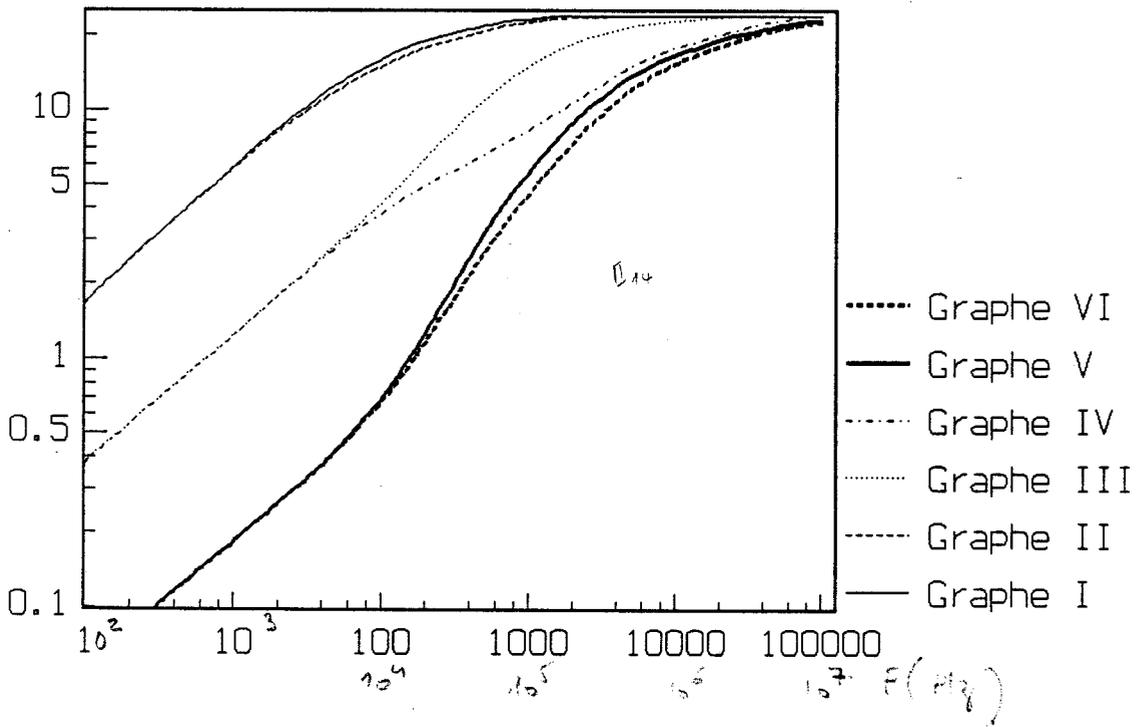
Figure II <sup>12</sup>



gradient Pobobe



module pobobe (habitar)



### II.4.2 Matériau multicouche ( à 3 composants ) .

Nous avons effectué une étude complète théorique et expérimentale [2] en régime permanent sur plusieurs combinaisons de matériaux multicouches déjà étudiés en régime harmonique .

Le tableau II<sub>4</sub> donne les différentes configurations utilisées

Configurat	POBOBE	BEPOBO	BOBEFO
Désignation	Polystyrène- -bois-béton	Béton-polystyrène- -ne-bois	Bois-béton- polystyrène
Epaisseur ( m )	$(2+6+22)10^{-2}$	$(22+2+6)10^{-2}$	$(6+22+2)10^{-2}$

*Tableau II<sub>4</sub>*

Nous donnons figure II<sub>13</sub> la réponse du gradient de température en fonction du temps des matériaux multicouches d'épaisseurs  $510^{-3}$ m .

#### II.4.2.a Matériaux multicouches "POBOBE" et "POBEBO"

Ces matériaux\* sont réalisés à partir de l'association de matériaux de bâtiment d'épaisseur  $510^{-3}$ m.

Les réponses expérimentales du gradient de température en fonction du temps sont

\* Ce matériau multicouche de faible épaisseur 5mm pour chaque matériau en thermique , constitue un multicouche de laboratoire en pratique bâtiment tous les matériaux ont des épaisseurs de l'ordre de plusieurs cm

données figure II<sub>14</sub> ; flux d'excitation 10 w/m<sup>2</sup>

Il apparait trois zones :

-Zone d'effusivité (temps inférieur à 2 min) , la paroi multicouche se comporte comme un matériau unique polystyrène qui joue un rôle important de confort .  $\Delta T$  est lié à l'effusivité du premier matériau et varie linéairement avec l'épaisseur de ce matériau  
Exemple pour 100 secondes d'excitation (10w/m<sup>2</sup>) $\Delta T=18^{\circ}C$  c'est à dire 66%de la valeur finale de  $\Delta T$ .

-Zone du régime établi (temps supérieur à 16min), 90%de la valeur du régime permanent est atteinte $\Delta T=24^{\circ}C$  .

-Zone du régime intermédiaire (temps compris entre 2 min et 16 min) : l'influence du deuxième matériau est différente tricouche "POBEO" et "POBOE" due au stockage d'énergie dans le béton.

La position du deuxième matériau constituant la paroi joue un rôle important pour les régimes transitoires temps intermédiaires.

#### II.4.2.b Matériau multicouche "BEPOBO"

Nous donnons figure II<sub>14</sub> la réponse expérimentale du gradient de température en fonction du temps.

A nouveau trois zones :

- Zone d'effusivité ( temps inférieur à 15 minutes ) , le matériau se comporte comme un matériau unique béton .

- Zone du régime établi ( temps supétieur à 3 heures ) .

- Zone intermédiaire ( temps compris entre 15 minutes et trois heures ) déterminé à partir du calcul matriciel.

#### II.4.2.c Conclusion.

Le rapport des durées des régimes d'effusivité  $t( Po/Be ) = 7.5$  pour une épaisseur de  $510^{-3}m$  .

Le régime permanent à 90% de la valeur est établi pour la paroi "POBOBE" pour une durée de 16 minutes à comparer à celle de la paroi "BEBOPO" qui s'établit à 90% de sa valeur finale pour une durée supérieure à 3h30min : le rapport est #13

Ce exemple illustre bien le rôle important que revêt le matériau isolant (isolation interne) en thermique dans le confort de l'habitat.

La durée de la zone d'effusivité de la paroi " BEBOPO" est plus importante que celle de la paroi " POBOBE" .

### II.4.3 Application à une paroi multicouche réelle.

Nous avons fait une simulation de parois tricouches dont les épaisseurs sont celles couramment utilisées dans le bâtiment . Polystyrène d'épaisseur  $610^{-2}m$  , bois d'épaisseur  $610^{-2}m$  et béton d'épaisseur  $610^{-2}m$  .

On excite la paroi avec un flux constant d'amplitude  $10W/m^2$ .

Le tableau II<sub>5</sub> donne le rapport des réponses des différentes configurations de la paroi.

Rapport de montée en T°C	100sec	300sec	1000sec	1heure
$\frac{PoBoBe}{BePoBo}$	30	7	2.8	1.87
$\frac{PoBeBo}{BoBePo}$	6.8	4.32	2.75	1.53

Tableau II<sub>5</sub>

Nous présentons figure II<sub>14</sub> les réponses des différentes parois .

#### II.4.3.a Paroi "BEBOPO"

Le rôle de l'effusivité du béton est prépondérant durant les trois premières heures et est dominant durant les six premières heures.

Les effets de l'isolation extérieure ( polystyrène ) est importante après 24 heures .

La phase intermédiaire totale est d'une durée de plus de 10 jours .

Le régime permanent à 90% de sa valeur est établi pour des temps supérieurs à 20 jours ( irréalisable en pratique effet jour et nuit ).

#### II.4.3.b Paroi "POBOBE".

Le rôle de l'effusivité du polystyrène est dominant durant les trois premières heures , la réponse durant cette phase est 30 fois supérieure pour une même énergie fournie à celle de la paroi "BEBOPO".

La phase intermédiaire dure environ 8 heures .

Nous montrons sur ces deux exemples l'importance de l'effusivité du premier matériau.

L'introduction d'un isolant dans l'habitat conduit en régime transitoire à une consommation d'énergie plus faible pour un même gradient de température " interne-externe".

#### II.4.3.c Paroi "BOPOBE".

Le rôle de l'effusivité du bois est dominant durant les trois premières heures .

Le régime permanent à 90% de sa valeur est atteint en 24 heures .

La phase intermédiaire est très importante.

#### II.4.3.d Paroi "BOBEPO".

Pour une isolation externe excellente ( polystyrène ) , isolant interne moyen ( bois ) , l'influence du béton est sensible de trois heures à dix jours avec une supériorité de plusieurs degrés pour le béton à l'extérieur .

L'introduction d'un isolant en deuxième couche d'une paroi tricouche donne une économie importante d'énergie et un plus de confort certain dans l'habitat.

Nous donnons un exemple de construction de bâtiment récent avec une paroi multicouche constituée de  $10^{-2}$  m de plâtre ,  $8 \times 10^{-2}$  m de polystyrène extrudé et  $24 \times 10^{-2}$  m de brique ( $b=2000\text{J}/\text{m}^2\text{C}\sqrt{\text{s}}$  ).

Cet exemple illustre bien le rôle important que revêt le matériau isolant ( isolation par l'intérieur ) en thermique dans le confort de l'habitat .

La durée de la zone d'effusivité de la paroi "BEPOBO" est plus importante que celle de la paroi "POBOBE" .

Exemple au bout de 2 minutes pour la paroi "POBOBE" , 66% de la valeur finale de  $\Delta T$  est atteinte soit  $\Delta T_{66\%}=18^\circ\text{C}$  comparée à celle de la paroi "BEBPO"  $\Delta T < 1^\circ\text{C}$  c'est à dire inférieure à 5% de la valeur finale .

## *CHAPITRE III: ETUDE THERMIQUE EXPERIMENTALE D'UN LOCAL*

### III.1.INTRODUCTION.

Le local expérimental a déjà donné lieu à plusieurs études expérimentales .  
Influences : des parois , des sources , du renouvellement d'air et des energies .

Ce local est décrit schéma III<sub>1</sub> .

Les premières études [2] ont porté sur les réponses de ce local pour des excitations à puissance constante durant quelques heures et quelques jours , il s'agissait principalement des réponses en température et des flux globaux entrant dans les parois.

Une autre étude [13] - à laquelle nous avons participé - a porté sur les réponses de ce local pour des gradients de températures air ambiant intérieur - environnement extérieur constant de l'ordre d'une dizaine de degrés , et des essais ont été effectués pour séparer les contributions convective et radiative des flux "entrants, sortants " des différentes parois.

L'étude qui est ici décrite est nouvelle pour les aspects influence du plancher et du plafond par un chauffage par le sol , elle permet de préciser de nombreux aspects du régime transitoire apparaissant dans les locaux soumis à des excitations différentes mais avec maintien du gradient de température " air ambiant , puits extérieur " .

Dans ce chapitre nous analysons les flux et leurs composantes radiatives et convectives et les gradients de température pour différentes sources d'énergie , pour différents renouvellement d'air et pour différentes configurations .

Les gradients de température  $\Delta T$  sont étudiés par rapport à la référence air ambiant et pour différentes sources d'excitation:

- Majoritairement radiatif ( panneau radiant 1500/750 w)
- Majoritairement convectif ( convecteur du commerce 1700/850 w )
- Pour certaines expériences chauffage par plancher ( cable résistif de 1200 w ).

Nous donnons figures III<sub>1</sub> le schéma du local expérimental avec les différentes parois , le tableau III<sub>1</sub> donne les différentes configurations étudiées.

Deux types d'extraction sont utilisées : faible (naturelle ) et moyenne renouvellement d'air voisin de 14 m<sup>3</sup>/heure .

Rappelons que toutes les expériences ont lieu pour un système local , avec un environnement extérieur restant à la même température durant la durée de l'expérience et que initialement la température des parois est celle du milieu environnant sont les mêmes .

Dans cette hypothèse et même pour les parois multicouches nous avons rappelé chapitre II qu' il existe une relation simple entre " l'impédance temporelle " [14] de la paroi , la température instantanée de surface et le flux " entrant sortant " .

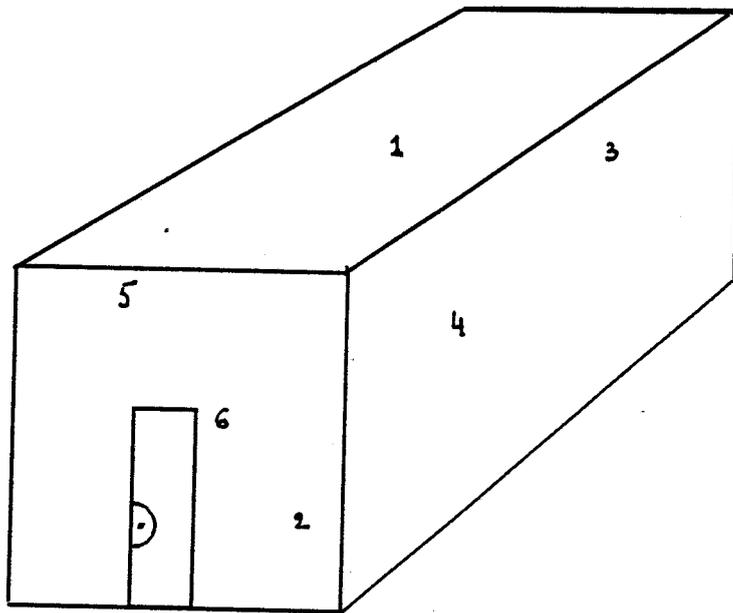


Figure III<sub>1</sub>

Structure Paroi	Légère I	Mi-légère II	Mi-lourde III	Lourde IV
Plafond 1	Isolé	Isolé	Isolé	Isolé
Plancher 2	Isolé	Isolé	Isolé	Béton
Latérale 3	Isolée	Isolée	Béton	Béton
Latérale 4	Béton	Béton	Béton	Béton
Latérale 5	Isolée	Plâtre	Plâtre	Plâtre
Porte 6	Isolée	Isolée	Isolée	Isolée

Tableau IV.1

### III.2 REPONSE DU LOCAL: CONFIGURATION LEGERE I

Toutes les parois sont isolées de l'intérieur plancher et plafond compris , sauf une paroi latérale béton , de surface 6.78 m<sup>2</sup>.

#### III.2.1 Extraction naturelle

Nous présentons la réponse des parois - paroi béton , paroi isolée sur béton , et paroi isolée sur plâtre , plancher et plafond isolés - pour les trois modes de chauffage pour quelques valeurs caractéristiques du temps et pour une excitation du type : gradient de température de 10°C (air ambiant-centre du local et température constante du milieu extérieur).

#### III.2.1.a Chauffage radiatif.

La courbe figure III<sub>2</sub> donne les réponses en gradient de température des différentes parois en fonction du temps pour le chauffage radiatif.

Les courbes figures III<sub>3,4,5</sub> donnent les réponses en flux totaux , en flux convectifs et en flux radiatifs des différentes parois en fonction du temps .

Le tableau III<sub>2</sub> donne pour quelques valeurs caractéristiques du temps :

- Les gradients de température ( air ambiant- température de surface de la paroi ) notés  $\Delta T$  ( air , paroi ) , par exemple  $\Delta T$  ( air , béton ) signifie le gradient de température air ambiant et la surface de la paroi béton .

- Les flux totaux entrant dans les parois ainsi que ses composantes radiatives et convectives.

#### *a ) Remarques sur les gradients de température.*

- La température du plafond isolé ( paroi légère ) suit régulièrement la température de l'air ambiant ; ceci est lié à l'effusivité du matériau polystyrène  $b = 50 \text{ J/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}\sqrt{\text{s}}$

La paroi plancher même bien isolée , présente , en régime transitoire ( les trois

premières heures ) , un retard de montée en température très important voisin de 8°C par rapport à la température ambiante qui est due à de fortes stratifications de température au voisinage du plancher.

- La température de la paroi lourde béton présente durant les trois premières heures un gradient de température de l'ordre de 9°C.

Rappelons qu'il s'agit d'un phénomène classique de la montée de température en régime d'effusivité d'un matériau lourd  $b = 2000 \text{ J/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}\sqrt{\text{s}}$ .

*b ) Remarques sur les flux .*

Les flux totaux entrant dans chacune des parois " plâtre isolé " et "paroi béton" suivent les gradients de température .

L'analyse des composantes radiatives et convectives du flux total montre des disparités liées au mode de chauffage.

La composante convective du flux total est importante pour la paroi lourde de l'ordre de  $30 \text{ w/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$  .

La composante radiative du flux total est moins importante de l'ordre de  $6 \text{ w/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$  .

Le bilan des flux radiatifs est faible .

**III.2.1.b Chauffage convectif.**

La courbe figure III<sub>6</sub> donne les réponses en gradient de température des différentes parois en fonction du temps pour le chauffage convectif

Les courbes figures III<sub>7,8,9</sub> donnent les réponses en flux totaux , en flux convectifs et en flux radiatifs des différentes parois en fonction du temps .

Le tableau III<sub>3</sub> donne pour quelques valeurs caractéristiques du temps :

- Les gradients de température ( air ambiant- température de surface de la paroi ) .
- Les flux totaux entrant dans les parois ainsi que ses composantes radiative et convective.

*a ) Remarques sur les gradients de température.*

Les remarques III.2.1.a sur les réponses en gradient de température des parois , restent valables pour le chauffage convectif .

*b ) Remarques sur les flux .*

Les flux totaux entrant dans chacune des parois plâtre isolé et paroi béton suivent les gradients de température .

Par contre les composantes convectives et radiatives des flux ne suivent pas linéairement les gradients de température . Les proportions varient largement .

La composante convective du flux total est importante pour la paroi lourde de l'ordre de  $25\text{w/m}^2\text{°C}$  .

La composante radiative du flux total est moins importante de l'ordre de  $9\text{w/m}^2\text{°C}$  : léger mieux que pour le chauffage radiatif .

Le bilan des flux radiatifs est aussi faible .

III.2.1.c Chauffage par le plancher .

La courbe figure III<sub>10</sub> donne les réponses en gradient de température des différentes parois en fonction du temps pour le chauffage par le plancher .

Les courbes figures III<sub>11,12,13</sub> donnent les réponses en flux totaux , en flux convectifs et en flux radiatifs des différentes parois en fonction du temps .

Le tableau III<sub>4</sub> donne pour quelques valeurs caractéristiques du temps :

- Les gradients de température ( air ambiant- température de surface de la paroi ) .
- Les flux totaux entrant dans les parois ainsi que ses composantes radiative et convective.

*a ) Remarques sur les gradients de température.*

-La température du plafond isolé ( paroi légère ) suit régulièrement la température de l'air ambiant mais reste toujours inférieure à celle de l'air ambiant ceci est dû à une stratification de couches d'air.

-Le plancher isolé présente toujours un gradient de température de l'ordre de  $3\text{°C}$  pour le chauffage par le plancher . Ceci est lié au chauffage localisé ( contact du

cable résistif chauffant avec la paroi isolée plancher ) et à des stratifications partielles .

- Pour un plancher à température uniforme , on montre que cette stratification est supprimée en presque totalité .

- La température de la paroi lourde béton présente un gradient de température de l'ordre de 8°C pour le chauffage par le plancher pour les trois premières heures .

*b ) Remarques sur les flux .*

Les flux totaux entrant dans chacune des parois plâtre isolé et paroi béton suivent les gradients de température .

La paroi plancher bien isolée , présente en régime transitoire , pour le chauffage par le sol un flux total important ( sortant ) .

Pour la paroi latérale lourde :

- La composante convective du flux total est importante de l'ordre de 26w/m<sup>2</sup>°C .
- La composante radiative du flux total est de l'ordre de 6w/m<sup>2</sup>°C .

III2.2 Extraction moyenne .

Nous présentons à nouveau la réponse des parois pour les trois modes de chauffage pour quelques valeurs caractéristiques du temps et pour un gradient de température 10 °C ( air ambiant-air extérieur ) l'extraction d'air chaud est d'environ 14 m<sup>3</sup>/heure :

-Les courbes figures III<sub>14,15,16</sub> , donnent respectivement les réponses du gradient de température des différentes parois en fonction du temps pour les trois modes de chauffage .

-Les courbes III<sub>17-25</sub> , donnent respectivement les réponses en flux totaux , en flux radiatifs et en flux convectifs des différentes parois en fonction du temps pour les trois modes de chauffage.

Nous donnons tableaux III<sub>5,6,7</sub> pour quelques valeurs caractéristiques du temps : les gradients de températures ( air ambiant-surface de la paroi ) notés  $T(a, \text{paroi})$ , les flux totaux entrant dans les parois ainsi que ses composantes radiatives et convectives. Remarque : il faut fournir une énergie nettement supérieure à celle fournie extraction naturelle pour maintenir le gradient de  $10^{\circ}\text{C}$  ( coefficient de l'ordre de 1.2 ) [14].

*a) Analyse des gradients de température .*

Les températures plafond , parois sont équivalentes à celles de l'extraction faible.

*b) Analyse des flux.*

Rappelons que pour une extraction moyenne , l'énergie fournie est plus importante que pour une extraction naturelle ( évacuation de l'énergie par extraction ).

- Les flux totaux entrants suivent les gradients de température , toutefois le flux total de la paroi plâtre isolée est légèrement inférieur .

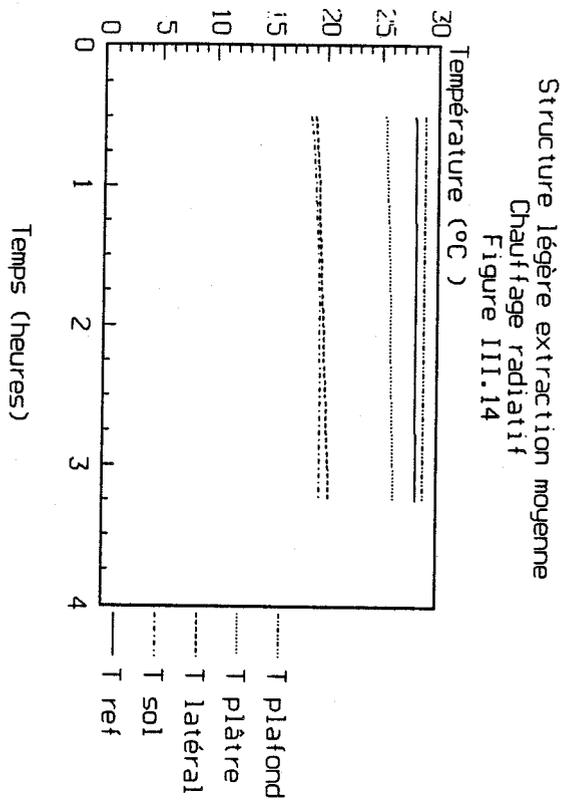
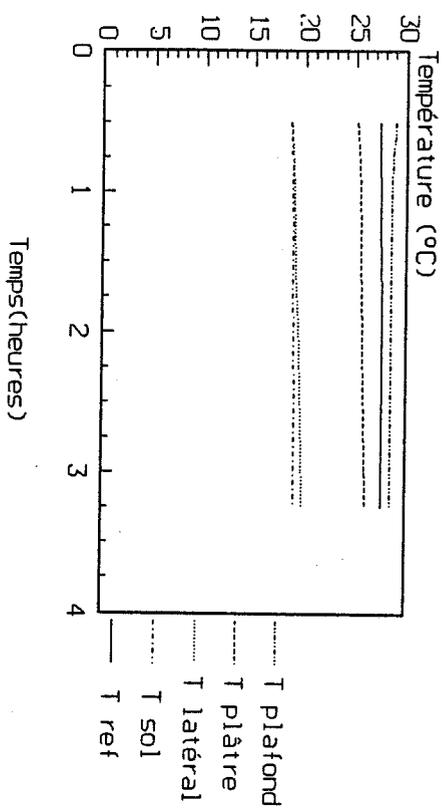
- On retrouve aussi la même analyse concernant les composantes radiatives et convectives des flux entrants:

A nouveau , l'analyse des flux radiatifs et convectifs sur les parois permet de comprendre pourquoi pour un même gradient de température  $10^{\circ}\text{C}$  , pour une même extraction d'air , l'utilisation d'un chauffage majoritairement radiatif permet une économie d'énergie importante.

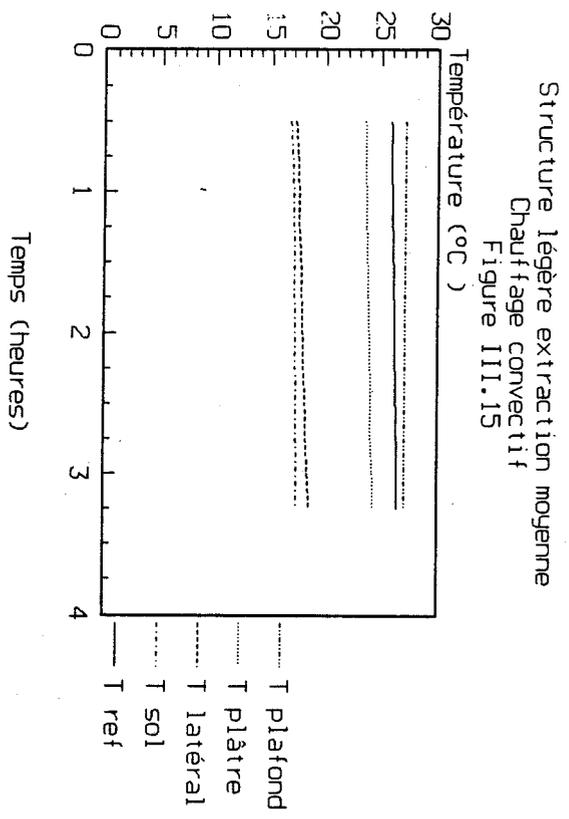
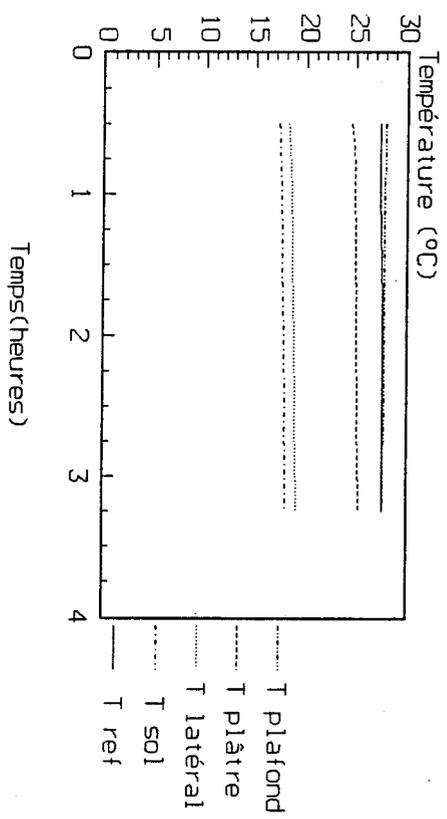
Dans le cas du chauffage à partir du plancher , on augmente l'influence du plancher comme source secondaire d'énergie ceci diminue la stratification de l'air .

On constate que les mécanismes ( évolution des gradients de températures et des flux radiatifs et convectifs ) mis en évidence sont de même nature pour les renouvellements d'air , faible et moyen , pourtant l'extraction moyenne est plus importante et les consommations énergétiques ( extraction faible -extraction moyenne) varient dans un rapport chauffage radiatif , chauffage convectif et chauffage par sol.

