

N° d'ordre

THESE



Présentée

A L'UNIVERSITE DE COCODY-ABIDJAN

U. F. R. des SCIENCES des STRUCTURES de la MATIERE et de TECHNOLOGIE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR 3° CYCLE

Spécialité : Géophysique Externe

Option : Energie Solaire

par

Frédéric OUATTARA

**ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE D'UNE
CASE RONDE ENTIEREMENT CONSTRuite EN GEOBETON**

devant la commission d'examen composé de

M.	SEKA ACHY	Professeur à l'Université de Cocody	Président
M.	Siaka TOURE	Professeur à l'Université de Cocody	Directeur de thèse
M.	Issa DOUMBIA	Maître de Conférences à l'Université de Cocody.	Examineur
M.	Paul ASSAMOI.	Maître de Conférences à l'Université de Cocody.	Examineur
M.	Augustin MEMELEDJE	Maître Assistant à l'Université de Cocody.	Examineur

A mon Père:

A. Etienne OUATTARA

A ma Mère:

Assana