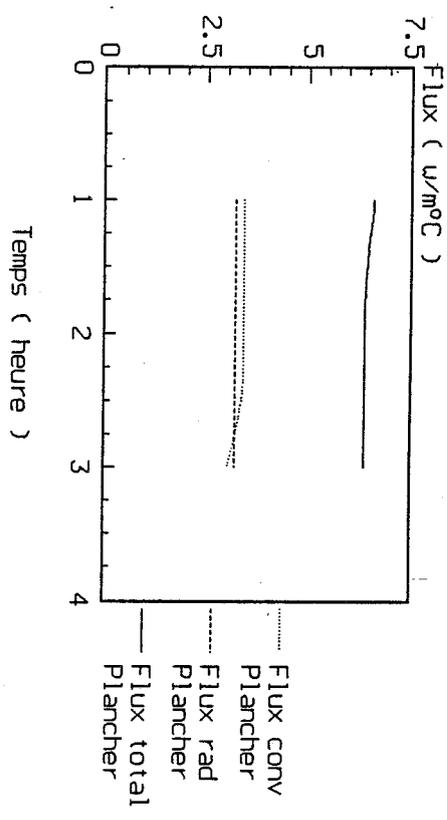
Structure légère: chauffage radiatif  
Extraction naturelle  
Figure III.2



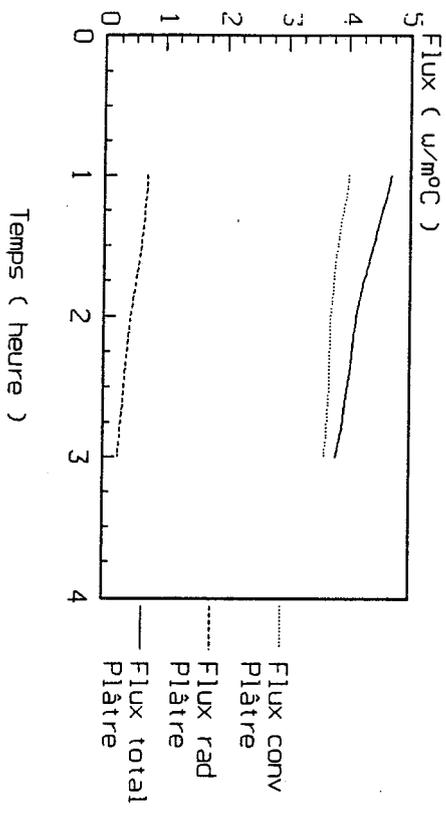
Structure légère: chauffage convectif  
Extraction naturelle  
Figure III.6



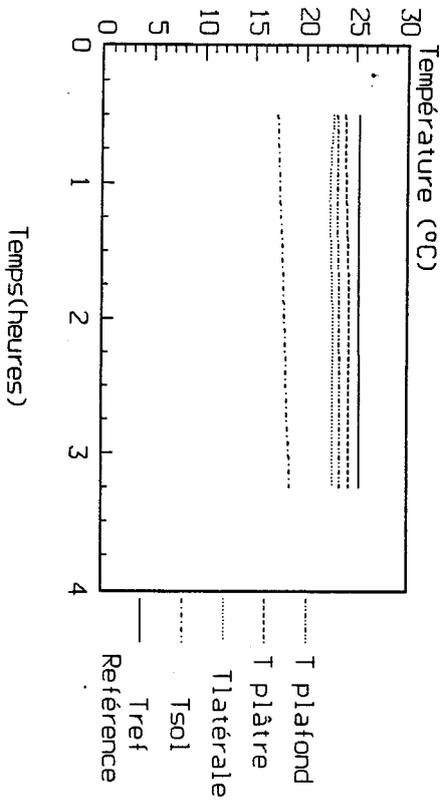
Structure légère : chauffage radiatif  
 Extraction naturelle  
 Paroi Plancher  
 Figure III.3



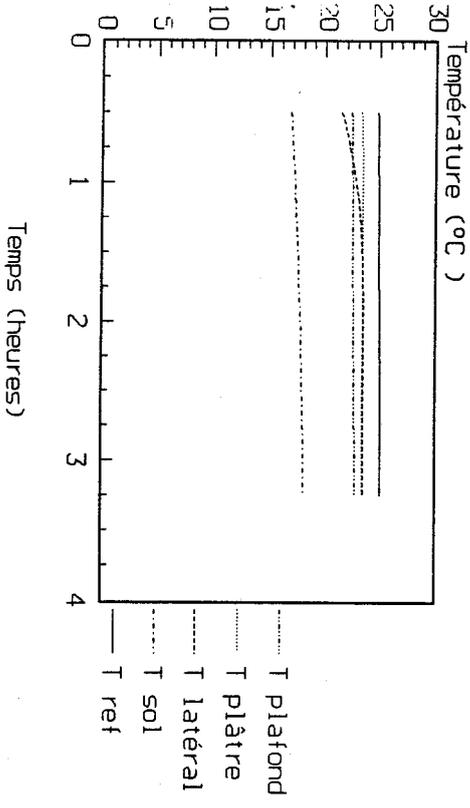
Structure légère : Chauffage radiatif  
 Extraction naturelle  
 Paroi plâtre  
 Figure III.4



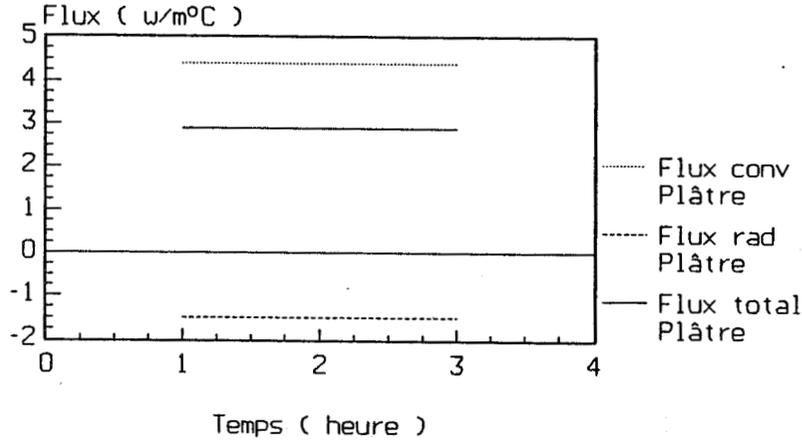
Structure légère : chauffage par cable  
 Extraction naturelle  
 Figure III.10



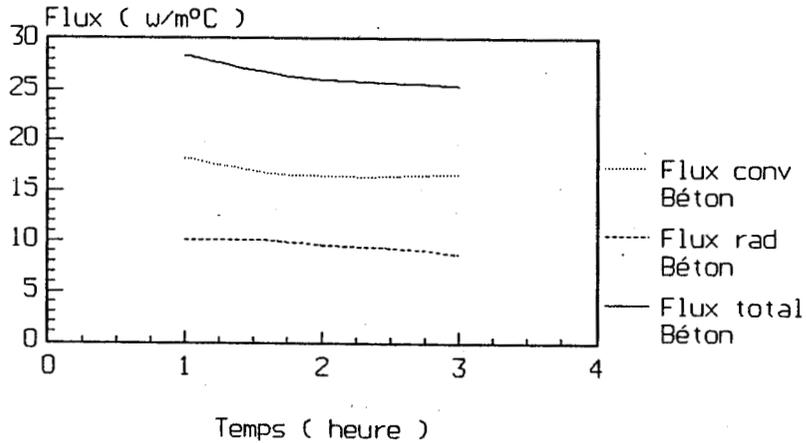
Structure légère extraction moyenne  
 Chauffage par le sol par cable  
 Figure III.16



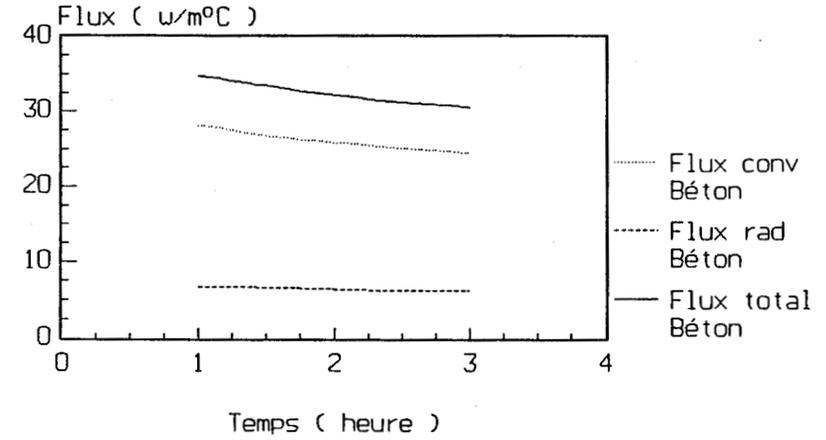
Structure légère : Chauffage convectif  
Extraction naturelle  
Paroi plâtre  
Figure III.8



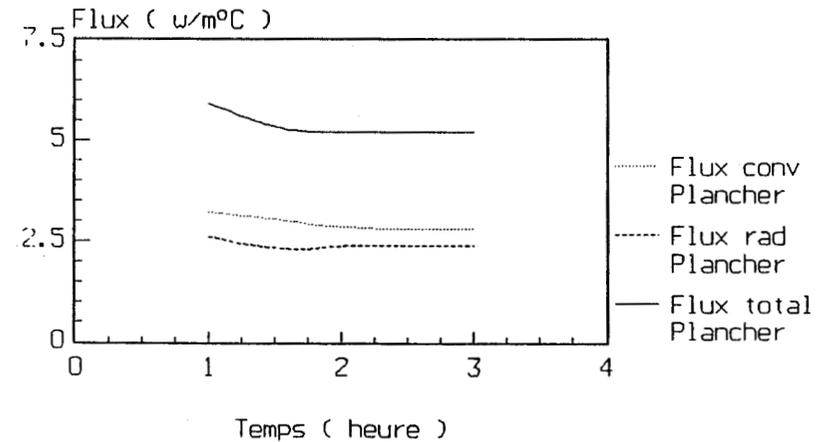
Structure légère : chauffage convectif  
Extraction naturelle  
Paroi Béton  
Figure III.9



Structure légère : chauffage radiatif  
Extraction naturelle  
Paroi Béton  
Figure III.5



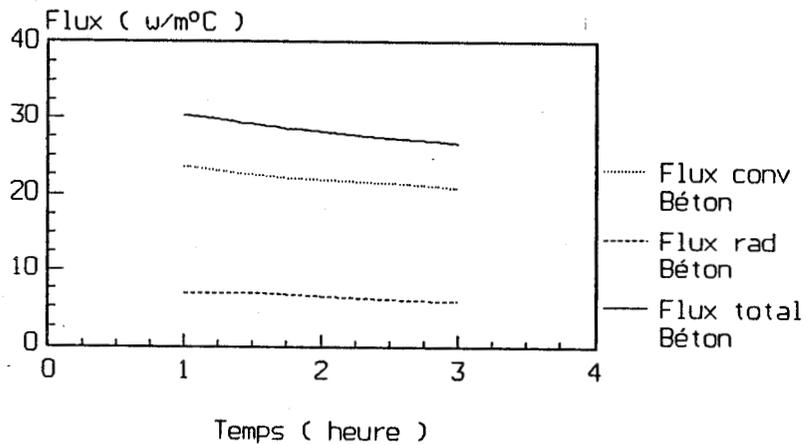
Structure légère : chauffage convectif  
Extraction naturelle  
Paroi plancher  
Figure III.7



Structure légère : chauffage par sol  
Extraction naturelle

Paroi Béton

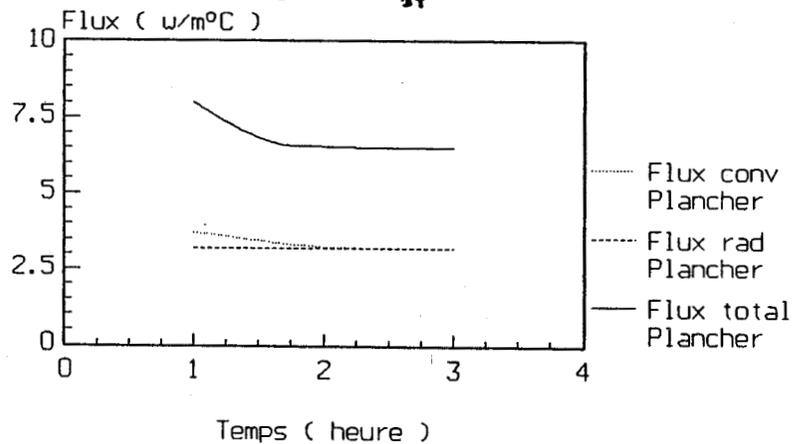
Figure III.13



Structure légère : chauffage radiatif  
Extraction moyenne

Paroi plancher

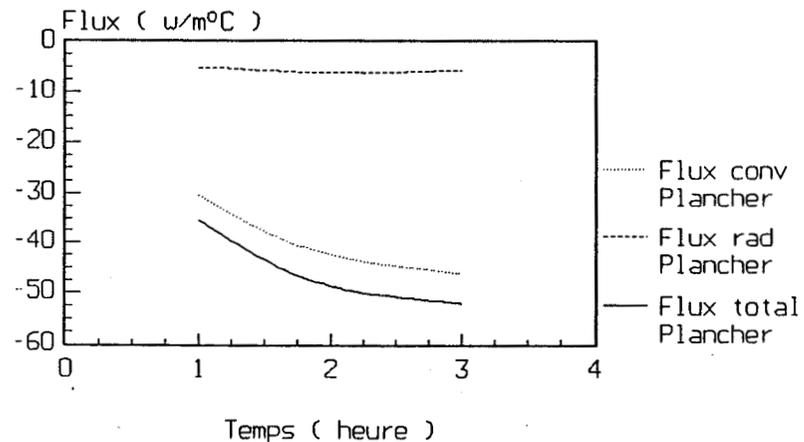
Figure III.14



Structure légère : chauffage par sol  
Extraction naturelle

Paroi plancher

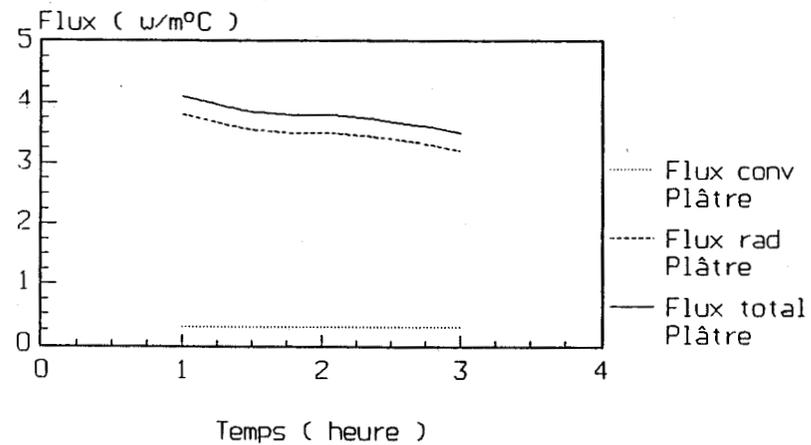
Figure III.11



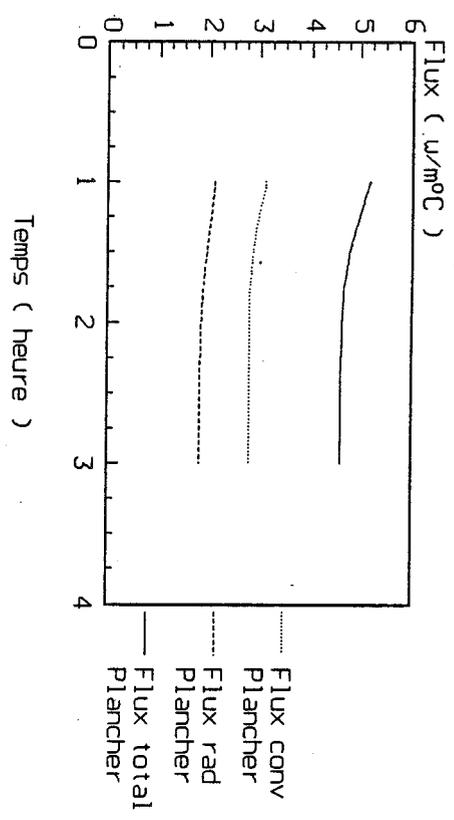
Structure légère : Chauffage par sol  
Extraction naturelle

Paroi plâtre

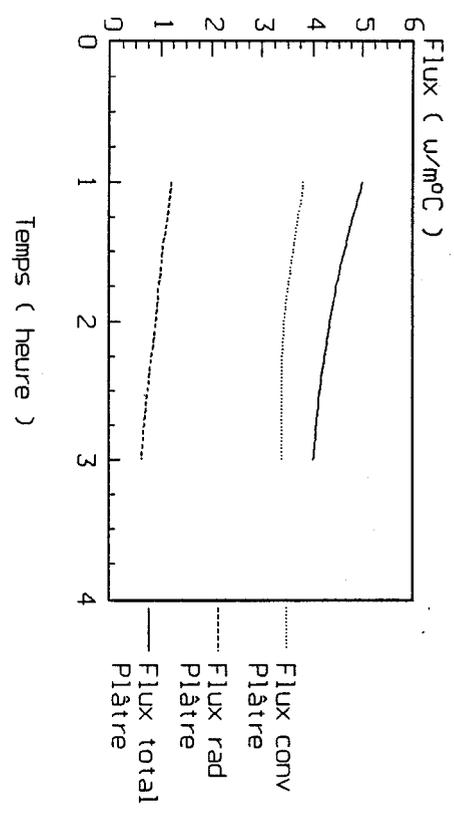
Figure III.12



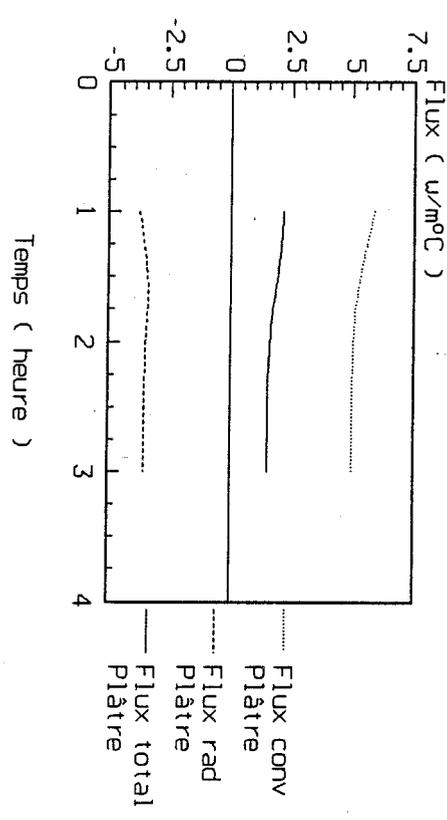
Structure légère : chauffage convectif  
Extraction moyenne  
Paroi Plâtrer  
Figure III.20



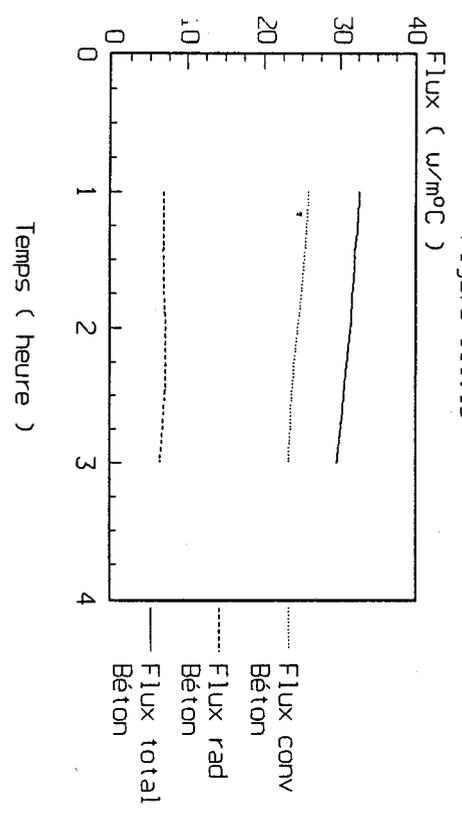
Structure légère : chauffage radiatif  
Extraction moyenne  
Paroi Plâtrer  
Figure III.18



Structure légère : Chauffage convectif  
Extraction moyenne  
Paroi Plâtrer  
Figure III.21

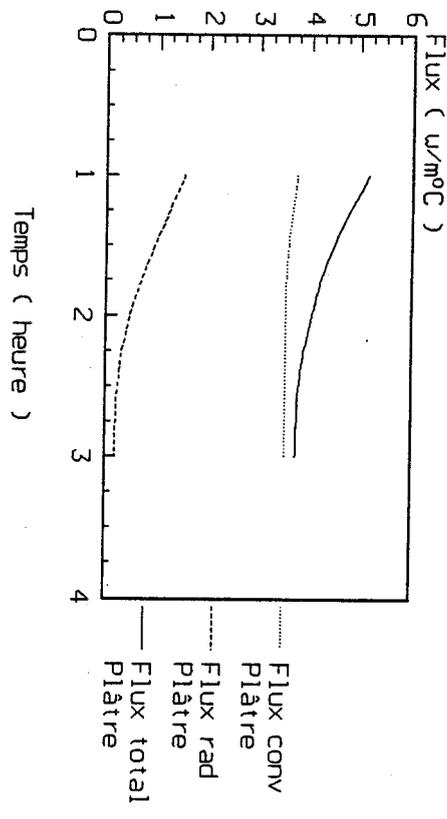


Structure légère : chauffage radiatif  
Extraction moyenne  
Paroi Béton  
Figure III.19



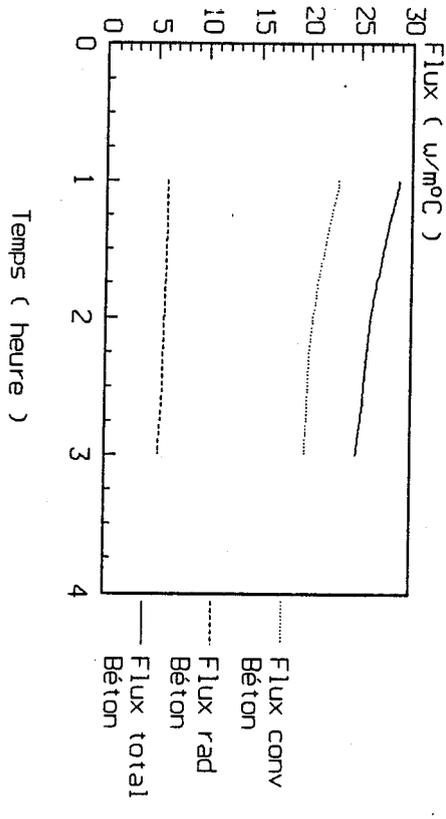
Structure légère : Chauffage par sol  
Extraction moyenne  
Paroi Plâtre

Figure III.24



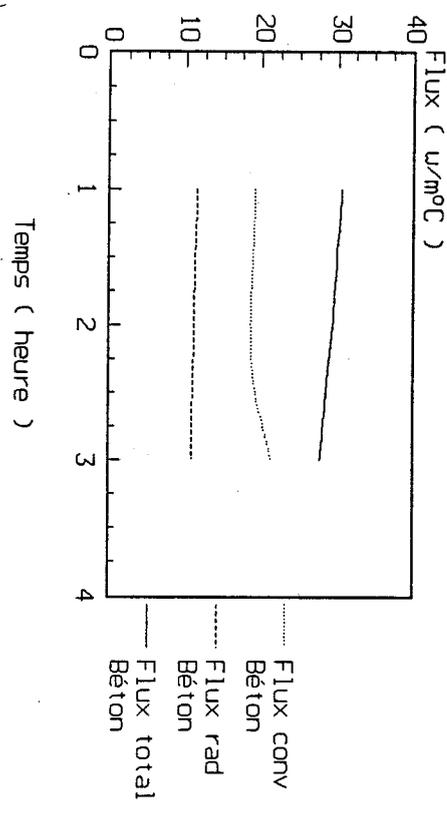
Structure légère : chauffage par sol  
Extraction moyenne  
Paroi Béton

Figure III.25



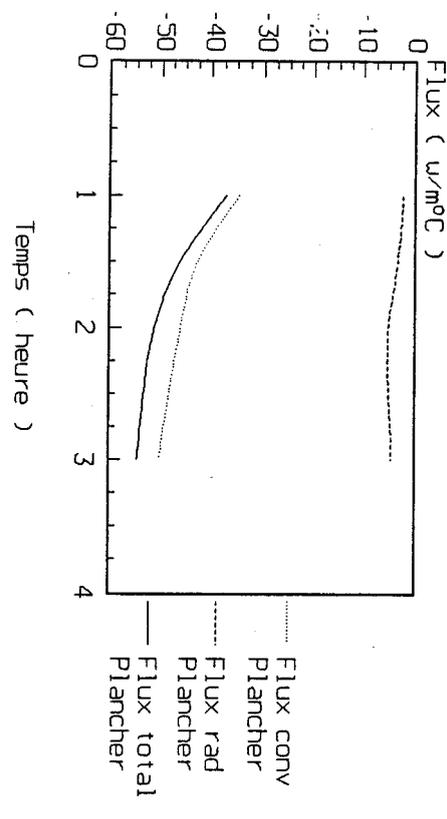
Structure légère : chauffage convectif  
Extraction moyenne  
Paroi Béton

Figure III.22



Structure légère : chauffage par sol  
Extraction moyenne  
Paroi Plancher

Figure III.23



Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de température air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_f)$	+1.1	+1.0	+0.9	+0.8	+0.8
$\Delta T(a, P_A)$	-2.1	-2.0	-1.9	-1.8	-1.7
$\Delta T(a, P_c)$	-8.6	-8.4	-8.3	-8.0	-7.9
$\Delta T(a, B_E)$	-8.7	-8.7	-8.7	-8.6	-8.6

Flux total en  $w/m^2C$

$\bar{q}_t(P_c)$	6.6	6.4	6.4	6.4	6.4
$\bar{q}_t(P_A)$	4.7	4.4	4.1	4	3.8
$\bar{q}_t(B_E)$	34.8	33.3	32.1	31.1	30.5

Flux radiatif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_r(P_c)$	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
$\bar{q}_r(P_A)$	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2
$\bar{q}_r(B_E)$	6.7	6.5	6.4	6.1	6.1

Flux convectif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_c(P_c)$	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
$\bar{q}_c(P_A)$	4	3.8	3.7	3.7	3.6
$\bar{q}_c(B_E)$	28.1	26.5	25.8	25	24.4

Tableau III<sub>2</sub>

Structure:Légère Chauffage:Radiatif Extraction:Naturelle

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de température air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_f)$	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.1
$\Delta T(a, P_A)$	-1.4	-1.3	-1.3	-1.2	-1.2
$\Delta T(a, P_c)$	-3.0	-3.0	-2.9	-2.8	-2.8
$\Delta T(a, B_E)$	-8.0	-7.8	-7.7	-7.4	-7.2

Flux total en  $w/m^2C$

$\bar{q}_t(P_c)$	-35.5	-44.4	-49.2	-51.4	-52.1
$\bar{q}_t(P_A)$	4.1	3.8	3.8	3.7	3.5
$\bar{q}_t(B_E)$	30.3	29	28	27.1	26.5

Flux radiatif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_r(P_c)$	-5.2	-5.9	-6.3	-6.2	-5.7
$\bar{q}_r(P_A)$	3.8	3.5	3.5	3.4	3.2
$\bar{q}_r(B_E)$	6.8	6.8	6.3	5.9	5.6

Flux convectif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_c(P_c)$	-30.3	-38.5	-42.8	-45.2	-46.3
$\bar{q}_c(P_A)$	.29	.29	.29	.29	.29
$\bar{q}_c(B_E)$	23.5	22.3	21.8	21.2	20.7

Tableau III<sub>3</sub>

Structure:Légère Chauffage:Par plancher Extraction:Naturelle

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de température air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_f)$	+0.05	+0.4	+0.3	+0.3	+0.2
$\Delta T(a, P_A)$	-2.6	-2.5	-2.5	-2.4	-2.3
$\Delta T(a, P_c)$	-8.9	-8.8	-8.8	-8.7	-8.6
$\Delta T(a, B_E)$	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8

Flux total en  $w/m^2C$

$\bar{q}_t(P_c)$	5.9	5.2	5.2	5.2	5.2
$\bar{q}_t(P_A)$	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
$\bar{q}_t(B_E)$	28.3	26.8	25.9	25.6	25.3

Flux radiatif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_r(P_c)$	2.6	2.2	2.4	2.4	2.4
$\bar{q}_r(P_A)$	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
$\bar{q}_r(B_E)$	10.1	10.1	9.5	9.3	8.7

Flux convectif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_c(P_c)$	3.2	3	2.8	2.8	2.8
$\bar{q}_c(P_A)$	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
$\bar{q}_c(B_E)$	18.2	16.7	16.4	16.3	16.6

Tableau III<sub>3</sub>

Structure:Légère Chauffage:Convectif Extraction:Naturelle

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de température air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_f)$	+1.08	+0.8	+0.3	+0.7	+0.7
$\Delta T(a, P_A)$	-3.1	-2.2	-2.2	-2.1	-2.0
$\Delta T(a, P_c)$	-8.3	-8.3	-8.1	-8.0	-7.9
$\Delta T(a, B_E)$	-9.0	-8.8	-8.7	-8.7	-8.7

Flux total en  $w/m^2C$

$\bar{q}_t(P_c)$	7.9	6.6	6.5	6.5	6.5
$\bar{q}_t(P_A)$	5	4.6	4.5	4.1	4
$\bar{q}_t(B_E)$	72.2	71.3	71.4	70.4	69.8

Flux radiatif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_r(P_c)$	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
$\bar{q}_r(P_A)$	1.2	1	0.9	0.7	0.6
$\bar{q}_r(B_E)$	6.3	6.0	7.1	7	6.2

Flux convectif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_c(P_c)$	0.7	0.4	0.2	0.2	0.2
$\bar{q}_c(P_A)$	3.8	3.6	3.6	3.4	3.4
$\bar{q}_c(B_E)$	18.2	18.2	14.7	13.4	13.2

Tableau III<sub>4</sub>

Structure:Légère Chauffage:Radiatif Extraction:Mixte

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_f)$	+1.1	+1.0	+0.9	+0.8	+0.7
$\Delta T(a, P_A)$	-2.5	-2.3	-2.3	-2.3	-2.2
$\Delta T(a, P_c)$	-8.5	-8.4	-8.4	-8.3	-8.2
$\Delta T(a, B_E)$	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0

Flux total en w/m²°C

$\dot{q}_t(P_c)$	5.2	4.7	4.6	4.6	4.6
$\dot{q}_t(P_A)$	2.1	1.9	1.5	1.5	1.5
$\dot{q}_t(B_E)$	30.5	29.8	29.3	28.4	27.6

Flux radiatif en w/m²°C

$\dot{q}_r(P_c)$	2.1	1.9	1.8	1.8	1.8
$\dot{q}_r(P_A)$	-3.8	-3.4	-3.6	-3.6	-3.6
$\dot{q}_r(B_E)$	11.4	11	11	10.7	10.7

Flux convectif en w/m²°C

$\dot{q}_c(P_c)$	3.1	2.8	2.8	2.8	2.8
$\dot{q}_c(P_A)$	5.9	5.2	5	5	5
$\dot{q}_c(B_E)$	19.1	18.8	18.4	18.3	21.3

Tableau III<sub>6</sub>

Structure:Légère Chauffage:Convectif Extraction:Moyenne

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_f)$	+9.1	+9.0	+9.0	+8.9	+8.7
$\Delta T(a, P_A)$	-7.3	-7.5	-7.4	-7.1	-6.7
$\Delta T(a, P_c)$	-6.6	-6.6	-6.6	-6.6	-6.6
$\Delta T(a, B_E)$	-8.4	-8.1	-7.9	-7.7	-7.5

Flux total en w/m²°C

$\dot{q}_t(P_c)$	9.3	8.9	8.7	8.7	8.7
$\dot{q}_t(P_A)$	33.9	30.2	27.3	24.7	22.2
$\dot{q}_t(B_E)$	45.3	43.1	41.2	39.6	38.1

Flux radiatif en w/m²°C

$\dot{q}_r(P_c)$	6.7	6.3	6.8	6.6	6.6
$\dot{q}_r(P_A)$	12.6	11.3	10.2	9.3	8.4
$\dot{q}_r(B_E)$	12.6	12.3	11.7	12.6	10.7

Flux convectif en w/m²°C

$\dot{q}_c(P_c)$	2.7	2.6	2.8	2.1	3
$\dot{q}_c(P_A)$	21.3	19	17	15.4	13.8
$\dot{q}_c(B_E)$	32.7	30.8	29.5	28.4	27.4

Tableau III<sub>7</sub>

Structure:Semi-légère Chauffage:Radiatif Extraction:Naturelle

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_f)$	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4
$\Delta T(a, P_A)$	-1.5	-1.4	-1.5	-1.4	-1.4
$\Delta T(a, P_c)$	-1.9	-1.4	-1.5	-1.4	-1.5
$\Delta T(a, B_E)$	-7.7	-7.5	-7.2	-7.3	-7.3

Flux total en w/m²°C

$\dot{q}_t(P_c)$	-37	-47.1	-51.7	-53.9	-54.9
$\dot{q}_t(P_A)$	5.18	4.4	4	3.7	3.7
$\dot{q}_t(B_E)$	28.8	27.2	26	25.3	24.7

Flux radiatif en w/m²°C

$\dot{q}_r(P_c)$	-2.2	-3.2	-5.5	-5.20	-4.4
$\dot{q}_r(P_A)$	1.5	0.9	0.4	0.15	0.15
$\dot{q}_r(B_E)$	6	5.7	5.8	5.6	5.2

Flux convectif en w/m²°C

$\dot{q}_c(P_c)$	-34.8	-43.8	-46.2	-48.7	-50.5
$\dot{q}_c(P_A)$	3.7	3.5	3.5	3.5	3.5
$\dot{q}_c(B_E)$	22.8	21.3	20.3	19.7	19.5

Tableau III<sub>7</sub>

Structure:Légère Chauffage:Par plancher Extraction:Moyenne

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_f)$	+1.0	+1.3	+1.0	+1.0	+1.0
$\Delta T(a, P_A)$	-4.6	-4.5	-4.3	-4.1	-4.0
$\Delta T(a, P_c)$	-8.4	-8.3	-8.2	-8.1	-8.0
$\Delta T(a, B_E)$	-9.6	-9.4	-9.2	-9.1	-8.9

Flux total en w/m²°C

$\dot{q}_t(P_c)$	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
$\dot{q}_t(P_A)$	19.9	17.6	16	15	14.4
$\dot{q}_t(B_E)$	22.7	23.1	21.9	21.6	21.6

Flux radiatif en w/m²°C

$\dot{q}_r(P_c)$	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
$\dot{q}_r(P_A)$	3.2	2.4	2.3	2.2	1.9
$\dot{q}_r(B_E)$	1.5	0.9	1.2	0.9	0.9

Flux convectif en w/m²°C

$\dot{q}_c(P_c)$	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
$\dot{q}_c(P_A)$	16.7	15.2	13.5	12.7	12.4
$\dot{q}_c(B_E)$	21.2	22.2	20.7	20.7	20.7

Tableau III<sub>9</sub>

Structure:Semi-légère Chauffage:Convectif Extraction:Naturelle

### III.3 ETUDE DE LA STRUCTURE MI-LEGERE II.

La structure est celle de la structure légère mais avec une paroi plâtre non isolée.

Il est évident qu'avec cette configuration, pour maintenir le même gradient air ambiant -environnement extérieur en régime transitoire, il faut fournir une énergie plus importante que pour la configuration I, et ceci pour chaque type d'extraction (en moyenne pour les trois premières heures, l'énergie à fournir est 1.2 celle de la surface).

#### III.3.1 Extraction naturelle.

Nous présentons la réponse des parois pour les trois modes de chauffage pour quelques valeurs caractéristiques du temps et pour un gradient de température de 10°C (air ambiant- puits de température constante).

Dans la suite au regard du nombre élevé des courbes relevées sur les flux, nous nous limitons à présenter les résultats sous formes de tableaux.

Les courbes figures III<sub>26,27,28</sub> donnent respectivement les réponses du gradient de température des différentes parois en fonction du temps pour les trois modes de chauffage.

Nous donnons tableaux III<sub>8,9,10</sub> les gradients de température (air ambiant-surface de paroi) et les flux totaux entrants dans les parois ainsi que ses composantes radiative et convective.

#### *a) Analyse des gradients de température.*

Rappelons que l'on fournit une énergie 1.2 fois supérieure (structure II) pour avoir le même  $\Delta T$  de 10°C.

Les conséquences sont une stratification de couches d'air plus importante au niveau du plafond isolé qui est beaucoup plus chaud (effets radiatifs).

Le gradient de température plancher air ambiant est plus faible pour le chauffage par le sol ( stratification plus faible ) .

La paroi béton s'échauffe plus rapidement  $0.5^{\circ}\text{C}$  du fait des composantes radiatives des flux ( influence du plafond comme source secondaire ) .

*b) Analyse des flux.*

- Paroi béton

Les flux totaux sont du même ordre .

Les composantes convectives du flux sont du même ordre pour les trois types de chauffage .

Les composantes radiatives sont différentes pour la structure II la température du plafond isolé nettement supérieure entraîne une composante radiative du flux de la paroi béton 1.5 fois supérieure .

-Paroi plâtre : en structure I cette paroi était isolée (  $b=50 \text{ J/m}^2\text{C}\sqrt{\text{s}}$  ) , en structure II le plâtre a une effusivité voisine de  $800 \text{ J/m}^2\text{C}\sqrt{\text{s}}$ , ainsi les variations de flux sont très importantes liées aux gradients de température . La comparaison avec la paroi plâtre isolée de l'intérieur ne peut être effectuée.

Les composantes des flux sont environ 16 fois plus importante .

-Plancher.

Le flux total (structure II ) est du même ordre pour le chauffage convectif , 1.5 fois supérieur pour le chauffage raditif ( plafond à température plus élevée ) . Pour le chauffage par le sol le flux sortant est 3 fois plus élevé .

La composante convective du flux total :

- est plus importante pour le chauffage par le sol .
- est diminuè de moitié pour le chauffage convectif (stratification des couches d'air)
- reste équivalente à celle de la structure I pour le chauffage radiatif.

La composante radiative du flux total :

- reste faible pour le chauffage par le sol .

- est plus importante que la contribution convective , du même ordre que celle de la structure I pour le chauffage convectif.

- a doublé structure II pour le chauffage radiatif .

Les couplages flux convectifs - flux radiatifs et les stratifications de l'air sont importants .

### III.3.2. Extraction moyenne .

Nous présentons à nouveau la réponse des parois pour les trois modes de chauffage pour quelques valeurs du temps et pour un gradient de température de 10°C ( air ambiant- puits de température constante ).

Les courbes figures III<sub>29-31</sub> donnent respectivement les réponses du gradient de température des différentes parois en fonction du temps pour les trois modes de chauffage.

Nous donnons tableaux III<sub>11,12,13</sub> les gradients de température (air ambiant-surface de paroi ) et les flux totaux entrants dans les parois ainsi que ses composantes radiatives et convectives.

### Remarques comparatives extraction naturelle , extraction moyenne structure II

1) L'énergie qu'il faut fournir est environ 1.2 fois plus forte pour le même gradient de température .

2 ) Le gradient de température est du même ordre pour le plafond , la paroi plâtre et la paroi béton latérale , légèrement supérieur pour le sol ( extraction moyenne ) .

3) Pour les flux

- Paroi plâtre : l'extraction d'air n'influe pas sur le flux total et ses composantes pour les trois modes de chauffage.

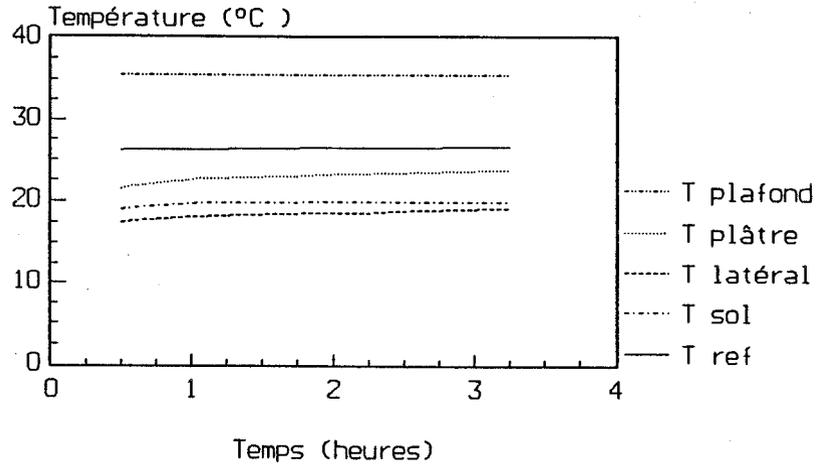
- Paroi béton : l'extraction diminue le flux total ( composante radiative ) pour les chauffages radiatifs et par le sol , par contre elle augmente le flux total pour les deux composantes pour le chauffage convectif.

- Plancher : l'extraction diminue le flux total ( composante radiative ) pour les chauffages radiatifs et par le sol , et elle augmente le flux pour les deux composantes pour le chauffage convectif.

Le plancher bien que fortement isolé présente un retard important en montée de température expliqué par une stratification de couches d'air.

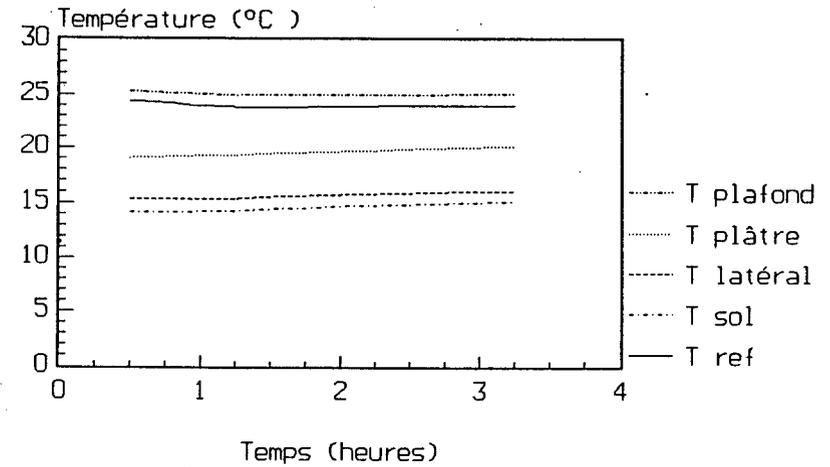
Structure Mi-légère extraction faible  
Chauffage radiatif

Figure III.26



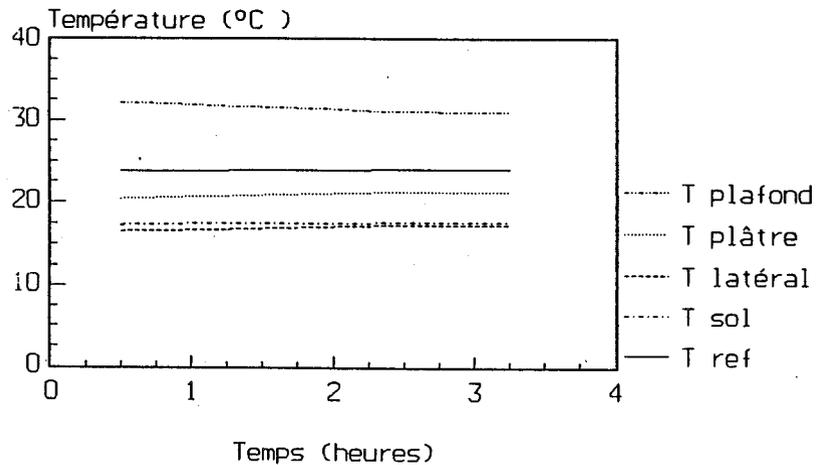
Structure Mi-légère extraction faible  
Chauffage convectif

Figure III.27



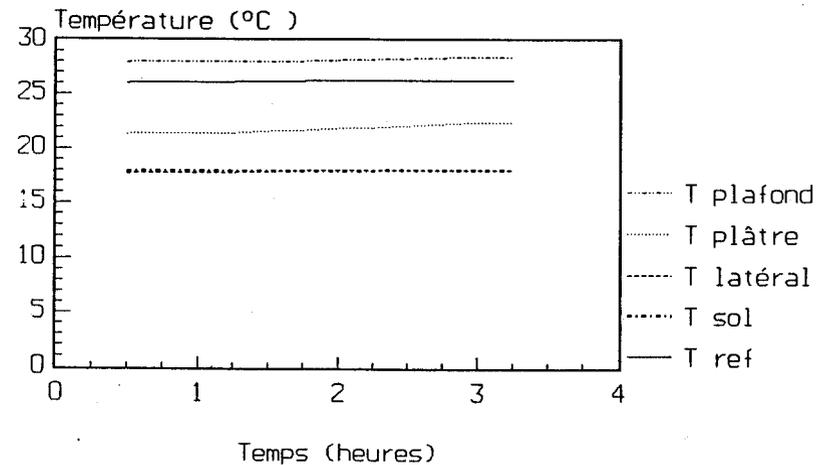
Structure Mi-légère Extraction moyenne  
Chauffage radiatif

Figure III.29

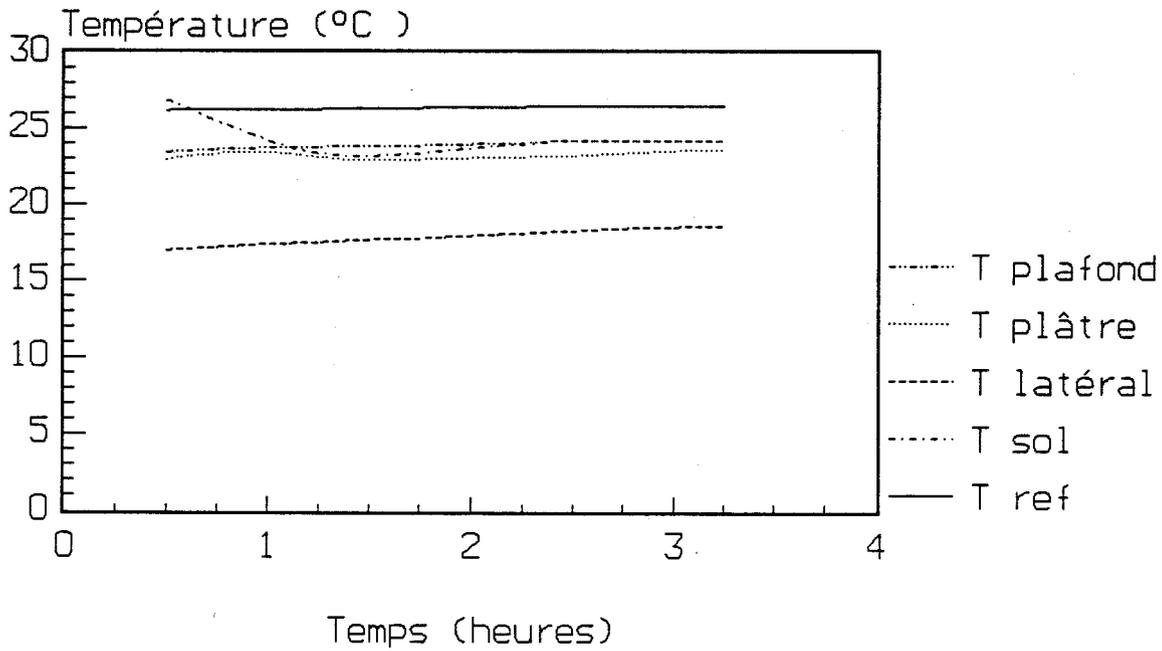


Structure Mi-légère Extraction moyenne  
Chauffage convectif

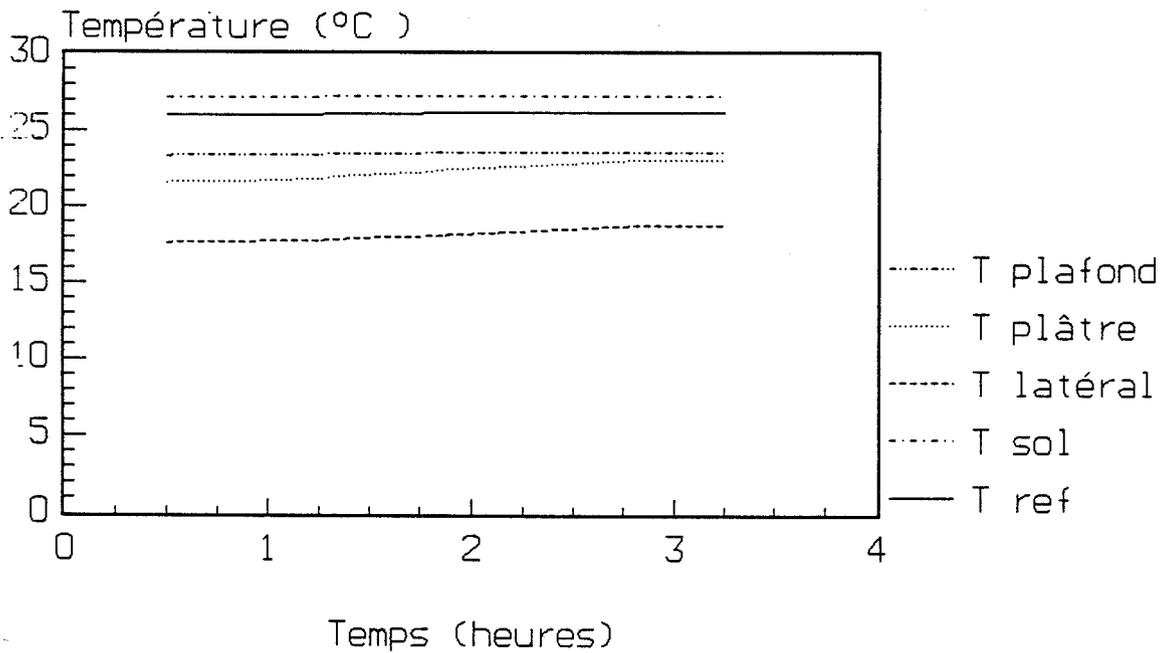
Figure III.30



Structure Mi-légère extraction faible  
 Chauffage par le sol par cable  
 Figure III.28



Structure Mi-légère Extraction moyenne  
 Chauffage par le sol par cable  
 Figure III.31



Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_F)$	-2.4	-2.6	-2.5	-2.3	-2.3
$\Delta T(a, P_A)$	-2.9	-3.5	-3.4	-3.2	-3.2
$\Delta T(a, P_c)$	-2.2	-2.1	-2.7	-2.3	-2.3
$\Delta T(a, B_E)$	-8.8	-8.6	-8.4	-8.2	-7.9

Flux total en  $w/m^2$

$\dot{q}_t(P_c)$	3.2	3	3	2.8	2.7
$\dot{q}_t(P_A)$	22.8	19.4	17.3	16.3	15
$\dot{q}_t(B_E)$	28.4	28.4	28.5	28.6	28.7

Flux radiatif en  $w/m^2$

$\dot{q}_r(P_c)$	1.8	1.3	1.2	1	0.7
$\dot{q}_r(P_A)$	5.6	4.7	4.3	3.8	3.5
$\dot{q}_r(B_E)$	7.1	6.8	6.7	6.5	6.4

Flux convectif en  $w/m^2$

$\dot{q}_c(P_c)$	1.5	1.6	1.8	1.9	1.9
$\dot{q}_c(P_A)$	17.2	14.7	13.5	12.6	11.7
$\dot{q}_c(B_E)$	21.3	21.6	21.9	22.1	22.4

Tableau III<sub>10</sub>

Structure: Semi-légère Chauffage: Par plancher Extraction: Naturelle

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_F)$	+1.9	+1.9	+1.9	+2.0	+2.2
$\Delta T(a, P_A)$	-4.7	-4.6	-4.4	-4.1	-3.8
$\Delta T(a, P_c)$	-8.2	-8.2	-8.2	-8.2	-8.1
$\Delta T(a, B_E)$	-8.3	-8.2	-8.2	-8.2	-8.2

Flux total en  $w/m^2$

$\dot{q}_t(P_c)$	5	5.3	5.6	5.8	6.1
$\dot{q}_t(P_A)$	22.2	21.5	19.7	18.2	16.4
$\dot{q}_t(B_E)$	29.9	30.5	30.8	30.4	29.5

Flux radiatif en  $w/m^2$

$\dot{q}_r(P_c)$	2.1	2.4	2.6	2.8	3.1
$\dot{q}_r(P_A)$	4.3	4.9	5.4	5.1	4.4
$\dot{q}_r(B_E)$	2.5	2.4	2.5	2.4	2.1

Flux convectif en  $w/m^2$

$\dot{q}_c(P_c)$	3	3	3	3	3
$\dot{q}_c(P_A)$	17.9	16.6	16.3	15.1	14.1
$\dot{q}_c(B_E)$	27.4	28.1	28.3	28	26.4

Tableau III<sub>12</sub>

Structure: Semi-légère Chauffage: Convectif Extraction: Moyenne

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_F)$	+8.3	+8.0	+7.7	+7.3	+7.0
$\Delta T(a, P_A)$	-3.5	-3.3	-3.1	-3.0	-2.8
$\Delta T(a, P_c)$	-6.8	-6.5	-6.2	-6.2	-6.4
$\Delta T(a, B_E)$	-7.3	-7.2	-7.0	-6.9	-6.8

Flux total en  $w/m^2$

$\dot{q}_t(P_c)$	3.7	3.5	3.7	3.1	3
$\dot{q}_t(P_A)$	21.7	28.2	25.5	23	21
$\dot{q}_t(B_E)$	29.1	27.4	26.3	24.4	23.5

Flux radiatif en  $w/m^2$

$\dot{q}_r(P_c)$	3.2	3	3.3	3.6	3.3
$\dot{q}_r(P_A)$	11.3	10.8	9.6	8.7	8.3
$\dot{q}_r(B_E)$	11.1	10.6	10.3	9.5	9.2

Flux convectif en  $w/m^2$

$\dot{q}_c(P_c)$	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6
$\dot{q}_c(P_A)$	10.4	17.4	15.7	14.3	12.7
$\dot{q}_c(B_E)$	18	16.8	15.9	14.8	14.3

Tableau III<sub>11</sub>

Structure: Semi-légère Chauffage: Radiatif Extraction: Moyenne

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_F)$	-2.7	-2.6	-2.6	-2.5	-2.5
$\Delta T(a, P_A)$	-4.4	-4.0	-3.7	-3.3	-3.0
$\Delta T(a, P_c)$	+1.1	+1.1	+1.1	+1.1	+1.1
$\Delta T(a, B_E)$	-8.4	-8.1	-7.9	-7.6	-7.4

Flux total en  $w/m^2$

$\dot{q}_t(P_c)$	5	5.3	5.6	5.8	6.1
$\dot{q}_t(P_A)$	21.6	19.4	17.8	16.9	16.1
$\dot{q}_t(B_E)$	27.3	26.5	25.9	25.3	25

Flux radiatif en  $w/m^2$

$\dot{q}_r(P_c)$	2.1	2.4	2.6	2.8	3.1
$\dot{q}_r(P_A)$	5.8	4.9	4.2	4.1	4
$\dot{q}_r(B_E)$	4.1	4	4.1	4.4	4.7

Flux convectif en  $w/m^2$

$\dot{q}_c(P_c)$	6.1	5.8	5.6	5.6	5.8
$\dot{q}_c(P_A)$	15.9	14.5	13.6	12.4	12
$\dot{q}_c(B_E)$	23.1	22.4	21.8	20.9	20.4

Tableau III<sub>13</sub>

Structure: Semi-légère Chauffage: Par plancher Extraction: Moyenne

### III.4 ETUDE DE LA STRUCTURE MI-LOURDE III.

Le plancher et le plafond sont isolés , deux parois latérales sont lourdes (béton) , une paroi latérale est en plâtre mi lourde ( structure II avec une deuxième paroi latérale béton ) .

Il est évident que pour cette configuration pour maintenir le même gradient air ambiant -environnement extérieur , il faut fournir une énergie plus importante que pour les structures I ou II , et ceci pour chaque type d'extraction .

#### III.4.1 Extraction naturelle .

A nouveau nous présentons la réponse des parois pour deux modes de chauffage ( l'un majoritairement radiatif , l'autre majoritairement convectif ) pour quelques valeurs caractéristiques du temps et pour un gradient de température de 10°C ( air ambiant- puits de température constante ) .

Les courbes figures III<sub>32,33</sub> donnent respectivement les réponses du gradient de température des différentes parois en fonction du temps pour les deux modes de chauffage.

Nous donnons tableaux III<sub>14,15</sub> les gradients de température (air ambiant-surface de paroi) et les flux totaux entrants dans les parois ainsi que ses composantes radiatives et convectives.

#### *a) Analyse des gradients de température.*

Le gradient de température du plafond isolé (structure III) est 6 fois plus important ( stratification de l'air ) pour le chauffage majoritairement radiatif , et il double pour le chauffage convectif . L'énergie fournie chauffe précédemment les surfaces à faible effusivité qui sont ensuite des sources secondaires .

Le gradient de température de la surface paroi plâtre ( structure III ) et celui de la paroi béton sont augmentés sensiblement pendant les trois premières heures pour les deux modes de chauffage.

Le plancher isolé ( structure III ) présente un gradient de température important de l'ordre de  $4^{\circ}\text{C}$  .

L'analyse des gradients de températures des parois met bien en évidence la supériorité - pour les systèmes à paroi lourde - du chauffage radiatif et du plafond isolé .

*b) Analyse des flux .*

Paroi lourde:

Le flux total fourni à la paroi (structure III ) est équivalent à celui de la structure I pour les deux types de chauffage ( radiatif et convectif ) et pour l'extraction naturelle et l'extraction moyenne .

La composante convective du flux total (structure III) est équivalente à celle de la (structure I ) pour le chauffage radiatif , mais 1.4 fois supérieure pour le chauffage convectif .

La composante radiative du flux totale structure III est 1.3 fois supérieure pour le chauffage radiatif , mais trois fois inférieure à celle de la structure I pour le chauffage convectif.

Paroi plâtre :

En structure I cette paroi étant isolée (  $b=50 \text{ J/m}^2\text{C}\sqrt{\text{s}}$  ) , en structure III le plâtre a une éffusivité voisine de  $800 \text{ J/m}^2\text{C}\sqrt{\text{s}}$ , ainsi les variations de flux sont très importantes liées aux gradient de température .

Le flux total structure III est 10 fois supérieur à celui de la structure II pour les deux modes de chauffage.

Les composantes convective et radiative du flux total structure III suivent le flux total dans les mêmes proportions .

Plancher:

Le flux total structure III est du même ordre que celui de la structure I est ce pour les deux modes de chauffage.

La composante convective du flux total structure III est du même ordre pour le chauffage convectif , 1.5 fois supérieure pour le chauffage radiatif .

La composante radiative du flux total structure III est du même ordre pour les deux modes de chauffage .

La supériorité du chauffage radiatif sur le chauffage convectif en température est confirmée par les flux totaux entrant dans les parois .

#### III.4.2 Extraction moyenne.

Nous présentons la réponse des parois pour deux modes de chauffage ( l'un majoritairement radiatif , l'autre majoritairement convectif ) pour quelques valeurs du temps et pour un gradient de température de  $10^{\circ}\text{C}$  ( air ambiant- puits de température constante ).

Les courbes figures III<sub>34,35</sub> donnent respectivement les réponses du gradient de température des différentes parois en fonction du temps pour les deux modes de chauffage.

Nous donnons tableaux III<sub>16,17</sub> les gradients de température (air ambiant-surface de paroi ) et les flux totaux entrants dans les parois ainsi que les composantes radiatives et convectives.

#### Remarques comparatives extraction naturelle , extraction moyenne .

1 ) L'énergie qu'il faut fournir pour le même gradient de température est environ 1.2 fois plus forte .

2 ) -Pour le chauffage radiatif l'extraction augmente le gradient de température du plafond isolé , de la paroi plâtre et du plancher isolé mais n'influence pas la paroi lourde béton .

- Pour le chauffage convectif : l'extraction augmente le gradient de température du plafond isolé et de la paroi plâtre mais n'influence pas la paroi béton , par contre elle diminue le gradient de température du plancher.

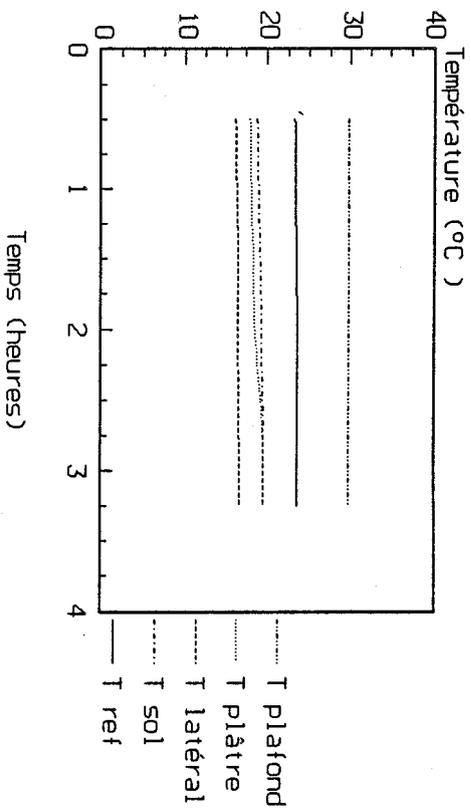
3 ) Pour les flux

- Paroi plâtre : l'extraction d'air n'influe pas le flux total et ses composantes pour les deux modes de chauffage.

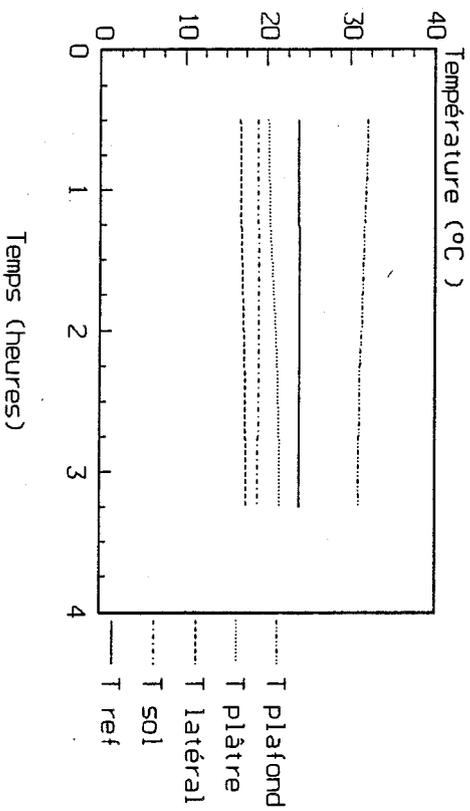
- Paroi béton : l'extraction d'air n'influe pas les flux totaux et leurs composantes pour les deux modes de chauffage.

- Plancher : l'extraction diminue le flux total émis , par sa composante radiative , pour le chauffage radiatif , par contre elle augmente le flux par ses deux composantes pour le chauffage convectif.

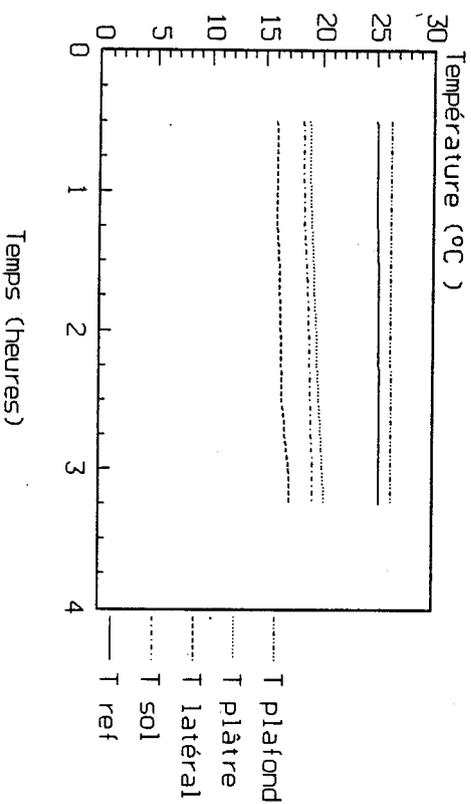
Structure Mi-lourde Extraction faible  
 Chauffage radiatif  
 Figure III.32



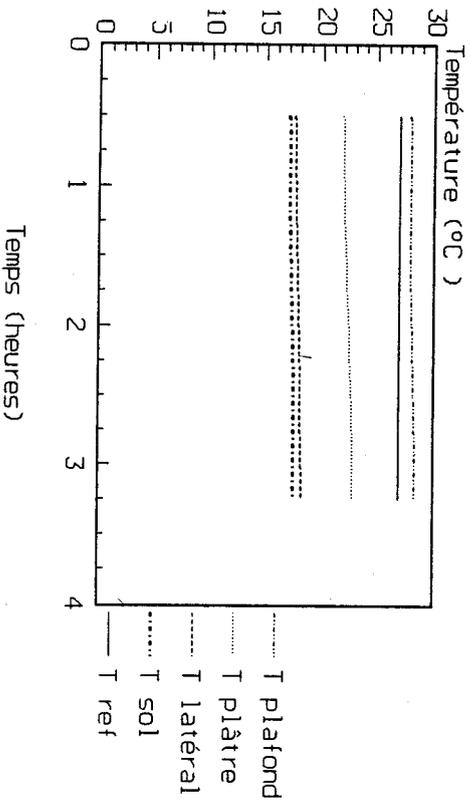
Structure Mi-lourde Extraction moyenne  
 Chauffage radiatif  
 Figure III.34



Structure Mi-lourde Extraction faible  
 Chauffage convectif  
 Figure III.33



Structure Mi-lourde Extraction moyenne  
 Chauffage convectif  
 Figure III.35



Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

radient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_r)$	+6.6	+6.5	+6.4	+6.3	+6.2
$\Delta T(a, P_A)$	-5.3	-4.9	-4.6	-4.3	-4.0
$\Delta T(a, P_c)$	-4.4	-4.3	-4.2	-4.1	-3.9
$\Delta T(a, B_E)$	-7.1	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9

lux total en w/m°C

$\dot{q}_t(P_c)$	7.5	7.3	7	6.9	7
$\dot{q}_t(P_A)$	28.1	25	22.7	20.6	20
$\dot{q}_t(B_E)$	32.9	32.1	31.6	30.9	29.9

lux radiatif en w/m°C

$\dot{q}_r(P_c)$	5.7	5.2	4.3	4.4	4.8
$\dot{q}_r(P_A)$	11	9.2	8.4	7.6	7.1
$\dot{q}_r(B_E)$	9	8.8	8.6	8.2	8.3

lux convectif en w/m°C

$\dot{q}_c(P_c)$	1.7	2.1	2.7	2.5	2.3
$\dot{q}_c(P_A)$	18.2	15.8	14.2	13	11.9
$\dot{q}_c(B_E)$	23.9	23.3	23.1	22.6	22

Tableau III<sub>14</sub>

Structure:Semi-lourde Chauffage:Radiatif Extraction:Naturelle

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

radient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_r)$	+7.2	+7.2	+6.9	+6.8	+6.5
$\Delta T(a, P_A)$	-3.7	-3.3	-2.9	-2.6	-2.4
$\Delta T(a, P_c)$	-4.9	-4.9	-4.9	-5.0	-5.1
$\Delta T(a, B_E)$	-7.1	-7.0	-6.8	-6.7	-6.5

lux total en w/m°C

$\dot{q}_t(P_c)$	6.2	6.1	6.1	6.1	6.1
$\dot{q}_t(P_A)$	29.9	27.1	24.6	22.4	20.4
$\dot{q}_t(B_E)$	37.3	36.4	34.8	34.1	33.6

lux radiatif en w/m°C

$\dot{q}_r(P_c)$	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
$\dot{q}_r(P_A)$	11.3	10.5	9.6	8.9	8.2
$\dot{q}_r(B_E)$	10.5	10.4	9.6	9.6	9.9

lux convectif en w/m°C

$\dot{q}_c(P_c)$	3.1	3	3	3	3
$\dot{q}_c(P_A)$	18.7	16.6	15	13.5	12.1
$\dot{q}_c(B_E)$	26.8	26.1	25.2	24.4	23.7

Tableau III<sub>16</sub>

Structure:Semi-lourde Chauffage:Radiatif Extraction:Moyenne

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_r)$	+1.3	+1.2	+1.1	+1.1	+1.0
$\Delta T(a, P_A)$	-6.2	-5.9	-5.7	-5.5	-5.2
$\Delta T(a, P_c)$	-6.8	-6.5	-6.4	-6.3	-6.1
$\Delta T(a, B_E)$	-9.1	-9.0	-8.9	-8.8	-8.2

Flux total en w/m°C

$\dot{q}_t(P_c)$	4.3	4.4	4.4	4.4	4.4
$\dot{q}_t(P_A)$	18.1	16.2	15.3	14.5	13.9
$\dot{q}_t(B_E)$	23.7	23.6	23.4	23.3	23.4

Flux radiatif en w/m°C

$\dot{q}_r(P_c)$	2.1	2.2	2.2	2.2	2.1
$\dot{q}_r(P_A)$	2.8	4.3	2.1	2.1	1.6
$\dot{q}_r(B_E)$	1.7	1.6	2.1	1.9	1.4

Flux convectif en w/m°C

$\dot{q}_c(P_c)$	2.2	2.2	2.2	2.2	2.4
$\dot{q}_c(P_A)$	15.3	11.9	13.2	12.4	12.3
$\dot{q}_c(B_E)$	22	21.9	21.5	21.3	21.5

Tableau III<sub>15</sub>

Structure:Semi-lourde Chauffage:Convectif Extraction:Naturelle

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de temperature air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_r)$	+2.1	+2.0	+2.0	+1.9	+1.9
$\Delta T(a, P_A)$	-5.2	-4.9	-4.7	-4.4	-4.2
$\Delta T(a, P_c)$	-10	-9.9	-9.7	-9.6	-9.5
$\Delta T(a, B_E)$	-9.4	-9.3	-9.1	-9.0	-8.9

Flux total en w/m°C

$\dot{q}_t(P_c)$	4.7	5	5.2	5.2	5.3
$\dot{q}_t(P_A)$	20.6	18.4	17	16	14.7
$\dot{q}_t(B_E)$	29.8	29	28.7	27.3	26.9

Flux radiatif en w/m°C

$\dot{q}_r(P_c)$	2.2	2.4	2.5	2.4	2.4
$\dot{q}_r(P_A)$	3	1.9	1.9	1.8	1.5
$\dot{q}_r(B_E)$	2.7	2.7	4.1	3.1	3.2

Flux convectif en w/m°C

$\dot{q}_c(P_c)$	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
$\dot{q}_c(P_A)$	17.6	16.4	15.1	14.2	13.2
$\dot{q}_c(B_E)$	27.1	26.4	24.6	24	23.7

Tableau III<sub>17</sub>

Structure:Semi-lourde Chauffage:Convectif Extraction:Moyenne

### III.5 ETUDE DE LA STRUCTURE LOURDE IV.

Le plafond est isolé , deux parois latérales sont lourdes ( béton ) , une paroi latérale en plâtre , le plancher est lourd ( structure III avec plancher lourd ) .

Il est évident que pour cette configuration pour maintenir le même gradient air-ambiant -environnement extérieur , il faut fournir une énergie plus importante que pour les autres configurations ( I , II ou III ) , et ceci pour chaque mode de chauffage.

Nous n'étudions que l'extraction naturelle .

Nous comparons qualitativement le comportement des parois pour cette structure en chauffage majoritairement radiatif et convectif.

#### *a) Analyse comparative des températures structure III et IV .*

Pour la paroi plafond isolé la température est nettement supérieure pour le chauffage radiatif à la température ambiante , plusieurs degrés pour la configuration III voisin de 1°C pour la configuration IV .

Pour le chauffage convectif les gradients sont différents , la paroi plafond reste à température supérieure à l'air ambiant mais le mécanisme précédent est inversé du fait des tourbillons .

Le gradient de température de la surface de la paroi plâtre est plus petit de 1°C ( structure III ) pour le chauffage radiatif , est plus grand de 2°C ( structure III) pour le chauffage convectif .

Le gradient de température de surface des parois béton est du même ordre pour le chauffage radiatif , plus petit de 3°C (structure III ) pour le chauffage convectif.

Le plancher isolé structure III est toujours plus chaud ( ceci est évident ) que la structure IV .

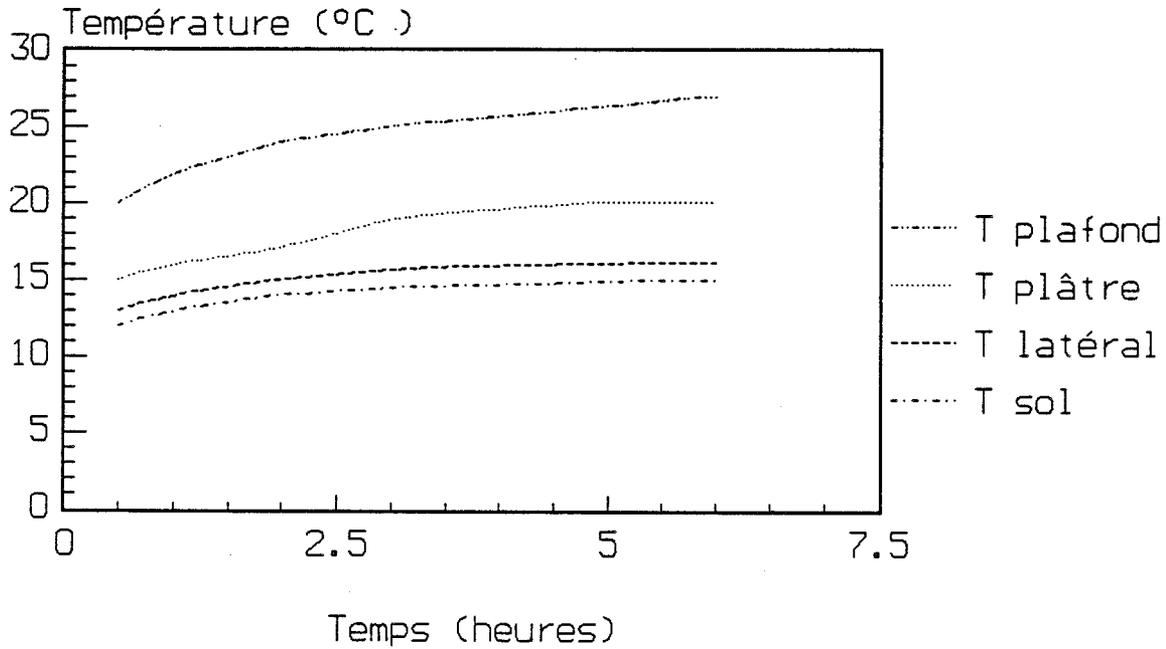
*b) Analyse comparative des flux structures III et IV.*

Plâtre: le flux total est du même ordre de grandeur pour le chauffage radiatif , est diminué de moitié ( structure IV ) par sa composante convective pour le chauffage convectif .

Béton : le flux total( structure IV ) est 1.5 fois plus grand par sa composante radiative pour le chauffage radiatif , est 1.3 fois plus grand par ses deux composantes pour le chauffage convective .

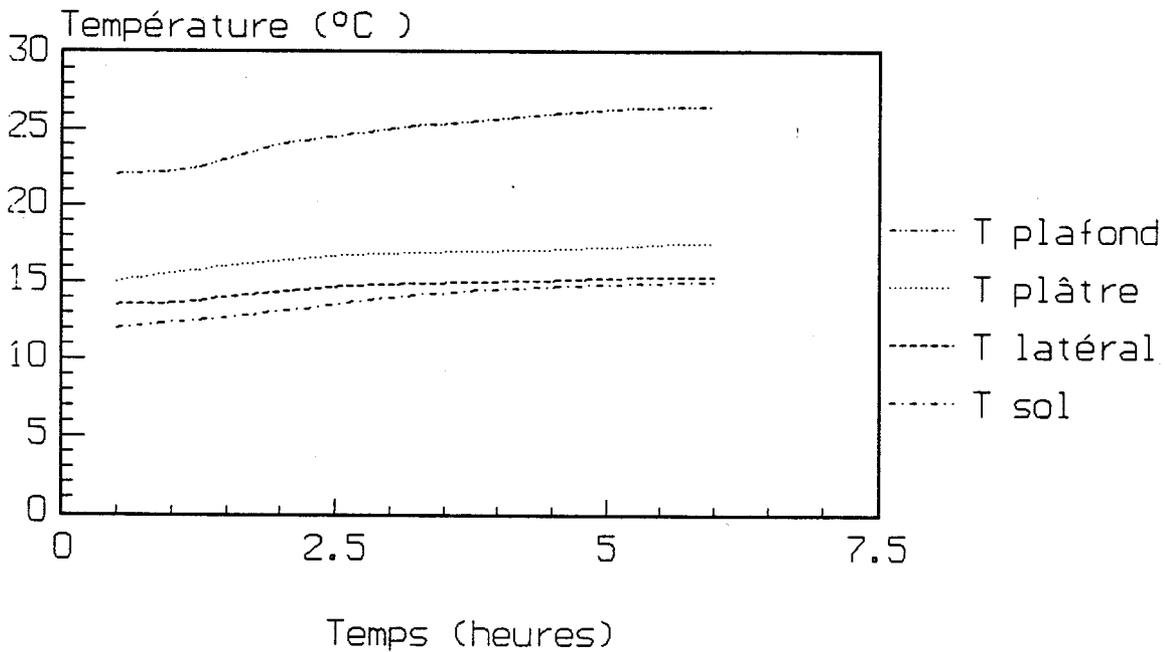
Structure Lourde Extraction faible  
Chauffage radiatif

Figure III.36



Structure Lourde Extraction faible  
Chauffage convectif

Figure III.37



Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de température air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_f)$	+1.1	+1.1	+1.1	+1.1	+1.0
$\Delta T(a, P_A)$	-6.2	-6.2	-6.1	-5.9	-5.9
$\Delta T(a, P_c)$	-8.8	-9.2	-9.4	-9.6	-9.8
$\Delta T(a, B_E)$	-7.8	-8.0	-8.1	-9.2	-8.3

Flux total en  $w/m^2C$

$\bar{q}_t(P_A)$	57.8	54.5	51.7	48.6	45.3
$\bar{q}_t(P_c)$	25.2	26.5	27.4	28	28.4
$\bar{q}_t(B_E)$	48.9	50.5	51.7	52.4	53.2

Flux radiatif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_r(P_A)$	25.6	24.1	23.4	21.8	20.9
$\bar{q}_r(P_c)$	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
$\bar{q}_r(B_E)$	26.7	27.7	28.3	28.4	28.7

Flux convectif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_c(P_A)$	32.1	30.4	28.3	26.8	25.2
$\bar{q}_c(P_c)$	21.8	23.1	24	24.6	25.8
$\bar{q}_c(B_E)$	22.2	27.7	28.3	28.4	28.7

Tableau III<sub>18</sub>

Structure:Lourde Chauffage:Radiatif Extraction:Naturelle

Temps(h)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
----------	-----	-----	-----	-----	-----

Gradient de température air ambiant-paroi en °C

$\Delta T(a, P_f)$	+3.3	+3.4	+3.4	+3.4	+3.4
$\Delta T(a, P_A)$	-4.6	-4.6	-4.6	-4.9	-5.2
$\Delta T(a, P_c)$	-8.0	-8.2	-8.5	-8.8	-9.1
$\Delta T(a, B_E)$	-6.1	-6.4	-6.3	-7.0	-7.3

Flux total en  $w/m^2C$

$\bar{q}_t(P_A)$	10.4	9.8	9.2	8.7	8.6
$\bar{q}_t(P_c)$	5	4.7	4.7	4.7	4.7
$\bar{q}_t(B_E)$	18.1	17.8	17.6	17.6	17.8

Flux radiatif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_r(P_A)$	4	3.9	3.4	3	2.8
$\bar{q}_r(P_c)$	2.7	2.4	2.4	2.4	2.4
$\bar{q}_r(B_E)$	3.9	3.7	3.7	3.7	4

Flux convectif en  $w/m^2C$

$\bar{q}_c(P_A)$	6.4	5.9	5.8	5.8	5.8
$\bar{q}_c(P_c)$	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
$\bar{q}_c(B_E)$	14.2	14.1	13.9	13.9	13.8

Tableau III<sub>19</sub>

Structure:Lourde Chauffage:Convectif Extraction:Naturelle

### III.6.CONCLUSION.

L'étude expérimentale est celle des régimes thermiques transitoires ( moins de 3 heures ) dans un local chauffé par différentes sources , chauffage par le sol , chauffage majoritairement radiatif , chauffage majoritairement convectif , en fonction de la nature des parois latérales , du sol , du plafond , dans deux régimes d'extraction d'air ; extraction naturelle , extraction moyenne du type 14 m<sup>3</sup> /heure pour un local de volume 14 m<sup>3</sup>.

Il est difficile - malgré le grand nombre d'expériences réalisées donnant des résultats en températures , en flux totaux entrants dans les parois du local , pour les différentes configurations pour les flux convectifs et les flux radiatifs - d'interpréter correctement les variations liées aux configurations , aux sources d'énergie et aux extractions d'air .

Nous résumons ici les grandes tendances observées .

#### *a) Influence de la structure du local ( nature des parois ) .*

En régime transitoire l'influence du premier matériau en contact avec l'air ambiant est très importante , une paroi béton isolée de l'extérieur ou une paroi béton isolée de l'intérieur ont des influences en régime transitoire qui varient de 1 à 40 et ceci pendant plusieurs jours , évidemment ceci est lié aux constantes de temps thermique et à l'effusivité du premier matériau l'isolation par l'intérieur donne toujours un régime d'ambiance ( surtout en régime transitoire ) plus favorable que l'isolation par l'extérieur , les consommations énergétiques sont toujours inférieures ( elles restent aussi inférieures en régime permanent ) .

Influence du plafond isolant : La comparaison plafond lourd plafond isolé de l'intérieur est toujours favorable au plafond isolé , le gradient de température de surface d'autres parois étant rapidement élevé , il sert de source secondaire et favorise les flux radiatifs à l'intérieur des logements .

Les flux radiatifs sont sources de bien être et de confort .

Influence du plancher : Dans les différents types de chauffage -sauf le chauffage par le sol - une stratification importante de couches d'air a toujours lieu au niveau des sols et le gradient sol , air ambiant est toujours élevé.

Le chauffage par le sol diminue fortement cette stratification , la notion de plancher léger ( isolé ) , lourd ( carrelage , béton ou marbre ) a une influence sur la stratification des couches d'air . Le plancher isolé est plus favorable .

#### *b) Influence des sources d'énergie.*

-La position , l'orientation et la nature de la source d'énergie dans un local sont des paramètres non négligeables dans l'évolution des flux radiatifs et convectifs et des gradients de température des parois de ce local.

L'analyse des résultats nous ont permis d'affirmer la supériorité du chauffage radiatif sur les autres types de chauffage , il augmente les composantes des flux radiatifs et permet pour un même confort de réaliser une économie d'énergie supérieure à 20% .

#### *c) Influence de l'extraction d'air.*

L'influence de l'extraction d'air est facile à interpréter plus l'extraction est importante plus il faut fournir d'énergie pour obtenir le même gradient de température mais nos mesures montrent que ceci ne modifie que partiellement les différents types de répartitions des flux radiatifs , convectifs , et les gradients de température .

Les régimes thermiques transitoires dépendent de beaucoup de paramètres et surtout des couplages entre les flux radiatifs et convectifs liés aux stratifications des couches d'air , aux régimes de convection aux "micro volumes" d'un logement . Seuls les effets radiatifs sont bien définis puisqu'ils ne dépendent que des températures .

Etablir un modèle valable à quelques % reste l'objectif ambitieux à atteindre , il est certain qu'avec un chauffage par le plancher la diminution des stratifications permet d'obtenir une meilleure homogénéisation des températures .

Pour tous les locaux existants , avec un chauffage de nature imposée , préciser qualitativement les variations des gradients de températures et des flux en régime transitoire si on isole de l'intérieur telle paroi ou le plafond est facile , mais donner le modèle qui donne avec précision les résultats quantitatifs durant les premières heures des régimes transitoires reste difficile .

Une règle " isoler de l'intérieur " est toujours favorable aux régimes transitoires ( mais aussi aux régimes permanents )

Le modèle que nous proposons au chapitre suivant est une première approximation .  
Le modèle est évolutif et peut s'adapter à toutes les conditions expérimentales .

## CHAPITRE QUATRE : MODELISATION THERMIQUE D'UN LOCAL

### IV.1 INTRODUCTION.

L'étude expérimentale des flux radiatifs et convectifs entrant dans les parois d'un local et l'étude des températures montrent des phénomènes complexes liés à la nature des sources thermiques , à la nature des parois , à la géométrie des locaux , à la nature du renouvellement d'air ...

Dans ces conditions , imaginer un modèle - qui donnent l'ensemble des manifestations thermiques : flux et températures , stratification des couches d'air , courants convectifs - est un exercice difficile qui demande de bien choisir les hypothèses , de bien connaître en fonction du temps les mécanismes linéaires et ceux qui ne le sont que partiellement .

Pour un lecteur non spécialisé une analyse mi-expérimentale, mi-théorique est difficile à appréhender.

Ce chapitre comprend plusieurs parties :

- Une analyse des " impédances temporelles " thermiques des parois et des remarques sur un modèle en régime permanent , qui en pratique n'existe jamais .

- Des remarques sur des hypothèses possibles pour obtenir un schéma valable en régime transitoire .

- La comparaison des rapports impédance temporelle de paroi calculés et des flux totaux et partiels entrants dans les parois.

- L'analyse des quotients de grandeurs expérimentales gradient de température , flux entrant et les possibilités d'assimilation à des coefficients d'échange.

- Des remarques sur les notions de coefficient de transfert convectif et radiatif .

- Une proposition d'un modèle simplifié théorique donnant en première approximation les valeurs expérimentales relevées.

Nous avons effectué une étude thermique de la réponse des impédances temporelles des parois utilisées ,étude thermique que nous avons confrontée à des résultats expérimentaux [ 2].

Cette partie de travail est rigoureuse , la conduction thermique en régime transitoire dans un ensemble multicouche linéaire est parfaitement déterminée si l'on connaît l'épaisseur des matériaux composants les coefficients linéiques et surfaciques : conductivité thermique et capacité thermique .

Des remarques sur un modèle simplifié permettant de comprendre comment une énergie thermique fournie par une source est transférée aux parois d'un local , les quelques centaines ou milliers de modèles déjà proposés et qui ne sont pas ici analysés [6] , [7] , [8] donnent quelques fois des réponses satisfaisantes pour le moyen et long terme (le long terme est le régime quasi permanent ) mais rarement le court terme (moins de deux heures ).

Un phénomène thermiquement aussi simple qu'un transfert radiatif qui ne dépend que des lois simples liées aux température peut donner lieu , du fait des couplages (radiatifs , convectifs) et de la non linéarité du flux convectif (tourbillons) et des stratifications à des mécanismes complexes qui doivent encore donner lieu à de nombreuses recherches pour obtenir des relations satisfaisantes .

IV.2 Modèle du régime permanent: Analyse des réponses des parois.

On peut imaginer un régime permanent obtenu dans un local (en pratique, on ne peut jamais obtenir ce régime du fait des conditions extérieures variables jours nuits etc...).

Les parois sont alors caractérisées par leurs résistances thermiques.

La source thermique envoie à chaque instant une puissance constante, souvent la température radiante est voisine de la température d'air ambiant et avec des transferts thermiques caractérisés par des coefficients d'échange établis, l'un pour les flux radiatifs, l'autre pour les flux convectifs; on obtient un schéma équivalent qui peut donner satisfaction en première approximation.

Pour les coefficients  $1/h_i$  et  $1/h_j$  on peut, en première approximation, prendre les valeurs du D.T.U (document technique unifié).

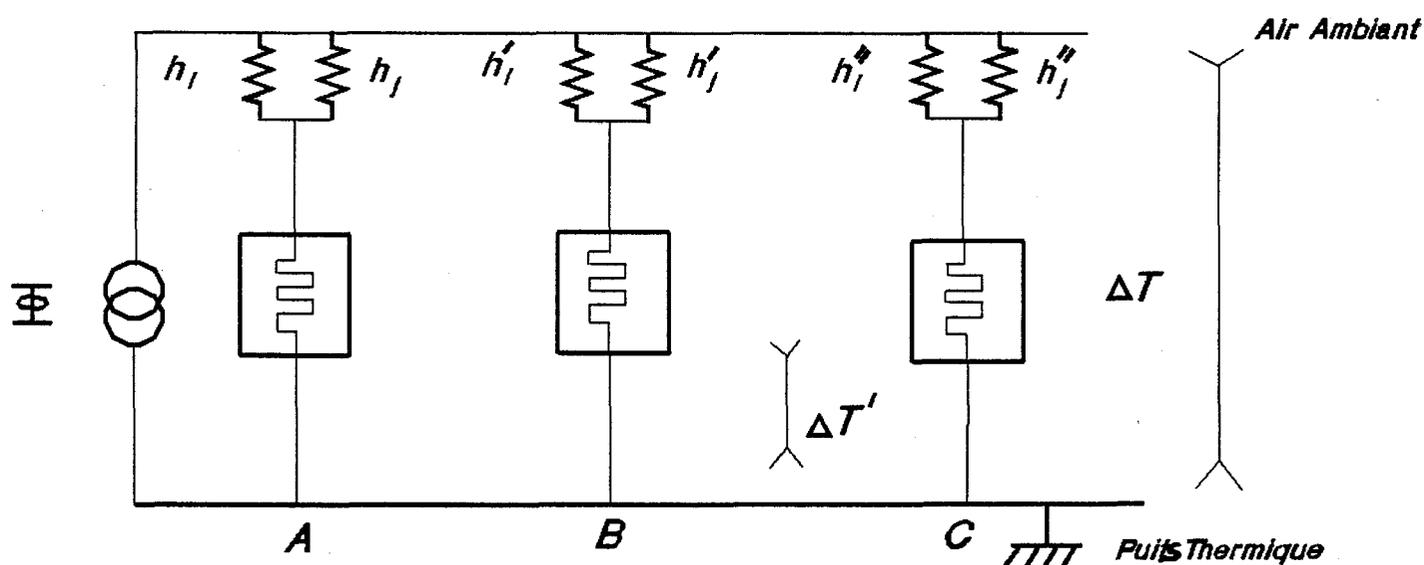


Figure IV.1

Il est évident que ce modèle ne peut convenir en régime transitoire.

Examinons les divers éléments entrant effectivement en jeu pour les mises en température.

IV.2.1 Eléments stables et définis :

a)- La source thermique qui fournit par seconde une puissance  $P$  en partie sous forme radiative , en partie sous forme convective , cette puissance n'est pas nécessairement constante sur une période de temps importante .

b)- Les parois : chaque paroi , chaque objet reçoit ou donne ( bilan ) par seconde une puissance radiative  $P_{2r}$ , une puissance convective  $P_{2c}$  , au total ,

$$P_2 = P_{2r} + P_{2c}$$

c)- Pour chaque paroi initialement sans condition initiale et à température constante (celle du puits) une relation temporelle donnant à un instant  $t$  une relation entre le flux instantané entrant dans la paroi , une impédance temporelle et le gradient de température (surface de paroi-puits) . Cette relation n'est rigoureuse que pour un flux d'entrée constant.

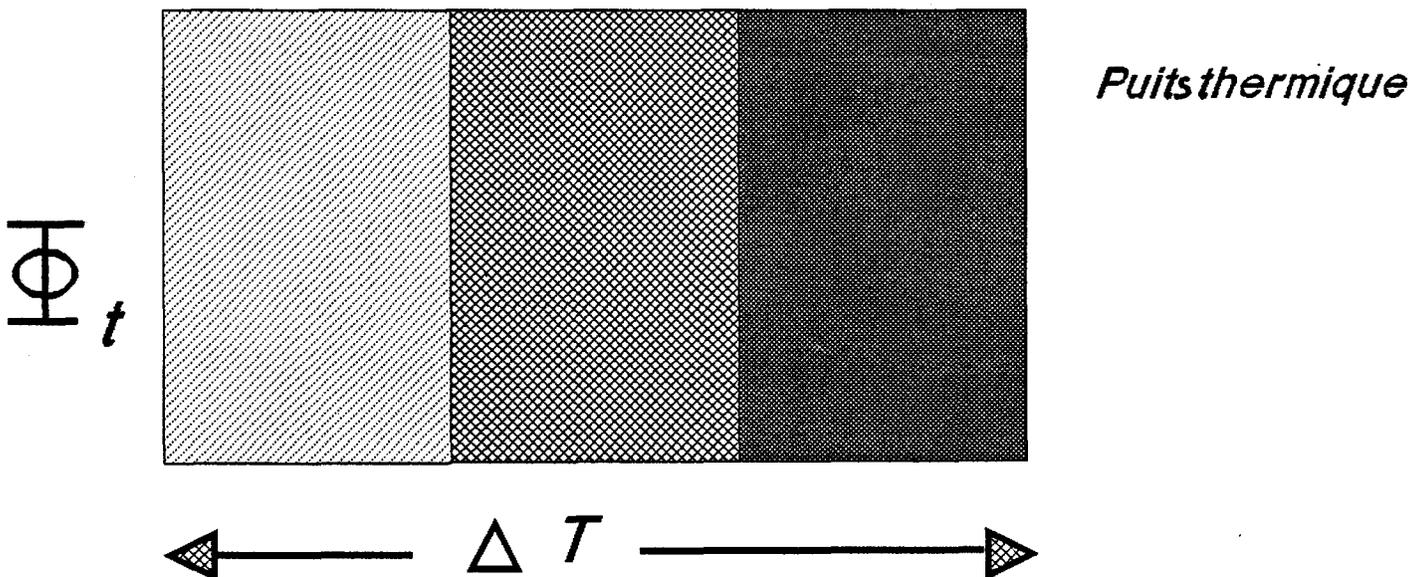


Figure IV.2

d)- La conservation des énergies thermiques qui permet d'écrire ( renouvellement d'air négligeable ) que la puissance thermique fournie par la source est égale au bilan des puissances entrantes (ou sortantes ) des parois . On admet que la capacité thermique d'air ambiant est négligeable , on admet aussi que dans le local considéré il y a peu d'obstacles localisés et que les flux entrants de l'extérieur sont négligeables.

$$\sum \text{Puissances fournies} = \sum \text{Energies (entrantes , sortantes ) des parois} = \\ \sum \text{Energies radiatives} + \sum \text{Energies convectives}$$

#### IV.2.2- Elements instables:

En dehors de ces éléments stables , il y a un élément mal connu , les transferts thermiques et les mécanismes mis en jeu .

a)- Energie radiative , théoriquement , à un instant donné tout est connu si les températures absolues sont définies . En pratique la source émet une puissance  $P_{s,r}$  liée à sa température instantanée et reçoit des parois une puissance totale rayonnante  $P_{j,r}$  liée à la température absolue de chacune des parois ou des parties de parois si celles ci ne sont pas isothermes .

Au total , la source émet  $(P_{s,r}-P_{j,r})$  qui n'est définie que par toutes les températures du local et par des coefficients géométriques constants.

Une variation d'une température de 1°C peut modifier certains bilans radiatifs ( entrants, sortants ). La notion de température radiante moyenne et sa loi de variation en fonction du temps sont difficiles à préciser .

Exemple :  $t=1$  heure - depuis le début de chauffage - et  $t+\Delta t = 1,5$ heures , même si la température d'air ambiant est constante (20°C ) les températures de parois se modifient , ce qui modifie toutes les énergies radiantes d'échange . Au niveau d'une paroi , elle reçoit de la source et de toute les autres parois radiantes des puissances liées aux températures , aux pouvoirs émetteurs et récepteurs .

Supposons une paroi **fortement isolée de l'intérieur** , elle a une température de surface voisine de la température d'air ambiante nettement supérieure aux températures de surface des parois plus ou moins lourdes du local , elle émet proportionnellement beaucoup ; et reçoit proportionnellement peu des autres ( flux radiatif résultant sortant) bilan négatif .

Supposons une paroi lourde : béton , carrelage : la température de surface est plus basse que celle de l'air ambiant , elle émet proportionnellement peu , reçoit beaucoup ; le flux résultant radiant est toujours entrant (bilan positif ) .

Pourquoi est-il difficile de définir une température radiante moyenne en régime transitoire ? , ceci est lié aux couplages énergétiques ( énergies convectives et radiatives de transfert ) . Ce domaine des modalités de couplage entre ces deux énergies est , à notre connaissance , rarement étudié , il faudrait des études statistiques ou des modélisations du type 3D.

b)- Energies convectives; La température d'air constante dans un volume important du local est erronée . De nombreux travaux montrent l'existence d'effets tourbillonnaires importants [14] , [15] et des phénomènes stationnaires au niveau des sols et des plafonds .

La relation du régime permanent de la forme  $\bar{\Phi}_c = h_c \cdot \Delta T$  avec  $h_c$  constante de l'ordre de  $5W/m^2°C$  pour une paroi verticale et  $\Delta T$  , gradient de température air ambiant-surface de paroi est une approximation souvent insuffisante . Au total , le modèle à établir en régime transitoire est complexe , le transfert thermique total n'est pas ordinairement linéaire en régime transitoire .

Notre étude sur les flux au niveau des sols fait apparaître les régimes de stratifications qui modifient complètement les flux convectifs sauf dans l'hypothèse d'un chauffage par le sol .

IV.3 Hypothèses pour obtenir un schéma en régime transitoire

Trois itinéraires de recherches peuvent être balisés:

a)-Un schéma dans lequel le transfert thermique , radiatif plus convectif plus effets de couplage , plus non linéarités , est placé dans un système non linéaire dont tous les paramètres dépendent de beaucoup de facteurs et en particulier du temps . On admet alors une représentation simple avec  $R$  ,  $R'$  ,  $R''$  non linéaires fonctions du temps et liés les uns aux autres .

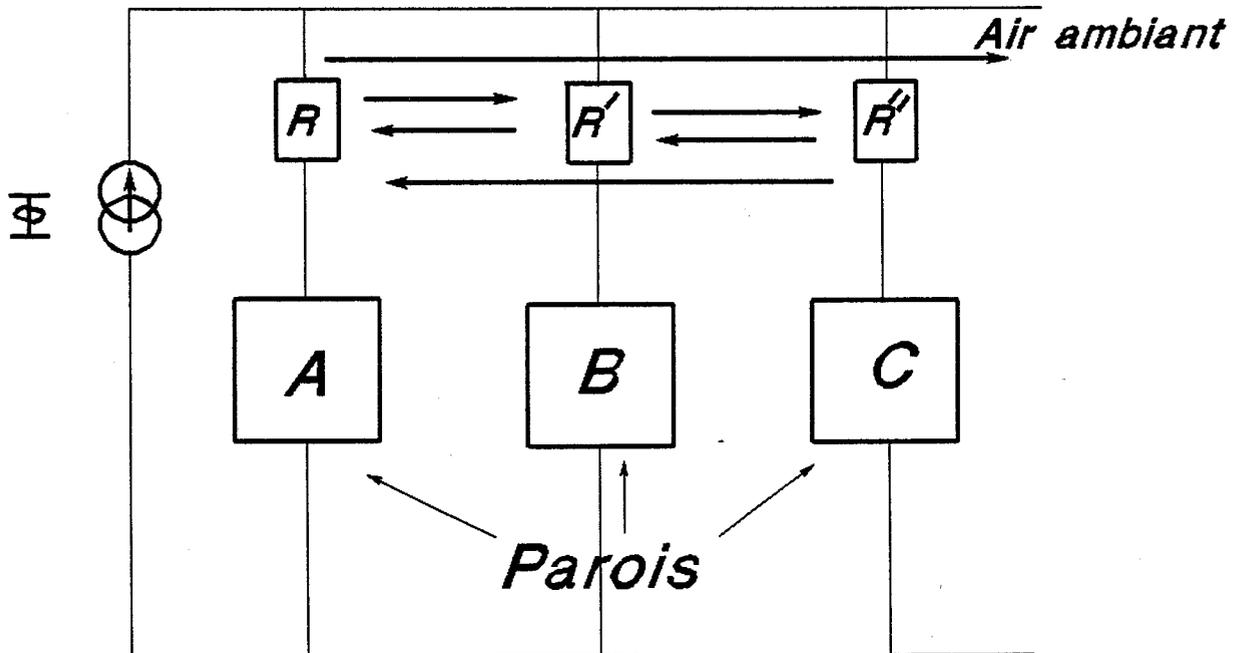
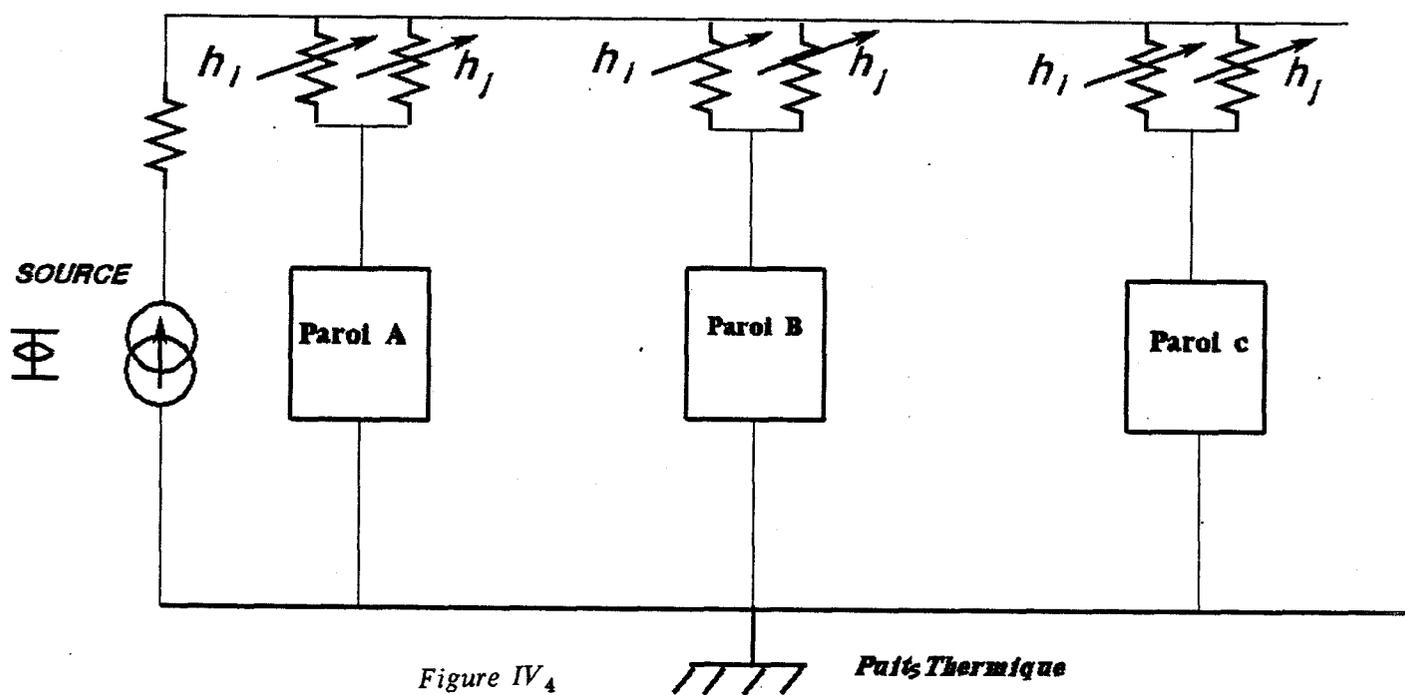


Figure IV.3

b)-Un schéma dans lequel on analyse les transferts à partir de relations mi-théorique , mi-expérimentale en admettant des ordres de grandeur des lois de variation pour les coefficients de couplage . Coefficient variant avec le temps , la température des matériaux de surface - le régime convectif - la stratification .

On a alors:

Figure IV<sub>4</sub>

Point Thermique

Alors les  $h_{ij}$  sont des valeurs fonctions du temps liés aux différents paramètres source nature de l'excitation , nature des parois etc ...

c)-Un schéma dans lequel les transferts sont considérés comme impédance interne de la source . On a alors une source non linéaire à paramètres variables .

-Dans la suite nous ne retenons pas cette hypothèse .

#### IV.4 Rapport "d'impédance temporelle" de parois d'habitat:

Nous présentons d'une part les résultats d'une étude théorique sur des impédances de parois constituées de divers matériaux ( tableau IV<sub>1</sub> page 46 ) , d'autre part nous rappelons de nombreux résultats expérimentaux sur des parois de même nature .

##### IV.4.1 Régime thermique dans une paroi multicouche-régime de conduction

Supposons un milieu fluide infiniment conducteur en thermique situé entre une source et une paroi , le transfert thermique sera équivalent à un coefficient d'échange ,  $h$  , infini et on retrouve entre les grandeurs flux , température d'entrée et de sortie et aux différents niveaux intermédiaires les valeurs caractéristiques d'une conduction thermique entre une source localisée sur une paroi et les matériaux constituants.

##### IV.4.2 Régime thermique dans une paroi excitée par une source réelle.

Le problème a été et est très étudié [18] , [3], on a des transferts de convection , des transferts de rayonnement mais les résultats sont évidemment très divergents suivant les valeurs admises , en particulier on admet souvent qu'en régime permanent , on peut introduire un coefficient d'échange pour les bilans convectifs , un autre coefficient d'échange pour les bilans radiatifs . Nous faisons ici des choix empiriques du coefficient d'échange pour des parois verticales ; et nous comparons nos résultats expérimentaux à ces choix.

###### a) Première hypothèse :

Nous admettons une relation du type coefficient de transfert ( $h_t = h_c + h_r$ ) , avec  $h_t$  ,  $h_c$  ,  $h_r$  des constantes et  $h_c \neq h_r \neq 5W/m^2 \cdot ^\circ C$  et nous traçons les courbes théoriques sous formes de rapport de flux dans les différents parois.

*b) Deuxième hypothèse :*

Nous admettons  $h_c = h_r$ , avec  $h_c = h_r \neq 2.5 \text{ W/m}^2\text{C}$  et nous traçons les courbes théoriques des mêmes rapports que précédemment .

*c) Troisième hypothèse :*

Nous admettons  $h_t$  infini et nous traçons les courbes théoriques des mêmes rapports que précédemment

Nous donnons les rapports d'impédances d'entrée temporelles des différentes parois pour des transferts  $h_t \omega$ , 10 et  $5 \text{ Wm}^2\text{C}$  .

Nous notons  $R(\text{PoBe/BePo})$  pour un rapport d'impédance temporelle paroi PoBe comparée à la paroi BePo .

Remarques

-Lorsque le transfert d'une source thermique à une paroi , passe d'un transfert total important (  $h_t$  infini ) à un transfert faible (  $h_t = 10$  ou  $5 \text{ W/m}^2\text{C}$  ) les rapports d'impédances temporelles varient très rapidement , (influence de l'effusivité des premiers matériaux ) , le transfert est " vu " comme une résistance thermique pure de valeur variable en série avec l'impédance temporelle de la paroi.

Par exemple , après une heure le rapport des flux entrant dans la paroi passe de 45 à 6 pour  $h_t$  passant de l'infini à  $6 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

Les courbes a , b et c en noir ( courbes de base ) montrent bien l'évolution de ces rapports .

IV.4.3 Comparaison des résultats expérimentaux aux résultats théoriques.

Nous portons sur les graphes de base courbes a , b et c ( courbes théoriques ) et pour les trois configurations expérimentales de base I, II et III avec une excitation soit par source radiative soit par source convective et pour divers niveaux d'extraction d'air les rapports des flux expérimentaux entrants dans les parois et nous interprétons les différentes courbes obtenues .

#### *IV.4.3.1- Configuration I local léger.*

##### A) Source convective

###### Flux totaux : figure IV.5

Aucune concordance satisfaisante entre les courbes théoriques et expérimentales , les rapports évoluent pour les six premières heures entre  $h_t = 100$  et  $5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Devant cette non concordance , nous avons introduit de nouveaux rapports expérimentaux d'une part : rapport des flux convectifs entrants dans les parois et d'autre part rapport de flux radiatifs entrants ou sortants.

###### Flux convectifs: figure IV.6

Les courbes expérimentales sont groupées autour d'une valeur moyenne de  $h_c = 5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

###### Flux radiatifs. figure IV.7

Les rapports sont négatifs ( flux sortants ) , il est difficile de donner une interprétation simple.

##### B) Source radiative

###### Flux totaux : figure IV.5

Les courbes sont groupées avec  $h_t$  compris entre 5 et  $10 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

###### Flux convectifs : figure IV.6

$h_c$  apparent varie très largement de 9 à  $2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

###### Flux radiatifs : figure IV.7

Aucune concordance satisfaisante ,  $h_r$  varie de 6 à  $1 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

#### *IV.4.3.2 Configuration II local mi-léger.*

Dans la suite , nous ne donnons que les courbes des rapports des flux totaux , pour les composantes convectives et radiatives nous donnons les résultats .

A)-Source convectiveFlux totaux : figure IV.9

Aucune concordance satisfaisante avec les courbes théoriques , les rapports évoluent pour les six premières heures entre  $h_c = 5$  et  $100 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

Flux convectifs

Une concordance plus ou moins satisfaisante pour  $h_c$  compris entre 5 et  $10 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

Flux radiatifs

Nous ne notons aucune concordance avec les rapports théoriques .

On a des oscillations très grandes de +100 à -1000 et ceci quelque soit la nature d'extraction.

B)-Source radiativeFlux totaux : figure IV.9

Aucune concordance satisfaisante , la variation des rapports est brusque et sans intérêt.

Flux convectifs

Aucune concordance pour les extractions fortes et moyennes . Par contre pour l'extraction faible  $h_c$  est compris entre 5 et  $10 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

Flux radiatifs

Nous ne notons aucune concordance avec les rapports théoriques .

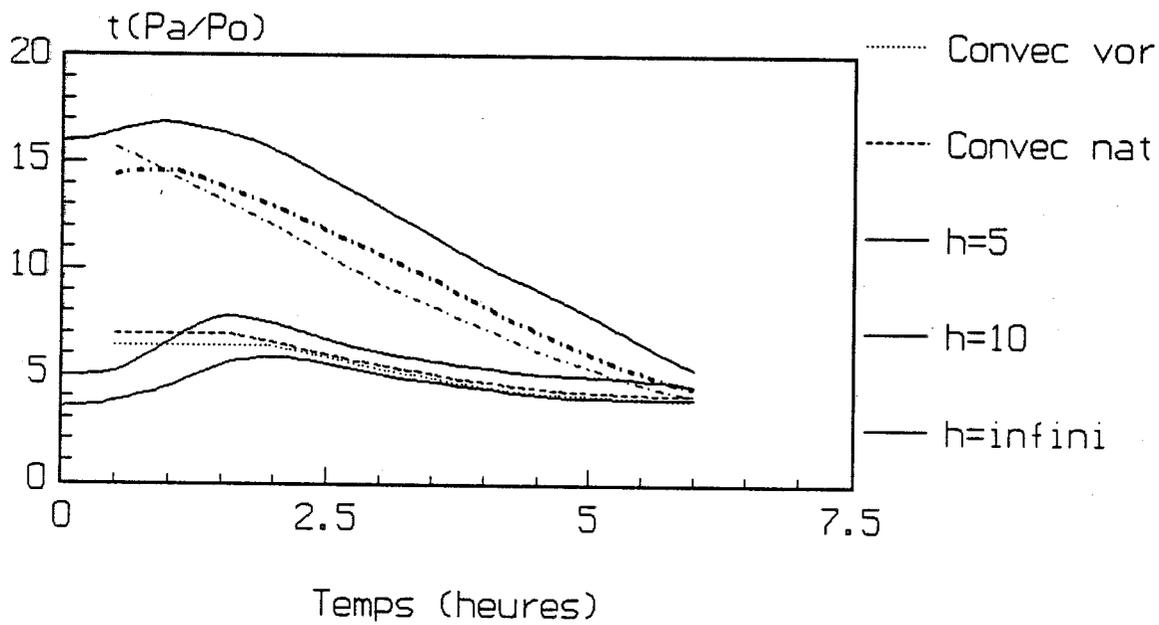
IV.4.3.3-Configuration III local mi-lourd : figure IV.10

Nous ne présentons que les rapports des flux totaux expérimentaux . Nous faisons la même remarque que pour la configuration II. Aucune concordance satisfaisante avec les courbes théoriques.

Si nous prenons l'hypothèse de coefficients d'échanges  $h$  , il faut admettre qu'ils sont en régime transitoire continuellement variable avec le temps . Seuls les flux convectifs entrants dans les parois lourdes peuvent de façon satisfaisantes s'interpréter en admettant un transfert thermique de l'ordre de  $5 \text{ W/m}^2\text{C}$  .

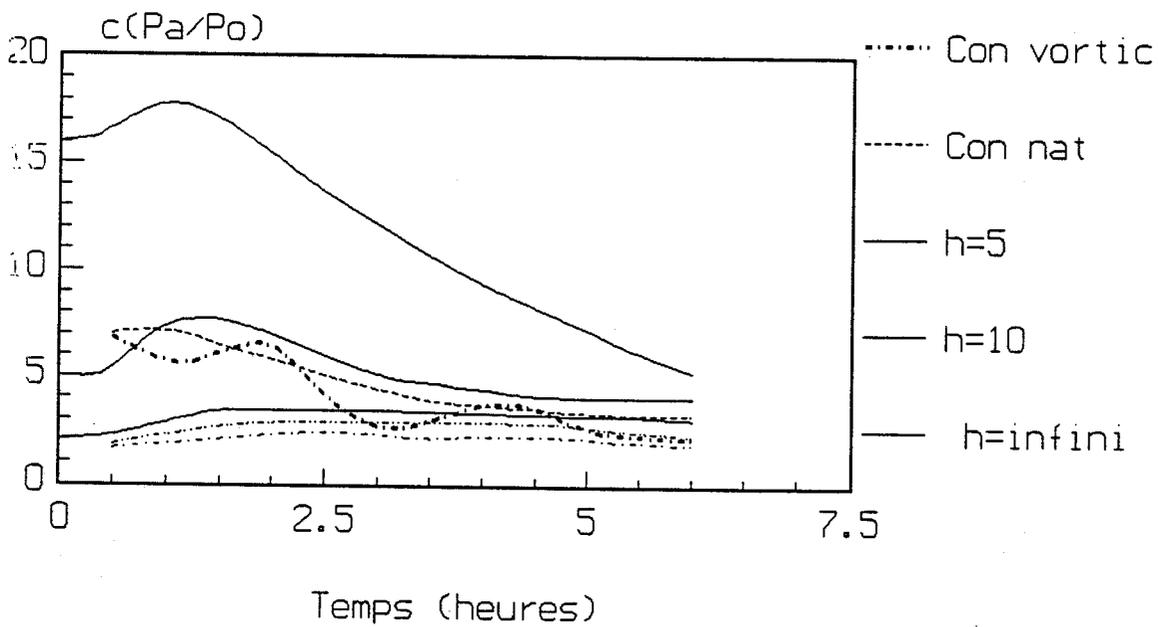
Configuration I  
Rapport de flux totaux

Figure IV.5



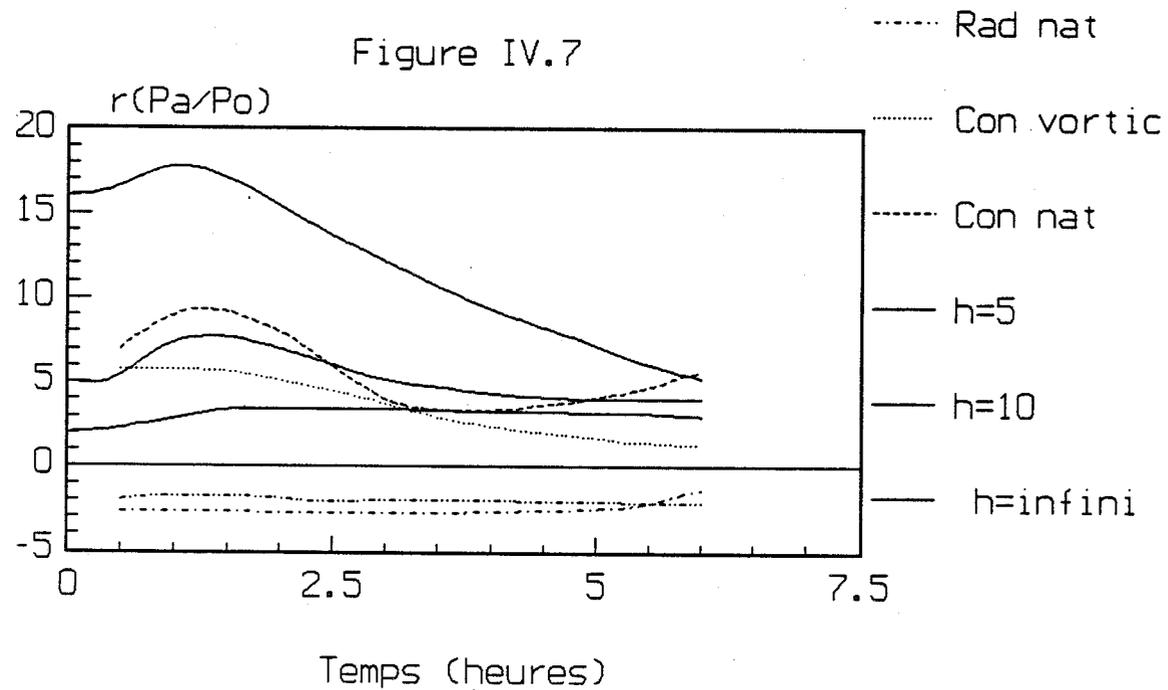
Configuration I  
Rapports de flux convectifs ( Pa/Po)

Figure IV.6



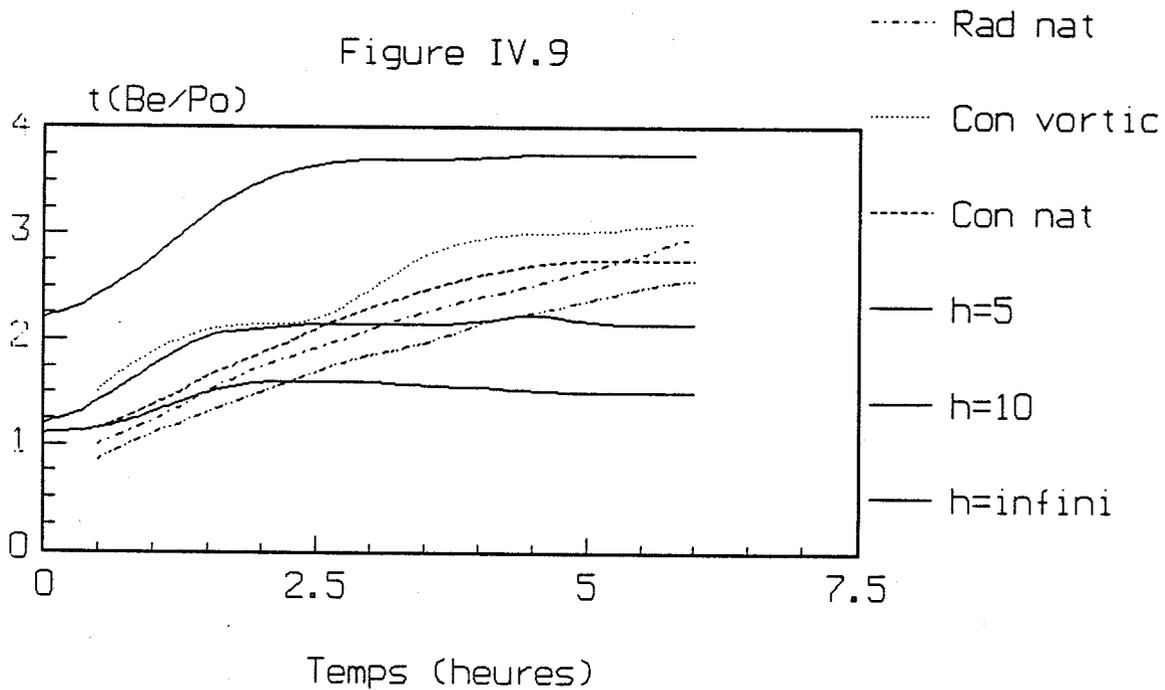
Configuration I  
Rapports de flux radiatifs ( Pa/Po)

Figure IV.7



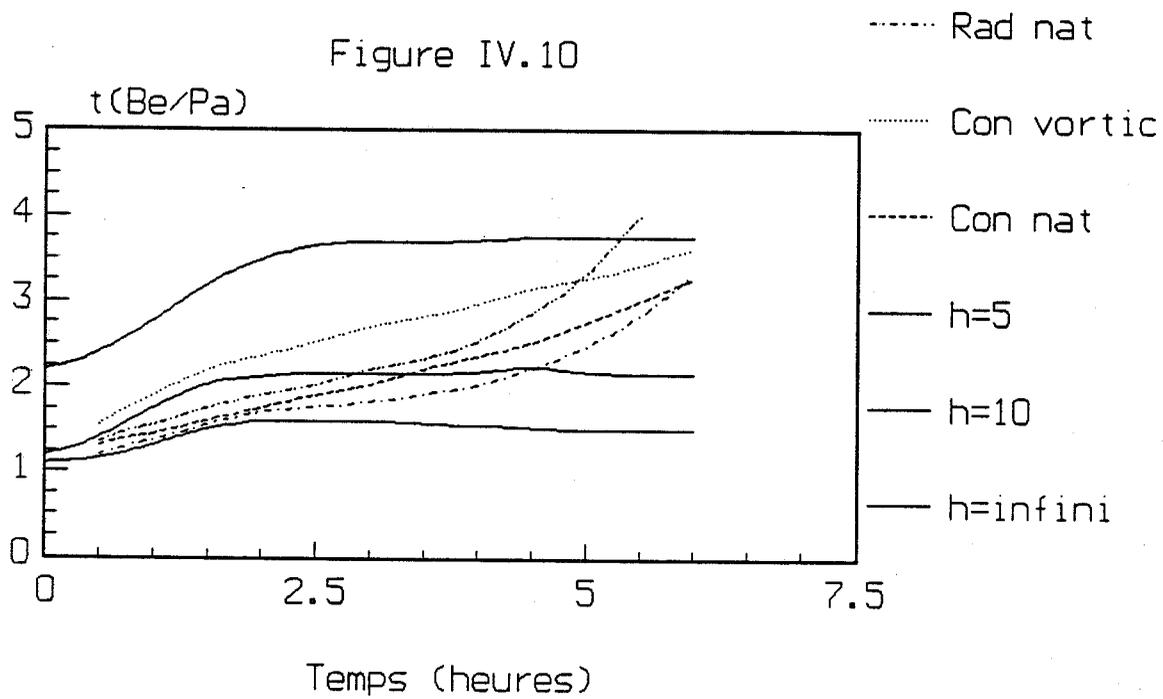
Configuration II  
Rapport de flux totaux

Figure IV.9



Configuration III  
Rapport de flux totaux

Figure IV.10



IV.5-Analyse des quotients - flux entrant dans les parois - gradients de température air ambiant , face interne des parois

Rappelons qu'en régime permanent , pour une paroi donnée , il existe une relation entre résistance thermique pure  $R$  , flux  $\Phi$  et gradient de température  $\Delta T$  de la forme  $\Phi = R \Delta T$  :

$$\Delta T = R \Phi \quad ; \quad 1/R = \Phi / \Delta T$$

Par analogie on peut écrire  $\Delta T' = 1/h$  avec  $1/h = \Phi / \Delta T = R'$

$1/R'$  est homogène à un coefficient de transfert thermique.

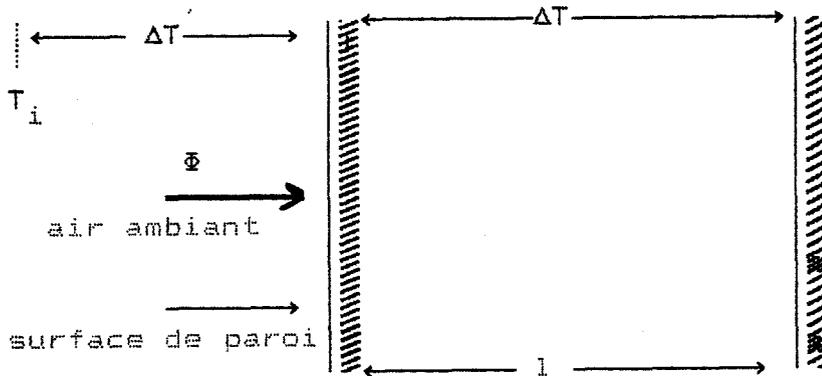


Figure IV.8

En régime transitoire , en admettant un flux d'entrée constant , on a  $\Delta T = b \sqrt{\frac{\pi}{t}}$  Le coefficient est homogène à une impédance englobant la résistivité thermique et la capacité linéique thermique .

Nous voulons ici déterminer , pour les valeurs expérimentales obtenues , la nature des quotients des flux entrants dans les parois sur le gradient de température  $\Delta T'$  . Avec  $\Phi_t$  flux total entrant dans une paroi ,  $\Phi_c$  et  $\Phi_r$  composantes convective et

radiative du flux entrant dans une paroi . En particulier nous voulons déterminer la nature de ces quotients en régime transitoire pour justifier ou non la notion de coefficient d'échange radiatif et convectif et la nature des échanges thermiques entre une source ( air ambiant et l'entrée dans les matériaux des parois ).

Nous présentons des résultats expérimentaux pour les différentes configurations .

#### IV.5.1- Configuration légère I

Le graphe des figures IV.11 , IV.12 et IV.13 donnent  $\bar{\Phi}_c / \Delta T$  pour des parois PaPo et PoBe (isolant et plâtre) . Les composantes radiatives pour la configuration légère ne sont pas données car variant trop rapidement .

##### **-Paroi PaPo (plâtre):**

a) -Pour un chauffage convectif , les courbes IV.12 des quotients des valeurs expérimentales  $\bar{\Phi}_c$  et  $\Delta T$  , pour différentes extractions oscillent autour d'une valeur moyenne de 6 W/m<sup>2</sup>°C.

Si on choisit un coefficient d'échange égal à 6 W/m<sup>2</sup>°C pour le transfert convectif dans le local , on a donc aux erreurs de mesure près , une représentation satisfaisante à 10% environ des échanges convectifs dans les parois latérales.

b) -Pour un chauffage radiatif , courbe IV.13 , le choix d'un coefficient d'échange voisin de 4 W/m<sup>2</sup>°C donne des résultats satisfaisants sauf pour les temps supérieurs à 6 heures et pour les extractions fortes

##### **-Paroi PoBe:**

Par contre pour les parois matériau isolant d'entrée , figures IV.13 et IV.14 , il est difficile de donner une valeur approximative d'un coefficient d'échange compte tenu des résultats expérimentaux ( les flux d'entrée des parois sont faibles car la température de paroi est élevée).

- a) -Pour un chauffage convectif on a des oscillations fortes autour de  $12 \text{ W/m}^2\text{C}$ .
- b)-Pour un chauffage radiatif on a des valeurs variant largement autour de  $3\text{W/m}^2\text{C}$ .

Les graphes donnant  $\frac{\Phi_r}{\Delta T}$  divergent tellement (varie du positif au négatif) que leurs représentations sont jugées inutiles.

#### IV.5.2 Configuration II.

Les graphes IV.15 , IV.16 , IV.17 et IV.18 donnent  $\Phi / \Delta T$  pour les parois BePo et PaPo .

##### *-Paroi lourde:BePo (Courbes IV.15 et 16 )*

a)- Pour un chauffage convectif , nous observons courbe IV.115 que quelque soit l'importance de l'extraction , un coefficient d'échange  $h_c$  voisin de  $5\text{W/m}^2\text{C}$  rend compte des résultats expérimentaux pour les six premières heures .

b)-Pour un chauffage radiatif courbe IV.116 , un coefficient d'échange  $h_c$  voisin de  $4\text{W/m}^2\text{C}$  , serait satisfaisant.

##### *-Paroi PaPo :(courbes IV.17 et 18 )*

-a) Pour un chauffage convectif courbe IV.17 les transferts varient largement avec l'importance de l'extraction :

-Extraction faible : un coefficient d'échange  $h_c$  voisin de  $6 \text{ W/m}^2\text{C}$  donne satisfaction .

-Extraction moyenne : un coefficient d'échange compris entre  $4$  et  $5 \text{ W/m}^2\text{C}$  est satisfaisant.

-Extraction forte : un coefficient d'échange  $h_c$  voisin de  $3 \text{ W/m}^2\text{C}$  est convenable.

b)-Pour un chauffage radiatif courbe IV.18 , quelque soit l'importance de l'extraction pour les quatres premières heures , un coefficient d'échange  $h_c$  voisin de  $3 \text{ W/m}^2\text{C}$  serait satisfaisant .

La divergence des résultats est forte pour des temps supérieurs à 5 heures.

### IV.5.3-Configuration III

Nous ne donnons que les courbes des flux totaux .

Les résultats observés sur les flux totaux sont du même ordre de grandeur que pour la configuration II.

*-Paroi lourde:*

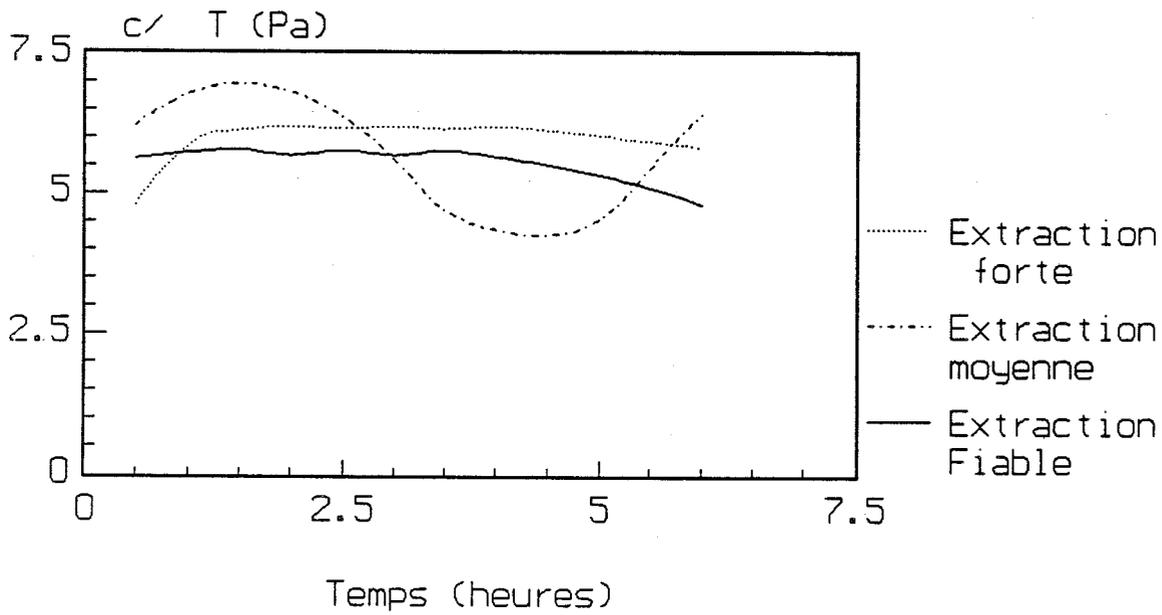
*a)-Chauffage convectif :*

-Extraction faible et extraction moyenne :  $h_t$  est voisin de  $9 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

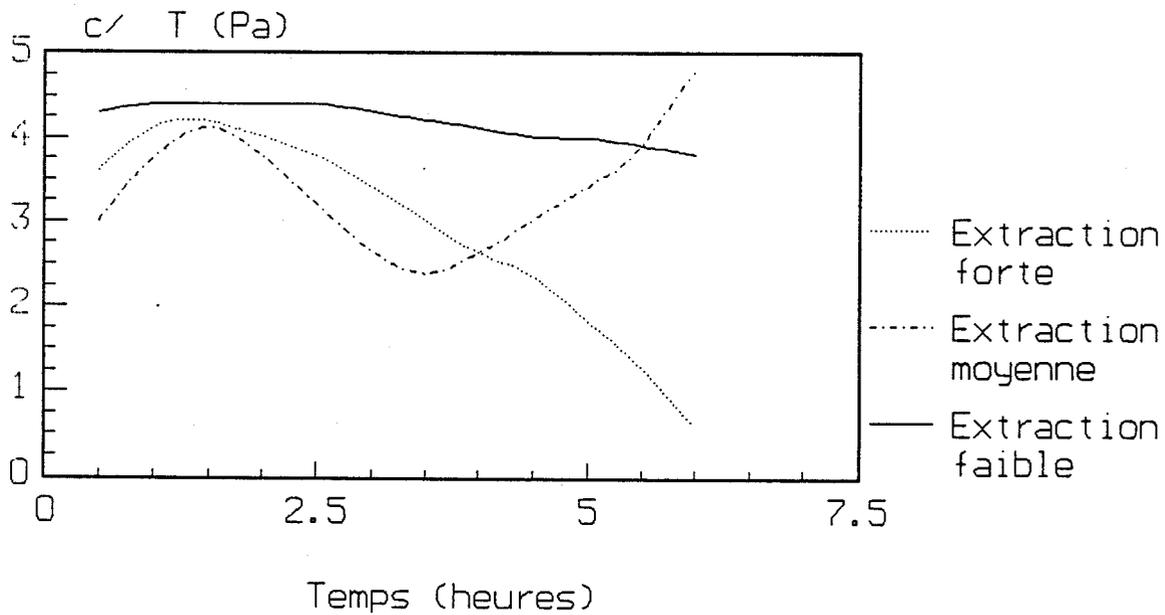
-Extraction forte :  $h_t$  voisin de  $11 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

*b)-Chauffage radiatif :* Quelque soit la nature d'extraction et pour les quatre premières heures  $h_t$  est voisin de  $9 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

Configuration I: chauffage convectif  
 Rapport flux convectifs sur gradient de  
 température paroi Pa  
 Figure IV.11

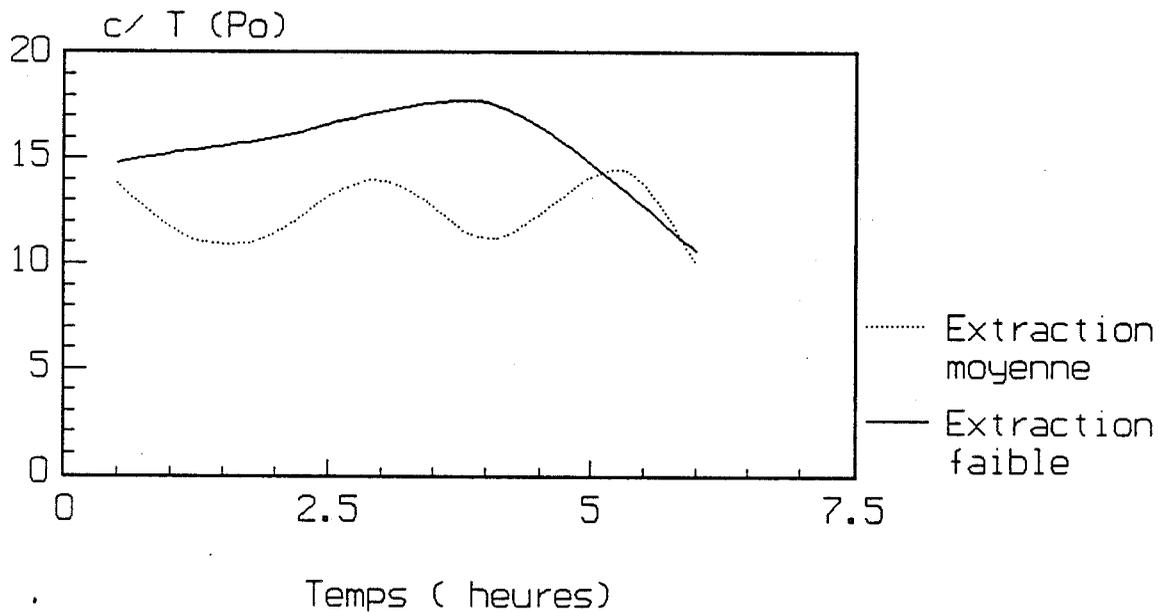


Configuration I: chauffage radiatif  
 Rapport de flux sur gradient de  
 température Pa  
 Figure IV.12



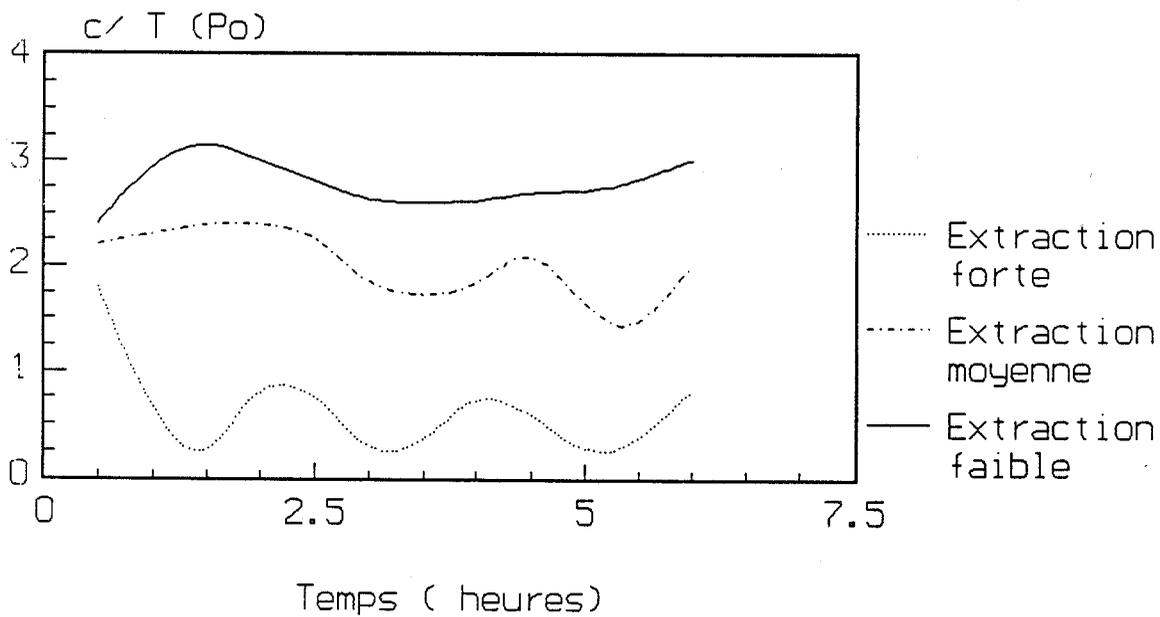
Configuration I Chauffage convectif  
Rapport de flux sur gradient de T°C Po

Figure IV.13

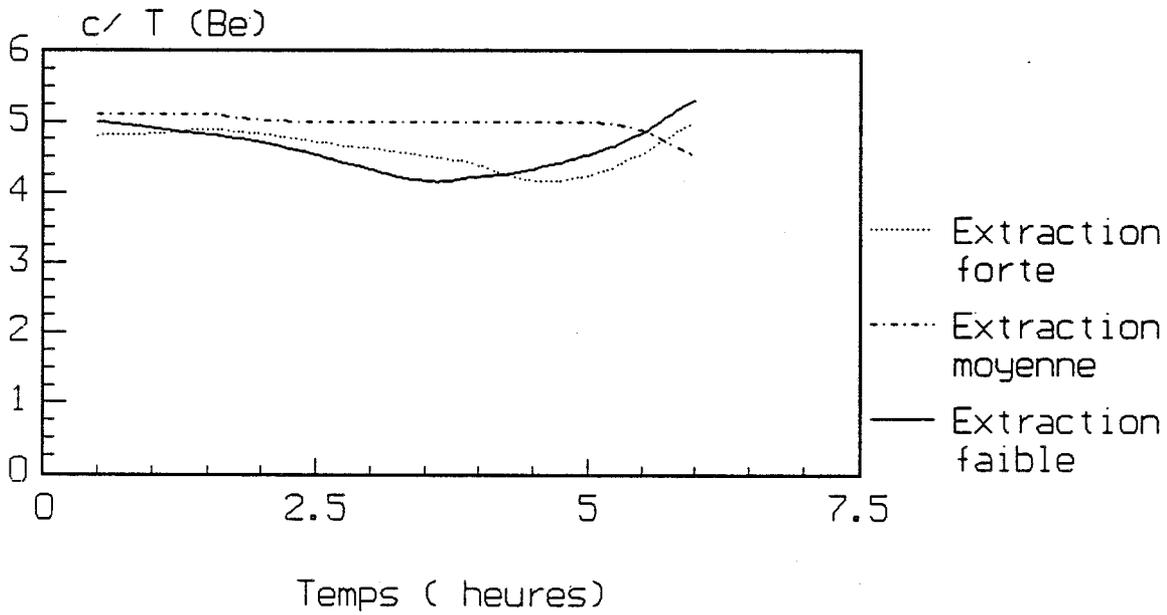


Configuration I Chauffage radiatif  
Rapport du flux sur le gradient  
de température paroi Po

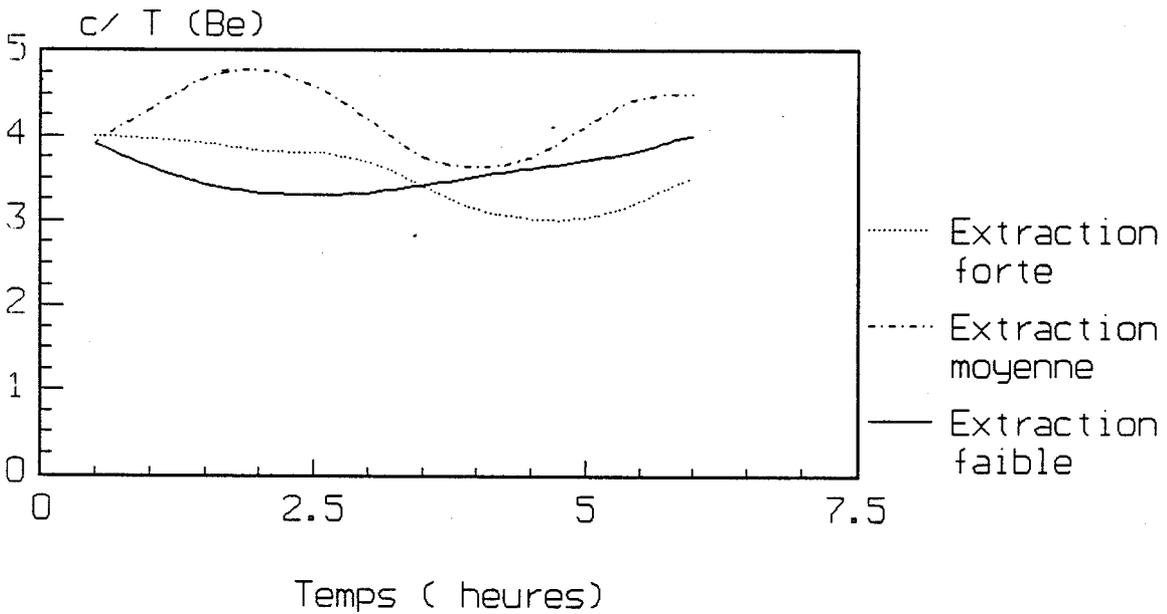
Figure IV.14



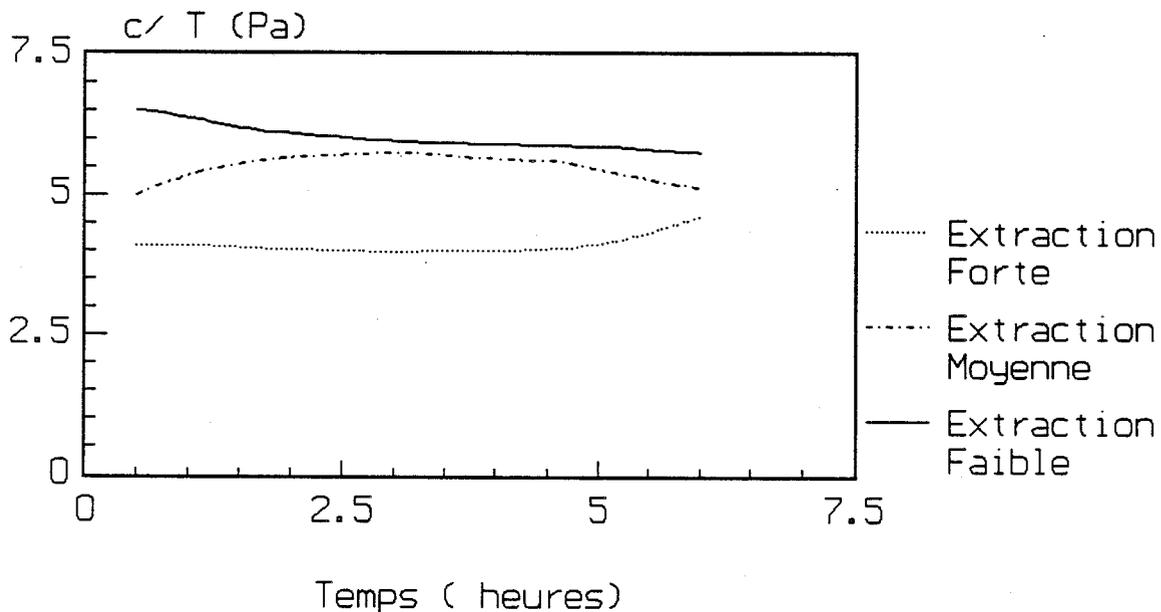
Configuration II: Chauffage convectif  
Rapport du flux sur le gradient  
de température paroi Be  
Figure IV.15



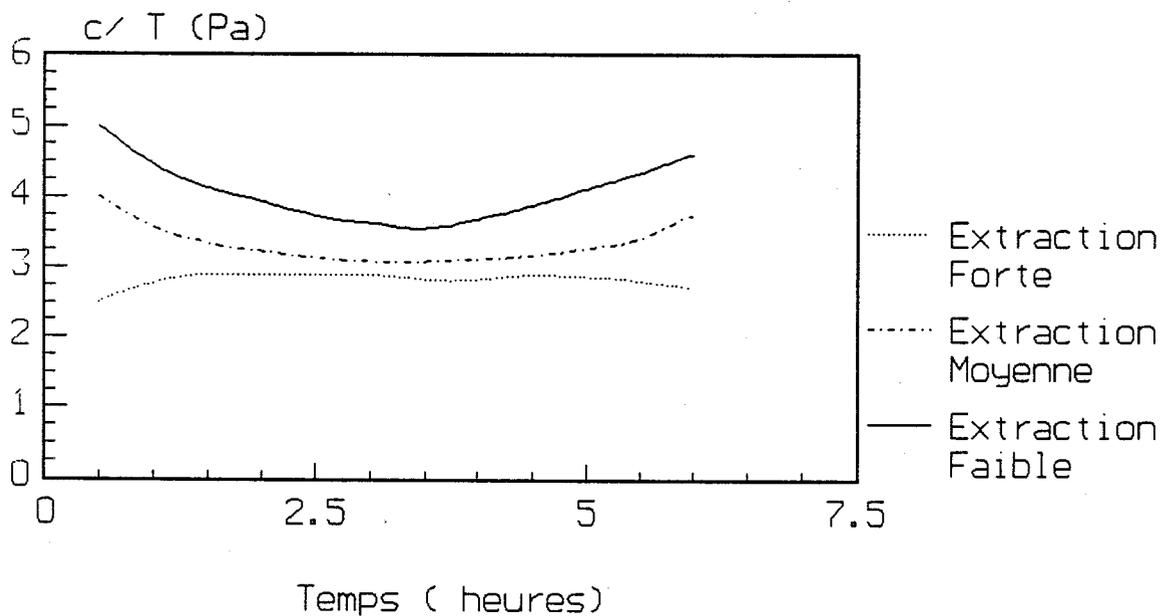
Configuration II: Chauffage radiatif  
Rapport du flux sur le gradient  
de température paroi Be  
Figure IV.16



Configuration II  
 Rapport du flux sur le gradient  
 de température paroi Pa  
 Figure IV.17



Configuration II  
 Rapport du flux sur le gradient  
 de température paroi Pa  
 Figure IV.18



#### IV.6 Conclusion

L'analyse des flux entrants dans les parois ; et celui des rapports flux entrants dans les parois /gradient de température (air ambiant-paroi de surface ) montre que la notion de coefficient d'échange constant doit être interprétée avec beaucoup de réserve en régime transitoire en particulier pour les parois légères .

Pour les parois lourdes , un coefficient d'échange total  $h_t$  voisin de  $9 \text{ W/m}^2\text{°C}$  est souvent une approximation suffisante et on retrouve les coefficients standards du régime permanent .

Rappelons notre signification de paroi lourde qui est différente de celle des normes CSTB ; une paroi lourde est , pour nous , une paroi qui offre aux flux thermiques une éffusivité importante et une épaisseur suffisante (effet de masse) ; au point de vue thermique , la paroi lourde considérée présente un gradient de température , air ambiant-paroi de surface , important.

Pour cette paroi les flux radiatifs et convectifs sont toujours entrants et la valeur du coefficient de transfert,  $h_t \# 9 \text{ W/m}^2\text{°C}$  , est une valeur admissible avec une composante convective  $h_c \# 4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  et une composante radiative  $h_r \# 4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  mais seulement pour les gradients de température supérieurs à  $3\text{°C}$  donc durant les premières heures du régime transitoire .

Pour les parois légères, la notion de coefficient d'échange total  $h_t \# 9 \text{ W/m}^2\text{°C}$  n'est pas significative . Nos mesures et nos interprétations montrent que si  $h_c$  ( coefficient d'échange convectif ) reste voisin de  $4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  , on ne peut rien dire du transfert flux radiatif ; dans les régimes transitoires le bilan radiatif devient rapidement négligeable , ou est négatif , ce qui correspond à  $h_r$  variant de  $4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  à une valeur nulle puis à une valeur négative.

On conçoit que pour une valeur intermédiaire , par exemple plâtre -isolant , les mécanismes soient très variés . Au départ des régimes transitoires les transferts radiatifs et convectifs sont de même sens.

Rapidement , au bout de 5 heures de chauffage convectif , le bilan radiatif devient nul.

Au total , les essais d'interprétation des flux expérimentaux et des gradients de température montrent bien la complexité des mécanismes de transfert et de couplage entre flux convectif et les bilans radiatifs ces grandeurs ne sont pas de même nature et c'est ce qui rend la modélisation si difficile .

Rappelons que les résultats cités ne concernent que les parois latérales pour les planchers et les plafonds les phénomènes sont encore plus complexes en particulier pour les sols lourds ou les phénomènes de stratification des couches d'air sont fondamentaux sauf cas des chauffages par le sol .

IV.7-Essai d'un modèle simplifié pour l'analyse des températures ( air ambiant faces internes de paroi ) et des flux dans un local d'habitation.

Compte tenu des nombreuses remarques inspirées par les valeurs expérimentales , il apparaît nécessaire de bien préciser les hypothèses de travail.

a)-Nous admettons que le local étudié est aveugle , pas d'énergie solaire: normale ou diffuse , entrante.

b)-L'influence de l'extraction d'air est considérée comme une perte d'énergie constante qui doit être systématiquement retirée de l'énergie fournie.

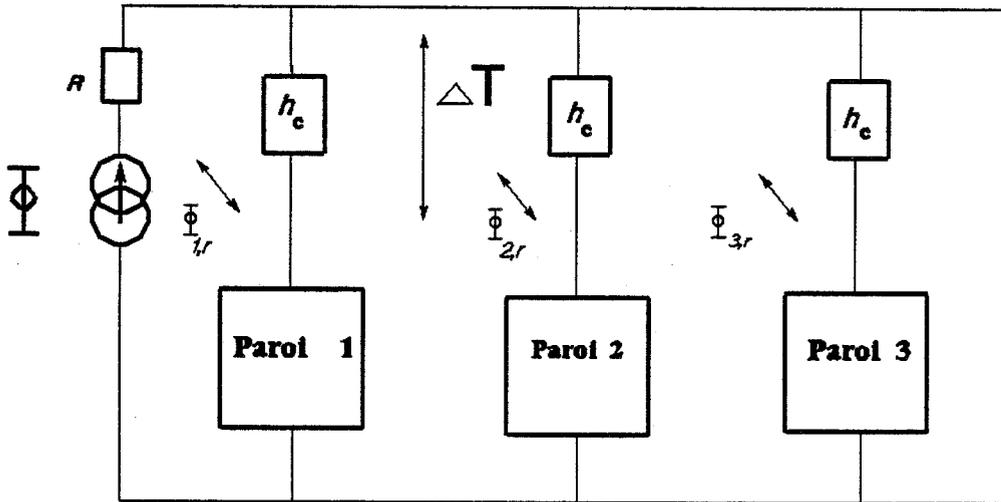
c)-L'influence des planchers et des plafonds n'est pas ici analysée ( elle est l'objet du chapitre suivant ) . Les planchers et les plafonds sont dans ces expériences fortement isolés et contribuent peu à la perte d'énergie ; dans le chapitre suivant , ces influences seront précises .

d)-L'influence de la nature de la source d'énergie majoritairement radiative ou majoritairement convective est introduite sous la forme arbitraire d'un coefficient 1.2 pour une source convective ( il faut 1.2 fois d'énergie de base en plus pour assurer les mêmes effets apparents en régime transitoire ).

e)- au début des expériences tous les matériaux sont à la température du puits .Au total ce qui est modélisé c'est un petit local aveugle de 14 m<sup>3</sup> . L'influence des parois verticales et des coefficients de transferts est particulièrement étudiée.

Le couplage entre les effets convectifs et radiatifs est difficile à analyser . Précisons quelques données:

Supposons un schéma figure IV.19 :



$T_a$ : température air ambiant au milieu du local

Figure IV.19

Nous pouvons en première approximation pour toutes les parois verticales de ce schéma et en particulier les parois lourdes, admettre un coefficient d'échange lié au transfert convectif  $h_c$  voisin de  $4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Mais ce schéma ne permet pas de préciser la nature des bilans radiatifs, qui entrent et sortent de chaque paroi. Ces bilans varient suivant la nature de l'effusivité du premier matériau, suivant l'épaisseur du matériau, suivant le temps, suivant la nature de la source etc...

Nous pouvons seulement donner des indications sur une valeur moyenne des effets radiatifs.

Supposons que la paroi A soit lourde, le matériau vu de l'entrée a une effusivité supérieure à  $1500 \text{ J/m}^2 \cdot \text{C}\sqrt{\text{s}}$ , (une épaisseur de plusieurs cm). Cette paroi restera pendant les régimes transitoires (plusieurs jours), plus froide que les autres parois isolantes ou plâtre..

En première approximation pour cette paroi, la température moyenne radiante du local, sera voisine de  $T_a$  température d'air et nous pouvons dire que les transferts mesurés par les flux radiatifs entrants sont équivalents à un transfert résultant équivalent à un coefficient d'échange  $h_r$  voisin de  $4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  et cette valeur restant

à 10% près satisfaisante pour une température de paroi nettement inférieure à la température d'air ambiant  $T > 3^{\circ}\text{C}$

Supposons que la paroi B soit une paroi : ( plâtre 7 cm isolant 5 cm ).

Durant les trois premières heures cette paroi peut être considérée comme mi-lourde ( température de surface nettement inférieure à la température d'air ) et on peut admettre comme résultante un flux radiatif entrant équivalent à un coefficient  $h_r$  voisin de  $4 \text{ W/m}^2\text{C}$  , puis cette paroi au bout de 5 heures , présente un bilan radiatif nul à 20% près .

En pratique pour cette paroi , nous pouvons admettre de 0 à 3 heures un coefficient d'échange  $h_r \neq 4.5 \text{ W/m}^2\text{C}$  , pour des temps supérieurs à 3 heures  $h_r$  voisin de 0 ( en pratique nous avons simulé  $h_r=0$  ).

Ce sont les flux convectifs qui maintiennent la température de surface de cette paroi . Ceci n'est qu'une première approximation car les autres parois isolantes ou lourdes modifient ces données .

Supposons que la paroi C soit isolante

On peut admettre un flux total entrant équivalent à un coefficient  $h_t$  voisin de  $4.5 \text{ W/m}^2\text{C}$  avec  $h_r$  nul , puisque cette paroi , présente un bilan de flux radiatif nul à 20% près au bout d'une heure .

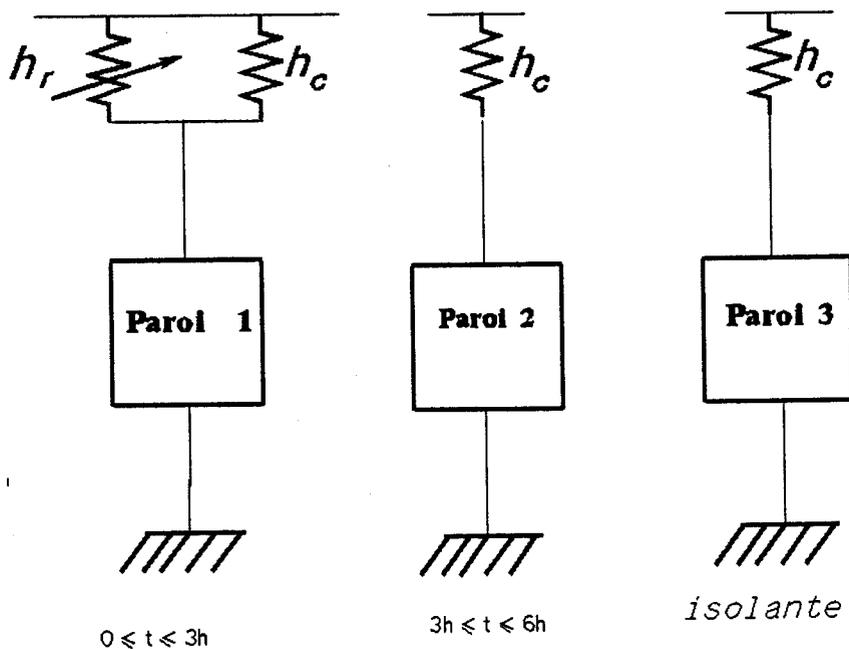


Figure IV<sub>20</sub>

IV.8-Comparaison des valeurs simulées aux valeurs expérimentales.

Avec les valeurs admises - paroi lourde béton  $h_c = h_r = 4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  ,  $h_t = 9 \text{ W/m}^2\text{°C}$  ; paroi mi-lourde plâtre  $h_c = 4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  ,  $h_r = 0$  ; paroi légère polystyrène  $h_c = 4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  ,  $h_r = 0$  - nous simulons les réponses du local configuration II et nous comparons avec les valeurs expérimentales .

Nous avons deux formes d'excitation thermique :

- Excitation à puissance thermique constante ( flux constant ) .
- Excitation à température d'air ambiant constante .

Nous donnons principalement les valeurs thermiques à température d'air ambiant constante obtenue à partir d'une régulation contrôlée de la source .

-Paroi lourde béton : résultats

Le flux total expérimental entrant dans cette paroi est toujours important , ceci est lié au gradient de température important . Le flux total simulé est légèrement supérieur au flux expérimental .

Une explication possible est peut être liée à l'effusivité du béton choisie  $b = 2000 \text{ J/m}^2 \text{°C}\sqrt{\text{s}}$  ( modèle ) , avec  $b = 1500 \text{ J/m}^2 \text{°C}\sqrt{\text{s}}$  les résultats sont plus satisfaisants.

Pour cette paroi lourde et dans toutes les expériences  $h_t$  simulé  $9 \text{ W/m}^2\text{°C}$  donne satisfaction à 10% ou 20% près ( 10% pour  $b = 1500$  ) .

- Paroi mi-lourde : plâtre .

Les réponses simulées obtenues sont au premier ordre satisfaisantes pour  $h_t$  modèle =  $4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  et  $h_r = 0$  pourtant en fonction du temps et suivant la configuration des variations atteignant 20% sont observées .

-Paroi légère : polystyrène

Il est difficile de donner une interprétation du fait de la faible effusivité du polystyrène  $b = 60 \text{ J/m}^2 \text{°C}\sqrt{\text{s}}$  proche de celle de l'air ( inférieure à celle des fluxmètres utilisés ) une valeur de  $2.5 \text{ W/m}^2 \text{°C}$  est une moyenne acceptable .

Les gradients de température toujours faibles sont variables avec l'excitation , l'extraction , la configuration .  $h_t = 2.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  est une première approximation .

Le plus souvent le flux résultant est entrant dans la paroi pour les premières heures puis voisin de 0 ( flux radiatif négatif ).

Précisons que  $\Delta T$  étant toujours faible la contribution des flux des parois fortement isolées est en première approximation négligeable dans le bilan énergétique d'un local.

#### IV.9 Conclusion

Devant la complexité des mécanismes du transfert d'énergie thermique il est évident qu'un modèle aussi simplifié que celui présenté est insuffisant pour traduire l'ensemble des mécanismes de couplages paroi/source et en particulier obtenir : les flux radiatifs et les flux convectifs entrants sortants ; le gradient de température air ambiant - surface de paroi.

Pourtant ce modèle est intéressant car en première approximation , il apparait comme supérieur à beaucoup d'autres présentés dans la littérature en particulier pour les premières heures du régime transitoire .

Au total un modèle simplifié du régime transitoire paroi lourde  $h_t \approx 9 \text{ W/m}^2\text{°C}$  , paroi mi-lourde  $h_t$  voisin de  $4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  et paroi légère  $h_t$  voisin de  $2 \text{ W/m}^2\text{°C}$  est valable à 20% près pour définir l'état thermique durant le régime variable pour un local de configuration simple et en l'absence de flux extérieurs entrants .

Il est évident que ce modèle est insuffisant , nous avons essayé d'introduire des transferts thermiques avec couplages variables en fonction des parois et du temps , la complexité devient extrême et la concordance avec les résultats expérimentaux n'est pas plus satisfaisante.

Une autre méthode consiste à choisir deux modèles l'un avec les composantes radiatives des flux ( tout est défini si les températures sont connues et les calculs sont rigoureux ) , l'autre avec des composantes convectives des flux et de superposer ces modèles mais comment définir les couplages continuellement variables ( bilans des flux qui dépendent des gradients de température  $\Delta T$  ).

Au total c'est un constat de semi échec pour l'établissement d'un modèle donnant à 2% la réponse thermique d'un local .

Remarque la stratification a elle seule est responsable d'erreurs de l'ordre de 10% près

Pour une configuration lourde le modèle est valable à mieux que 5% même en régime transitoire , mais avec les structures légères de plus en plus fréquentes ( économie

d'énergie ) , les erreurs atteignent 10 ou 20% . Précisons qu'alors les valeurs de puissance énergétiques consommées sont faibles , et le modèle est suffisant pour l'étude des locaux en régime transitoire.

A la limite pour un local fortement isolé de l'intérieur on supprime le problème du modèle puisqu'il n'y a plus de consommation d'énergie .

## CHAPITRE CINO :DISPOSITIF EXPERIMENTAL

### V.1 Introduction

Nous avons réalisé de nombreuses mesures une partie seulement est présentée .  
En thermique , l'étude expérimentale est indispensable pour confirmer la théorie et valider ou établir éventuellement un modèle et pour préciser partiellement les conditions des transferts thermiques .

Il est nécessaire de donner une estimation du degré de précision du modèle présenté ; le modèle est d'autant plus proche de la réalité physique que ce degré est faible , mais cette marge d'incertitude est limitée par les conditions expérimentales.

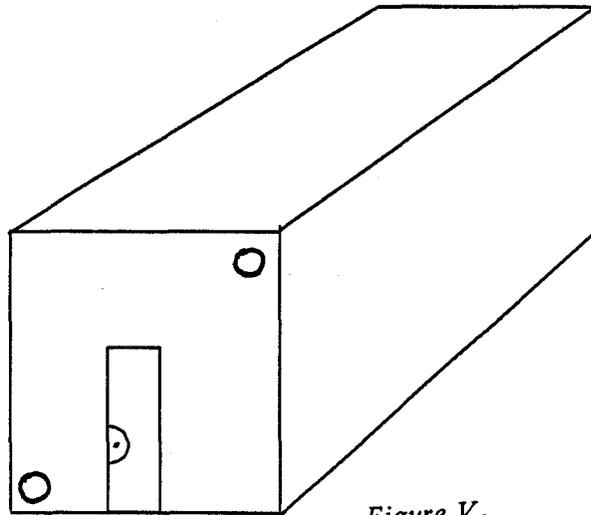
Nous présentons dans ce chapitre l'ensemble des dispositifs expérimentaux utilisés.

### V.2 Présentation du local.

Pour la réalisation expérimentale , nous utilisons un local vide , aveugle, isolé de forme parallépipédique figure V.1 et de volume 14 m<sup>3</sup>. Ce local est situé au sous-sol d'un bâtiment de forte inertie - température de l'air ambiant est pratiquement constante et uniforme dans la journée- toutes les parois sont lourdes.

Pour le besoin de l'expérience les parois latérales lourdes béton 1 , 2 et le plancher sont ou ne sont pas isolés de l'intérieur ( 5 cm de polystyrène extrudé )

Le plafond est fortement isolé de l'intérieur . La paroi avec porte est fortement isolée.

Figure V<sub>1</sub>

### V.3 Extraction d'air

Le renouvellement d'air s'effectue par deux orifices ( haut et bas ) de diamètre 0.13 m

Nous effectuons pour le besoin de l'expérience deux types d'extraction:

- Une extraction faible ( naturelle ) : renouvellement d'air naturel
- Une extraction moyenne ( ETRI ) : renouvellement d'air moyen d'un volume par heure ( 14 m<sup>3</sup> d'air évacué par heure )

### V.4. Sources thermiques

L'obtention d'une température d'air uniforme dans un volume important au milieu du local n'est pas facile .

Des essais de sources thermiques très distribuée formée de nombreux panneaux chauffant répartis dans tout le volume ont été fait au laboratoire [12] . Ces panneaux modifient les conditions des transferts et ne donnent pas une image réelle des contributions radiatives et convectives d'un type de chauffage dans un local donné .

La notion de répartition strictement uniforme de la température d'air du local n'est pas significative dans le contexte de nos mesures . Nous utilisons volontairement des sources proches de celles utilisées dans la pratique journalière .

Les sources thermiques utilisées sont alimentées en énergie électrique ; elles sont de trois types :

-Une source majoritairement radiative - panneau radiant de puissance 1500/750 W - ; situé à 50 m du plancher d'une surface de 0.75 m<sup>2</sup> (schéma figure 2 )

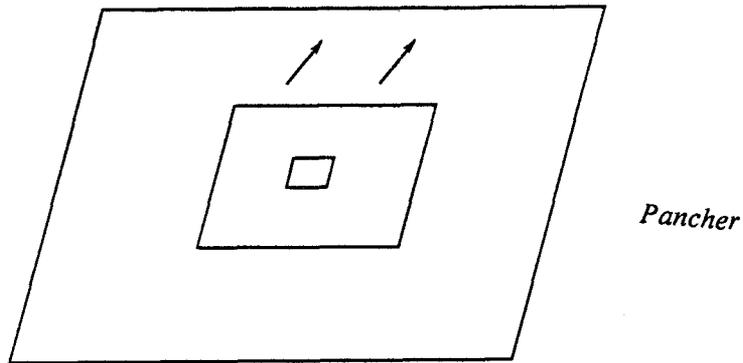


Figure V<sub>2</sub>

-Une source majoritairement convective -panneau convectif du commerce de puissance 1700/850 W - ; de surface 0.60 m<sup>2</sup> dans les mêmes conditions que la source radiative ( schéma figure 3

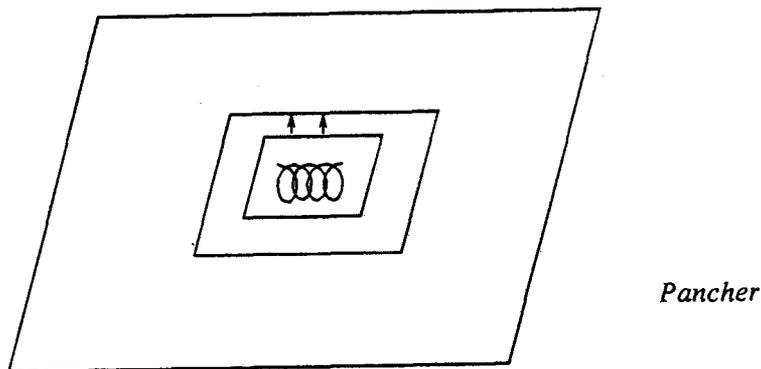
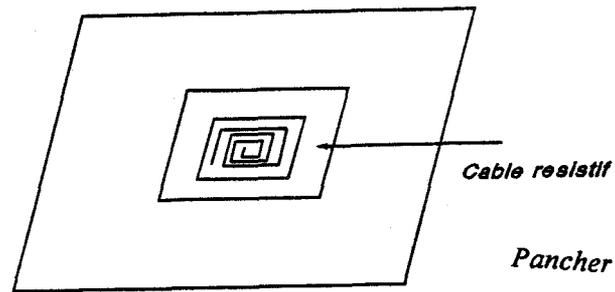


Figure V<sub>3</sub>

-Une source d'énergie distribuée par câble résistif de puissance 1200 W posé sur le plancher ( schéma figure V.4 ). Le plancher est léger ou lourd . La source n'est pas noyée dans le plancher.

Figure V<sub>4</sub>

### V.5 Mesure des flux

Pour mesurer la variation de flux entrant dans les parois du local , on utilise des fluxmètres de faible impédance interne , mis au point par le Professeur THERY au sein du laboratoire de mesures automatiques ( Brevet ANVAR ) [16] , [17] .

#### Caractéristiques des fluxmètres utilisés

Ces fluxmètres sont constitués d'un nombre important de couples "spéciaux " cuivre-constantan associés sur une feuille de kapton , nous utilisons la dimension 0.14x0.14 m , d'épaisseur  $2 \cdot 10^{-3}$  m , de résistance thermique série  $0.005 \text{ K/W.m}^2$  , de capacité thermique  $2200 \text{ J/K.m}^2$  et de sensibilité moyenne de l'ordre de  $1000 \text{ uV/W}$ .

Ces fluxmètres ne permettent pas de séparer les contributions radiatives et convectives du flux total.

Pour contourner cet obstacle nous avons dans le cadre du laboratoire mis au point un fluxmètre différentiel à partir des fluxmètres élémentaires permettant ainsi de séparer au premier ordre les contributions convectives et radiatives.

Le principe de ce fluxmètre dit " mixte " est simple :

-Supposons une mosaïque de capteurs élémentaires de flux , les uns noircis , les autres parfaitement réfléchissant avec un coefficient réflecteur théorique infini figure

-Supposons que l'une des faces, la face inférieure de tous les capteurs, soit à température constante, lorsqu'un flux  $\Phi_t$  (somme des bilans des composantes radiatives  $\Phi_r$  et des composantes convectives  $\Phi_c$ ) rencontre un tel capteur, les flux  $\Phi_r$  et  $\Phi_c$  ont un effet additif sur les corps noirs; mais par contre sur les fluxmètres parfaitement réfléchissants, il n'y a aucun effet apparent du flux radiatif, seul l'effet du flux convectif est pris en compte.

Il apparaît donc que l'indication des fluxmètres brillants représente  $\Phi_c$ : la composante convective du flux total considéré.

Connaissant les contributions totales des flux sur les surfaces noires, nous obtenons la contribution radiative:  $\Phi_r = \Phi_t - \Phi_c$

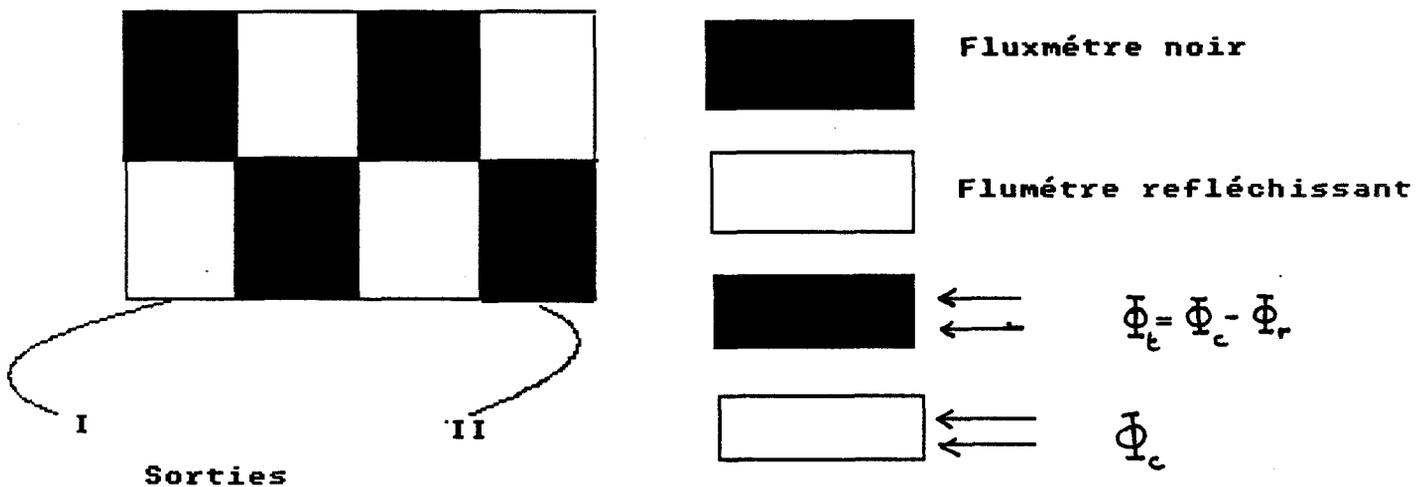


Figure V<sub>5</sub>

Toutefois les problèmes techniques ne sont pas simples, nous rencontrons des difficultés pratiques, en effet les surfaces brillantes ne sont pas parfaitement réfléchissantes, nous estimons les erreurs de mesure de l'ordre de 10%, en plus nous avons le problème des contacts thermiques entre matériaux et fluxmètres ( nous avons amélioré ces contacts par une couche mince de graisse spéciale ).

-Les fluxmètres présentent des impédances thermiques, placés sur un matériau donné, ils ne donnent pas des informations exactes.

-De nombreux travaux ont été effectués aux laboratoires pour préciser les erreurs commises.

-Rappelons quelques données :

Pour une excitation à source constante de type échelon thermique , une énergie thermique est nécessaire pour augmenter la température du fluxmètre et cette énergie stockée n'est pas disponible pour contribuer au chauffage du matériau .

En pratique , en régime établi , les flux sont exacts et en régime transitoire , l'erreur dépend du fluxmètre et du matériau , il faut introduire des corrections :

- a) L'effusivité du matériau et du fluxmètre sont du même ordre de grandeur , l'erreur sur les flux est faible .
- b) L'effusivité du matériau est plus grande que celle du fluxmètre , l'erreur sur le flux est faible .
- c) L'effusivité du matériau est plus petite que celle du fluxmètre , l'erreur peut être importante pour les matériaux légers pour des variations importantes durant des temps courts ( inférieurs à 15 minutes) .

#### V.6 . Mesure de température.

La mesure de la température de surface des matériaux dit "léger" à faible capacité thermique est difficile à obtenir. Il en est de même pour la mesure de la température d'air ambiant.

Les capteurs de température que nous utilisons pour la mesure sont des sondes au silicium dopé .

La relation qui régit la température mesuréé par le capteur est donnée par le constructeur :

$$T = (R_0 - 2000) / 15 + 25 \quad ( ^\circ\text{C} ) \quad [ \text{V.1} ]$$

$$R_0 = 2000 \, \Omega \quad \text{à } 25 \, ^\circ\text{C} .$$

15 étant la pente de la courbe d'étalonnage .

Nous avons étalonnés ces capteurs , et nous avons vérifié que la relation V.1 est satisfaisante à 0.2°C près .

Il est évident que le capteur perturbe la mesure de température , mais les variations des gradients de température  $\Delta T$  étant lentes les erreurs restent faibles .

L'avantage des ces capteurs à forte résistance ( 2000  $\Omega$  ) est de minimiser l'effet des résistances de contact avec les fils de liaison .

La mesure de la température ambiante ( milieu du local ) est difficile en raison des échanges thermiques entre capteur -air ambiant.

De nombreux travaux ont été faits sur ces mesures de température ambiante [ 19] [20]

L'expérience a montré qu'après quelques minutes , les écarts (  $T_{réelle} - T_{mesurée}$  ) sont inférieurs à 1°C.

Nous mesurons la température d'air ambiant en plaçant le capteur au milieu du local.

Pour la mesure de température de surface des matériaux , il faut assurer un contact thermique suffisant matériau-capteur .

### V.7. description du dispositif technique .

V.7.1 Conditions données pour obtenir un gradient de température entre l'air ambiant d'un local et l'extérieur .

Pour le besoin de l'expérience , on doit obtenir le plus rapidement possible et maintenir aussi longtemps que possible ( plusieurs heures ) avec le moins de fluctuations un gradient de température  $\Delta T$  ( air ambiant- air externe).

Un asservissement thermique classique est inadapté à nos mesures , en effet tout système thermique asservi a tendance à être instable , puisqu'une énergie thermique fournie produit une montée en température avec un retard lié à l'ensemble des retards du système et de la chaîne de mesure.

Pour surmonter ces difficultés c'est à dire obtenir une puissance de chauffage qui maintient par exemple un gradient de température de 10°C , il faut utiliser un asservissement plus adapté .

Pour obtenir le gradient de température souhaité , nous utilisons une méthode d'asservissement basée sur des " préexpériences " dans un premier temps nous étudions - pour une configuration donnée - les meilleures conditions permettant d'obtenir :

- Une montée de température rapide .
- Des conditions de régulation gain de l'amplificateur d'asservissement et puissance de base de référence maximale possible ; puis nous utilisons les résultats de cette étude pour réaliser une chaine adaptée avec une tension de référence et des coefficients d'amplification optimisés .

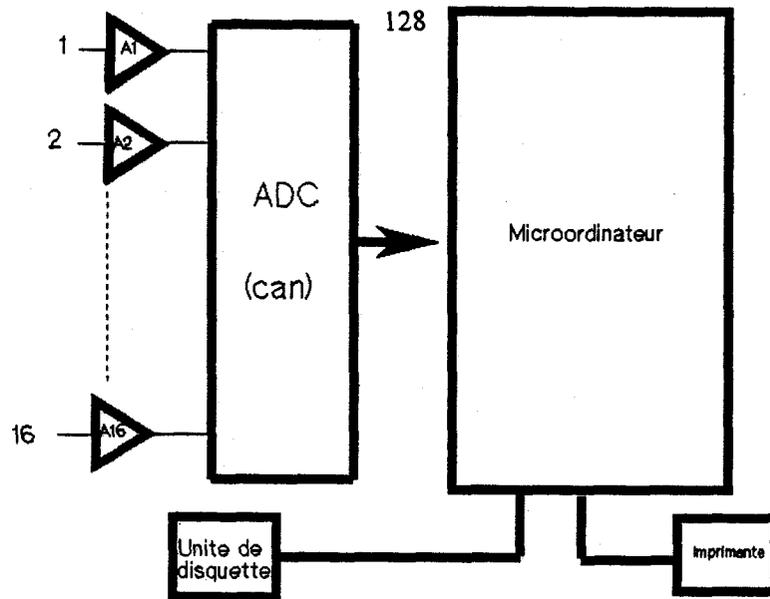
#### V.7.2. Techniques de mesure .

Les signaux électriques issus des capteurs de base de flux et de température sont souvent de très faible niveau , de l'ordre de quelques dizaines de microvolts , il est nécessaire de les amplifier avant de les transmettre à un convertisseur analogique numérique.

Pour mesurer ces signaux , ils existent plusieurs techniques , nous utilisons la technique de l'amplificateur à gain constant , de l'ordre de 1000, à forte impédance d'entrée .

Un tiroir de mesure [21] assure l'amplification des signaux analogiques bas niveau , puis les conversions en signaux numériques avec transmission adaptée à un micro-ordinateur .

Pour la mesure de la température chaque amplificateur est accompagné d'un générateur de courant stable .



Ci-dessus la synoptique de la chaîne de mesures et d'acquisitions de données que nous avons utilisé .

### V.2.3. Traitement numérique de l'information

Pour le traitement numérique et l'enregistrement des résultats expérimentaux , nous utilisons une chaîne automatique de mesure et d'acquisition constituée de :

- un micro-ordinateur commodore CBM 4032 .
- Un lecteur de disquettes .
- Une imprimante .

Le logiciel élaboré permet le fonctionnement automatique de cette chaîne de mesure et d'acquisition .

### V.7.4 Chaîne de contrôle de puissance thermique de chauffage .

Nous avons utilisé deux dispositifs :

- 1) Une version analogique ( asservissement analogique )
- 2) Une version numérique (asservissement numérique )

Le synoptique de ces dispositifs est donné figure V<sub>7</sub>

- 1) Première méthode : Asservissement analogique

A un instant donné , l'information température d'air ambiant ou tension proportionnelle est comparée (  $A_2$  ) à une température de référence ( ou tension équivalente ).

Un amplificateur permet d'obtenir un signal normalisé ( 0-10V )de commande - signal transformé par un dispositif de mise en forme en un train d'impulsions servant à asservir le générateur de puissance thermique.

Chaque expérimentation suppose un changement de tension de référence et un réglage de gain de l'amplificateur .

Cette méthode ne permet pas de faire facilement les modifications et de régler la partie intégrale de l'amplificateur .

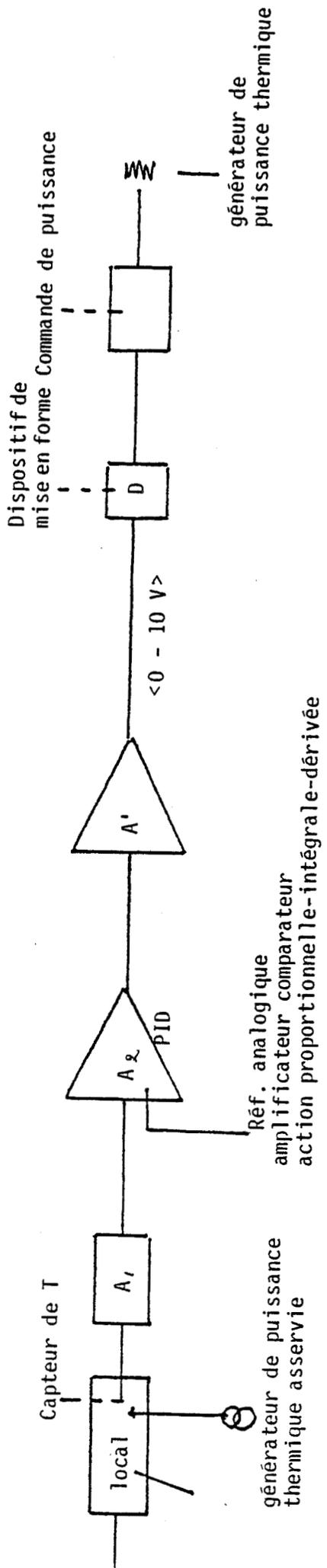
## 2) Deuxième méthode :Asservissement numérique .

Cet ensemble comprend un capteur de température et son amplificateur , un convertisseur analogique numérique , une comparaison de signal numérique capteur et d'un signal numérique de référence et un traitement de l'information avec gain choisi à partir d'un logiciel adapté . Ce logiciel permet d'introduire utilisé le gain d'amplification convenable et une valeur de tension de référence adaptée ( les valeurs de tension de référence et de gain font l'objet de recherche préalables pour donner les meilleures réponses expérimentales ) .

Les modifications de l'asservissement numérique ( logiciel interactif ) ne présentent aucune difficulté.

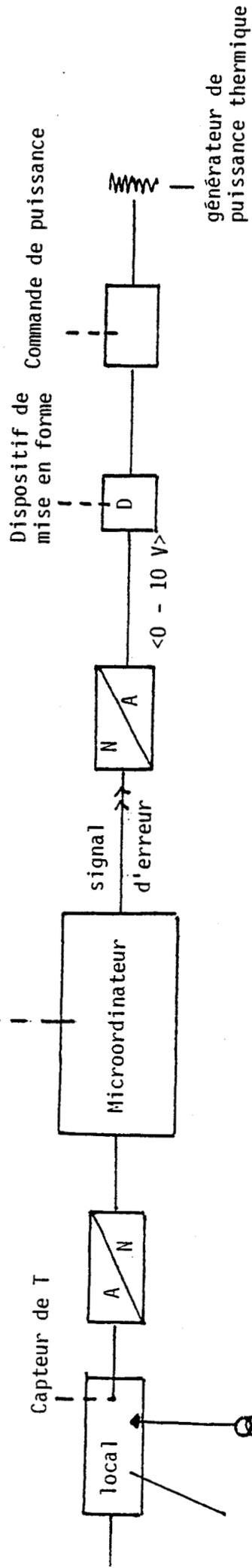
Rappelons qu'un gain trop important se traduit par des instabilités . Il est difficile de maîtriser les locaux thermiques ayant des constantes de temps apparentes de plusieurs heures même de plusieurs jours .

Nous avons limité l'étude d'asservissement à une étude expérimentale .



1 - ASSERVISSEMENT ANALOGIQUE

Valeur numérique de référence plus une tension de consigne et un gain d'amplification du signal d'erreur



2 - ASSERVISSEMENT NUMERIQUE

Générateur de puissance thermique asservie

Capteur de T : Chaîne de contrôle de puissance

### CONCLUSION.

Nous proposons dans une première partie la généralisation des notions de propagation dans les matériaux multicouches . Nous montrons qu'à partir des propriétés linéiques des matériaux composants , nous pouvons les caractériser en utilisant les notions complémentaires d'impédance caractéristique et de constante de propagation et les coefficients des matrices de chaînes des matériaux multicouches dans les domaines de la physique : ondes électromagnétiques , ondes acoustiques , ondes optiques , etc ...

Pour les calculs , nous avons utilisés partiellement les logiciels de LECLERQ [3] , nous avons adapté ces logiciels , nous avons conçu des logiciels permettant de passer à des coefficients de réflexion et des coefficients de transmissions etc ...

Nous montrons ensuite que pour plusieurs transferts en particulier en thermique , on peut introduire des notions d'impédance " fictive " , de propagation " fictive" , de quadripôle " fictif " et traiter par analogie les problèmes de conduction thermique comme des propagations classiques .

Cette première partie est à notre connaissance nouvelle , elle doit conduire à un enseignement simplifié et à de nouvelles recherches sur des matériaux multicouches linéaires et non linéaires .

Dans une deuxième partie nous étudions les transferts thermiques en régime transitoire dans un local aveugle avec divers modes d'excitation thermique , diverses configurations - lourde , mi-légère , légère - , divers modes d'extraction ; avec une attention particulière au plancher et au plafond .

Cette partie n'est pas entièrement nouvelle , nous avons avec Madame DUTEIL [13] participé à des études préparatoires .

Les difficultés rencontrées sont liées d'une part aux stratifications des couches d'air et aux micro-volumes ayant des régimes de convection très divers du fait des stratifications et des variations rapides des régimes de convection , les couplages

énergie thermique rayonnante sont variables en fonction du temps et des températures ce qui rend les problèmes difficiles .

D'autres difficultés sont liées à la métrologie des mesures , car les mesures de flux restent difficiles , la séparation des contributions flux convectif , flux radiatif lié aux précisions des appareils de mesures rend les précisions finales variables en particulier sur les matériaux isolants qui sont attachées d'erreurs pouvant atteindre 10% .

Nous avons réalisé des fluxmètres mosaïques permettant une assez bonne séparation des contributions de flux convectif , radiatif .

Cette deuxième partie nous permet de montrer la grande influence de l'isolation interne et du plafond isolant . Nous montrons aussi la supériorité du chauffage majoritairement radiatif sur le chauffage majoritairement convectif . Après d'autres , nous montrons que le chauffage par le plancher diminue les stratifications des couches d'air .

Les résultats expérimentaux montrent que la notion de coefficient d'échange entre source et parois dépend fortement du couplage énergie convective , énergie radiative et pour les régimes transitoires , il semble que les études doivent être reprises sur de nouvelles bases .

Remarquons que les problèmes de couplage source - parois si important dans les constructions anciennes sont devenus presque négligeables dans les constructions récentes et en particulier les bureaux où de fortes isolations internes rendent les effets de ces couplages faibles par rapport aux énergies consommées .

Dans la troisième partie : nous effectuons des essais des modélisations semi - empiriques pour retrouver de façon théorique les résultats expérimentaux observés .

Pour les régimes transitoires et pour établir des modèles aux premier degré , nous montrons :

- Pour les parois légères , on peut admettre des bilans radiatifs nuls et un transfert d'énergie thermique de nature entièrement convective .

- Pour les parois semi - légères ( vue de l'intérieur ) dans un premier temps - les deux premières heures - un bilan radiatif nul et un transfert d'énergie thermique lié majoritairement aux effets convectif . dans un deuxième temps ( temps supérieur à deux heures ) il faut conserver une légère contribution radiative et un transfert d'énergie thermique majoritairement convective .

- Pour les parois lourdes il faut conserver à la fois des échanges de nature radiatives et des échanges de nature convective .

Avec ces hypothèses et après beaucoup d 'essais d'autres types de modèles cités dans la littérature donnant une précision de l'ordre de quelques % ne présentent plus d'intérêt pour la majorité des constructions récentes chauffage par le sol , forte isolation intérieure .

## ANNEXE A.

REPOSE D'UN ENSEMBLE MULTICOUCHE AUX ONDES ACOUSTIQUES.*A.I INTRODUCTION*

La propagation des ondes acoustiques planes dans les matériaux isotropes est bien connue , pourtant du fait de l'étude des affaiblissements étudiés particulièrement dans les matériaux de construction et du fait de l'utilisation des matériaux poreux à alvéoles de dimensions plus ou moins grandes et plus ou moins ouvertes donc des matériaux qui ne sont plus isotropes , il apparait des difficultés .

Pour l'enseignement l'étudiant a du mal à comprendre l'importance des coefficients d'atténuation , l'importance des interfaces , l'importance des réflexions et comme en plus l'oreille n'est sensible qu'à un spectre de fréquence donné admettons 300Hz-10KHz , il appait des difficultés particulières .

Nous présentons une propagation d'onde acoustique simplifiée dans un ensemble multicouche comme nous avons présenté la propagation des ondes E.M dans un ensemble de matériaux à coefficients  $\mu^*, \epsilon^*$  connus.

Puisque nous admettons que les matériaux sont isotropes et à coefficients constants , nous avons une équation de propagation du type :

$$\Delta \vec{U} + \frac{\omega^2 \rho}{M^*} \vec{U} = 0 \quad [a]$$

avec  $\rho$ : masse par unité de volume

$M^*$ : module complexe d'élasticité acoustique

$$M^* = M' - jM''$$

Avec une vitesse complexe  $V^*(f) = \sqrt{M^*/\rho}$  [ 24] fonction de la fréquence .

Pour l'air sec à 20°C en admettant des pertes négligeables ?

$$V_0 = \sqrt{M_0/\rho} \approx 340 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$$

$$M = 1.5 \cdot 10^5 \text{ kg s}^{-2} \text{ m}^{-1} = 1.5105 \text{ Pa}$$

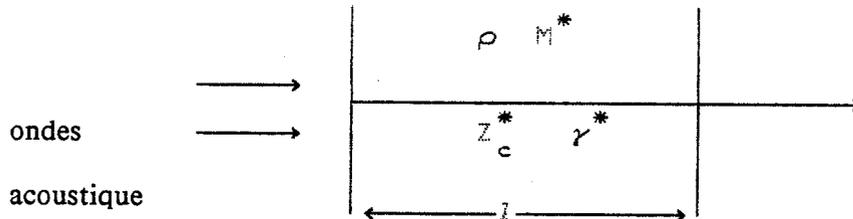
Pour l'eau à 20°C avec des pertes négligeables

$$V_{\text{eau}} = \sqrt{M_0/\rho} \approx 1 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$M_0 = 1000 \text{ kg s}^{-2} \text{ m}^{-1} = 10^3 \text{ Pa}$$

Pour un matériau monocouche d'épaisseur  $l$  de constantes  $\rho$ ,  $M_1^*$



$$Z_c^* = \sqrt{\rho M^*} = R_c + jX_c$$

$$\gamma^* = j\omega \sqrt{\frac{\rho}{M^*}} = \alpha + j\beta = A\omega + jB\omega$$

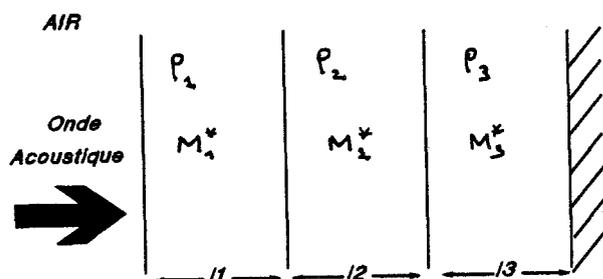
$$A = \frac{\sqrt{\rho}}{M} \left[ \frac{1}{2} (-1 + \sqrt{1 + Q^2}) \right]$$

La matrice de chaîne

$$a = \begin{bmatrix} \text{Ch}\gamma l & Z_c^* \text{Sh}\gamma l \\ \frac{\text{Sh}\gamma l}{Z_c} & \text{Ch}\gamma l \end{bmatrix}$$

Pour les dispositifs multicouches , nous utilisons à une fréquence donnée la technique des quadripôles associés .

Un matériau d'épaisseur  $l_1$  de constantes  $\rho_1, M_1^*$  est associé à un matériau d'épaisseur  $l_2$  de constantes  $\rho_2, M_2^*$  et à un matériau d'épaisseur  $l_3$  et constantes  $\rho_3, M_3^*$  .



La matrice de chaîne du quadripôle équivalent :

$$a = \prod_{i=1}^3 \begin{bmatrix} \text{Ch} \gamma_i l_i & Z_c^* \text{Sh} \gamma_i l_i \\ \frac{\text{Sh} \gamma_i l_i}{Z_c^*} & \text{Ch} \gamma_i l_i \end{bmatrix}$$

### A.II. INFLUENCE SUR LA PROPAGATION DES ONDES ACOUSTIQUES .

Pour comparer les influences des paramètres  $\rho$ ,  $M'$  et  $M''$  des matériaux sur les ensembles multicouches aux ondes acoustiques , nous ne présentons que la réponse de matériaux monocouches d'épaisseur  $10^{-2}$  m dans la bande de fréquence 1KHz-100KHz dont les caractéristiques sont connues. On admet que  $M'$  et  $M''$  sont des constantes dans cette bande de fréquence .

Nous avons adapté le logiciel standard permettant de calculer et de connaître les grandeurs caractéristiques : impédance , admittance , coefficient de réflexion ...

Le tableau A<sub>1</sub> donne les grandeurs caractéristiques des matériaux étudiés ( 26) (27) .

Matériau	$\eta$	$M'$ (Pa)	$M''$ (Pa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$Y_c$ ( $\Omega^{-1}$ )	$V$ (m/s)
Ciment	1%	$3 \times 10^{10}$	$3 \times 10^8$	2200	$1.25 \times 10^7$	3700
Béton	5%	$2 \times 10^9$	$10^8$	500	$10^{-6}$	1900
PF 105	50%	$1.1 \times 10^5$	$2.2 \times 10^4$	10	$1.6 \times 10^{-5}$	320

Tableau A<sub>1</sub>

Rappelons :

$$M^* = M' - jM''$$

Module complexe d'élasticité acoustique

$$\eta = \frac{M''}{M'}$$

Coefficient de perte

$$\rho = \text{kg/m}^3$$

Masse par unité de volume

$$Y_c = \frac{1}{\sqrt{\rho M^*}}$$

Admittance caractéristique

$$V^* = \sqrt{M^*/\rho}$$

Vitesse de phase

### AII.1 Matériau monocouche

Nous présentons dans un abaque de Smith modulaire l'admittance d'entrée pour les différents matériaux étudiés figure A.1

Le tableau A<sub>2</sub> donne les valeurs de A, B, Y<sub>c</sub> et Y<sub>e</sub>

Matériau	l (m)	Y <sub>c</sub>	Y <sub>c</sub>   $\phi$	A	B
Ciment	$10^{-2}$	$10^7$	-0.005	$1.4 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-4}$
Béton	$10^{-2}$	$10^{-6}$	-0.025	$1.25 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4}$
PF 105	$10^{-2}$	$9.4 \times 10^{-4}$	-0.098	$9.3 \times 10^{-4}$	$9.4 \times 10^{-3}$

Tableau A<sub>2</sub>

La masse joue un rôle essentiel sur l'admittance caractéristique acoustique du matériau , plus la masse est importante plus la transmission acoustique est faible et plus la reflexion est forte .

a) Matériau 1 : PF105 ( fibre de verre )

Le lieu de l'admittance caractéristique ( point asymptôte ) est  $Y_c \angle \theta = 9.44 \cdot 10^{-4} \angle -0.098 \text{ rds}$  . La vitesse de rotation est importante.

Pour une fréquence  $f > 4 \text{ KHz}$  l'admittance d'entrée est voisine du point asymptôte figure  $A_{1a}$  .

b) Matériau 2 : Béton cellulaire .

Le lieu de l'admittance caractéristique  $Y_c \angle \theta = 10^{-6} \angle -0.025 \text{ rds}$  .

Le matériau fait plusieurs tours pour s'approcher de son point asymptôte ( fréquence  $f > 300 \text{ KHz}$  )

Il est difficile d'adapter ce type de matériau aux ondes acoustiques puisque nous sortons de la bande de fréquence audible.

c) Matériau 3 : ciment ( béton lourd ) .

Le lieu de l'admittance caractéristique  $Y_c \angle \theta = 10^{-7} \angle -0.005 \text{ rds}$  .

Il faut dépasser 2 GHz pour espérer s'approcher du point asymptôte . Il est évident que l'adaptation de ce matériau aux ondes acoustiques dans le spectre de fréquences audibles est impossible.



## ANNEXE B

Calcul de l'impédance d'entrée d'un ensemble multicouche en thermique.Equation de diffusion de la chaleur.

Rappelons que le transfert de l'énergie thermique dans un milieu est régi par l'équation de diffusion de la chaleur [18]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad} \theta = a \cdot \text{div} \theta + \frac{\nu}{2C_p} \left[ \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right]^2 \quad [18]$$

$\theta(x, y, z, t)$  température en un point  $(x, y, z)$  du milieu à l'instant  $t$ .

$\nu$ : viscosité cinématique

$\vec{V}$ : vitesse de diffusion de la chaleur

$a$ : diffusivité

L'équation de la chaleur devient pour un solide où le transfert d'énergie est assuré uniquement par conduction thermique

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right]$$

Pour un milieu unidirectionnel

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

Comme dans tous les domaines de la physique, l'étude de ces phénomènes complexes peuvent être ramenée par la transformation de Fourier à une étude en régime sinusoïdal pur.

Nous considérons la conduction thermique dans des milieux infinis et semi-infinis pour une excitation sinusoïdal du type  $\theta = \theta_c e^{j\omega t} e^{-\delta x}$

$$\gamma = (1+j) 2 \sqrt{\frac{\omega}{2a}} = \alpha + j\beta$$

$\gamma$  est homogène à une constante de propagation.

Les variations en flux et en température à la profondeur  $x$  dans le milieu sont données par les équations :

$$\theta(x, \omega) = -\lambda \gamma \operatorname{Sh} \gamma x \theta_0 + \operatorname{Ch} \gamma x \Phi_0$$

$$\Phi(x, \omega) = \operatorname{Ch} \gamma x \theta_0 - \frac{1}{\gamma \lambda} \operatorname{Sh} \gamma x \Phi_0$$

Le rapport  $\frac{\theta}{\Phi} = Z_c(\omega)$  est homogène à une impédance caractéristique thermique du milieu ; pour un milieu infini  $Z_c = Z_0$  impédance d'entrée .

Soit un matériau homogène de coefficients linéaires , d'épaisseur finie  $l$  .

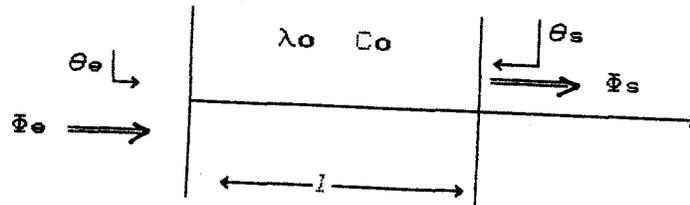


Figure B<sub>1</sub>

$(\theta_e, \Phi_e)$  température et flux d'entrée

$(\theta_s, \Phi_s)$  température et flux de sortie

Le passage de l'état thermique  $(\theta_e, \Phi_e)$  à l'état thermique  $(\theta_s, \Phi_s)$  se fait au moyen de la matrice de transmission de la paroi monocouche .

$$a = \begin{bmatrix} \operatorname{Ch} \gamma l & Z_c^* \operatorname{Sh} \gamma l \\ \frac{\operatorname{Sh} \gamma l}{Z_c^*} & \operatorname{Ch} \gamma l \end{bmatrix}$$

$Z_c^*$  : Impédance caractéristique " fictive "

$\gamma$  : constante de propagation " fictive "

Le déterminant de la matrice étant égal à l'unité, on peut passer de l'état thermique de sortie à l'état thermique d'entrée et réciproquement en inversant simplement la matrice de transmission.

Dans notre cas la matrice inverse s'obtient en changeant les signes des éléments diagonaux de la matrice.

$$\begin{bmatrix} \theta_s(1, \omega) \\ \Phi_s(1, \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Ch}\gamma & -Z_c \text{Sh}\gamma \\ \frac{-\text{Sh}\gamma}{Z_c} & \text{Ch}\gamma \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_e(0, \omega) \\ \Phi_e(0, \omega) \end{bmatrix}$$

En tenant compte des conditions initiales  $\theta(x=1) = 0$  (puits thermique).

$$0 = \text{Ch}\gamma l \theta_e(0, \omega) - Z_c \text{Sh}\gamma l \Phi_e(0, \omega)$$

$$\text{Ch}\gamma \theta_e(0, \omega) = Z_c \text{Sh}\gamma \Phi_e(0, \omega)$$

L'impédance d'entrée est définie par le rapport  $Z_e = \frac{\theta_e}{\Phi_e} Z_c^+ \text{th}\gamma l$

En basse fréquence  $RC\omega \ll 1$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2c\omega}{2a}} (1+j) ; \text{th}\gamma \approx \gamma$$

$$|Z_e| \xrightarrow{\omega \rightarrow 0} \frac{l}{\lambda}$$

Pour une structure multicouche - un tricouche par exemple - schéma équivalent figure B<sub>2</sub>

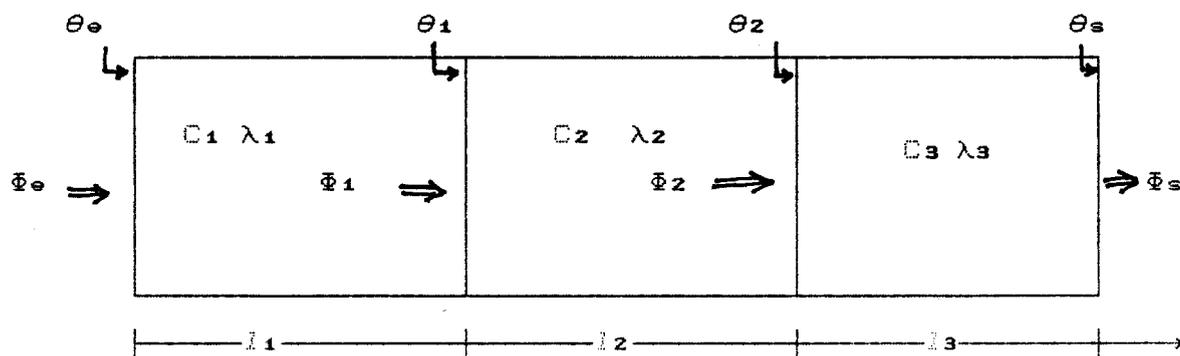


Figure B<sub>2</sub>

Le passage de l'état thermique d'entrée  $(\theta_e, \Phi_e)$  à l'état thermique de sortie  $(\theta_s, \Phi_s)$  s'effectue par un calcul matriciel :

$$A = \begin{bmatrix} \text{Ch}\gamma_1 & -Z_{c1}\text{Sh}\gamma_1 \\ \frac{-\text{Sh}\gamma_1}{Z_{c1}} & \text{Ch}\gamma_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \text{Ch}\gamma_2 & -Z_{c2}\text{Sh}\gamma_2 \\ \frac{-\text{Sh}\gamma_2}{Z_{c2}} & \text{Ch}\gamma_2 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \text{Ch}\gamma_3 & -Z_{c3}\text{Sh}\gamma_3 \\ \frac{-\text{Sh}\gamma_3}{Z_{c3}} & \text{Ch}\gamma_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_s(l, \omega) \\ \Phi_s(l, \omega) \end{bmatrix} = C \times B \times A \times \begin{bmatrix} \theta_e(0, \omega) \\ \Phi_e(0, \omega) \end{bmatrix}$$

En tenant compte des conditions aux limites : plan de sortie maintenu à une température constante ( puits thermique )  $\theta_s(z=l, \omega)$  où  $l$  est l'épaisseur de la paroi

$\theta_s(l, \omega) = 0$  puits thermique à température constante

L'impédance d'entrée  $Z_e$  tricouche est donnée par l'expression :  $Z_e = \frac{\theta_e}{\Phi_e}$

$$Z_e = Z_{c1}Z_{c2} \frac{Z_{c1}\text{th}\gamma_1 + Z_{c2}\text{th}\gamma_2 + \frac{Z_{c1}Z_{c3}}{Z_{c2}}\text{th}\gamma_1\text{th}\gamma_3 + Z_{c3}\text{th}\gamma_3}{Z_{c1}Z_{c2} + Z_{c2}^2\text{th}\gamma_1\text{th}\gamma_2 + Z_{c1}Z_{c2}\text{th}\gamma_3\text{th}\gamma_2 + Z_{c2}Z_{c3}\text{th}\gamma_3\text{th}\gamma_1}$$

Pour un système multicouche nous donnons l'expression générale pour le calcul de l'impédance d'entrée du système multicouche .

$$\begin{bmatrix} \theta_s(l, \omega) \\ \Phi_s(l, \omega) \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^n \begin{bmatrix} \operatorname{Ch} \gamma_i l_i \\ \frac{\operatorname{Sh} \gamma_i l_i}{Z_c^*} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_e(0, \omega) \\ \Phi_e(0, \omega) \end{bmatrix}$$

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. LEBRUN "Rapport interne " USTLFA Lille I 1987
- [2] K. LATEF "Contribution à l'étude des matériaux en thermique " D.E.A. USTLFA Lille I 1987
- [3] D. LECLERCQ " Caractérisation des transferts thermiques par analyse de la réponse en fréquence " Doctorat de 3° cycle USTLFA Lille I 1982
- [4 ] J. ORTUSI " Analyse des quadripôles " Ed Masson .Cie 1982
- [5] G. BOUDOURIS & P.CHENEVIER " Circuits pour ondes guidées " Ed Dunod technique 1975.
- [6]J. BRAU "Modélisation thermique des batiments " Doctorat es-sciences Lyon I 1980
- [7] P.DEPECKEN , J BRAU , S. ROUSSEAU "Pertinence des modèles simplifiés pour la description du comportement des batiments en régime thermique variable " Annales de l'institut technique du batement et des travaux publics N° 404 1982 Paris
- [8] P. GUILLEMARD " Analyse théorique des différents modèles simplifiés du comportement thermique des batiments " Rapport de stage IRBAT S<sup>t</sup> Remy Les Chevreuses 1984
- [9] A. LEBRUN " Méthode de mesure de la permittivité complexe des matériaux dielectriques du continu à l'infra-rouge " IREL Lille 1962
- [10] K . LATEF " Rapport interne " Laboratoire de mesure automatique CRESMAT USTLFA Lille I 1989
- [11] A. LEBRUN " Rôle de l'effusivité dans la conduction thermique " Note CRESMAT Lille I 1986
- [12] N.S SAHRAOUI " Contribution à l'étude en régime transitoire d'un nouveau modèle approché pour caractériser le comportement thermique d'un local " Doctorat de 3° cycle USTLFA Lille I 1985

- [13] L. DUTEL " Contribution à l'étude d'un nouveau coefficient de pertes d'énergie thermique en régime transitoire dans un local aveugle " Doctorat USTLFA Lille I 1988
- [14] J.P BARDO " Transferts thermiques par rayonnement et conduction " école d'été 1985
- [15] S. LASSUE , B. DUTHOIT , P. THERY " Echanges thermiques entre une paroi et une cellule , coexistence de sources radiatives et convectives " CREMAT USTLFA Lille I 1988
- [16] P. THERY " Fluxmètres calorifiques " Brevet ANVAR 1979
- [17] P. THERY " Fluxmètres à gradients tangentiels " technique de l'ingénieur , Mesures et contrôles tome 3 IR 2900
- [18] L.LANDAU &E.LIFCHITZ " Physique théorique tome 6 Ed Mir 1989.
- [19] M. EL HAZLI "Mesure en thermique" DEA Lille I 1988
- [20] B.BOUCHIQUET "Notice interne " CREMAT Lille I 1984
- [21] M. BRUNEAU " Introduction aux théories de l'acoustique " Publications de l'université du Maine 1983
- [22] N COUTENCEAU MONTEIL " Propriétés diélectriques de roches non argileuses " Doctorat Paris VII 1989
- [24] T. BOURBIE & O. COUSSY & B. ZINSZNER " Acoustique des milieux poreux " Ed Technip 1986
- [25] P. RASOLOFASOON " Propagation des ondes acoustiques dans les milieux poreux " Thèse de Doctorat Paris VII 1987
- [26] J. PUJOLLE " La pratique de l'isolation acoustique des bâtiments " Ed Moniteur 1978.
- [27] J.J BONTE " Contribution à la caractérisation électromagnétique de nouveaux matériaux dans une large de fréquence " Doctorat USTLFA Lille I 1990
- [28] A.R. VON HIPPEL " Les diélectriques et leurs applications " Ed Dunod 1961
- [29] F. GARDIOL " Hyperfréquences " Ed Dunod

- [30] Helwett Packard " measuring the dielectric constant of solids with th HP8510 network analyzer " Product note 8510-3
- [31] A DUMEZ " Méthodes d'études du régime variable appliquées à une paroi . Etude du comportement thermique d'un local en régime transitoire ." Thèse de sciences physiques Paris VI 1982
- [32] J .VIRGONE " Etude théorique et expérimentale du comportement thermique des parois de batiments par les facteurs de réponses " Thèse de doctorat INSA Lyon 1982
- [33] J. MASUCH " La réaction thermique des locaux : recherches analytiques " Promoclim E , tome 5E n°1 1974
- [34] G.OLIVE " Réponses thermiques d'un local aux perturbations hautes fréquences "Promoclim E , tome 7E n°1 1976
- [35] J. BADOT et J. LEBRUN " Etude expérimentale des échanges de chaleur dans un local chauffé en régime transitoire " Collection des publications Université de Liege n°78 1979.
- [36] J.M DEVISME " Contribution à l'étude du comportement thermique des parois multicouches de batiment et à la mesure des caractéristiques thermophysiques des matériaux constitutifs " Thèse de Doctorat Paris VI 1980
- [37] S BELLATAR " Traitement par corrélation des mesures simultanées de flux thermique et de température de surface appliqué à l'analyse des échanges énergétiques " Thèse de Doctorat Lille I 1985
- [38] J.F SACADURA " Initiation aux transferts thermiques " CAST INSA Lyon Technique et documentation 1982
- [39]P.TARIF " Mesure de l'atténuation des ondes compressionnelles ultrasoniques " thèse de Doctorat ParisVI 1986
- [40] Technique des traitements acoustiques R 3110-4 technique de l'ingénieur.



Résumé

L'étude est une contribution : d'une part à la propagation des ondes ( E.M , acoustiques , optiques ,... ) et aux transferts thermiques dans les matériaux multicouches ; d'autres part à une étude expérimentale et une modélisation des transferts thermiques dans les locaux d'habitation .

A partir des équations de Maxwell et de la théorie des lignes pour la propagation des ondes E.M , nous donnons les quadripôles équivalents aux matériaux homogènes linéaires . Nous généralisons la méthode pour les ensembles multicouches et donnons le quadripôle équivalent , nous obtenons les coefficients de réflexion , de transmission , etc...

Nous étendons cette méthode à toutes les ondes ( optiques , acoustiques ,... ) . Par analogie , nous assimilons les transferts thermiques à une propagation "fictive", nous définissons une impédance caractéristique "fictive" , une constante de propagation "fictive" et un quadripôle "fictif" . Nous généralisons ensuite aux systèmes multicouches . Pour tous les matériaux multicouches , nous donnons les réponses harmoniques et temporelles .

Nous étudions expérimentalement en régime harmonique , pour différentes structures , pour différentes extractions et pour différents modes de chauffage , le comportement des parois du local , en particulier l'influence du plancher et du plafond isolés de l'intérieur . Nous séparons les contributions flux résultants radiatifs , flux convectifs et nous montrons que les difficultés sont liées aux stratifications des couches d'air et aux couplages flux radiatifs -flux convectifs.

L'essai de modélisation porte sur les échanges thermiques et en particulier les couplages . Nous apportons une contribution à la modélisation des transferts thermiques dans le bâtiment en montrant que pour les parois légères il faut négliger l'influence des couplages radiatifs . Les résultats obtenus sont en régime transitoires valables à quelques % près et nous montrons pourquoi il est difficile - compte tenu du nombre de paramètres et des micro-climats - d'obtenir une bonne précision en particulier pour les locaux à forte isolation intérieure.

## Mots clés

Analogie	Flux
Contribution	Propagation
Couplage	Quadripôle
Fictif	Transfert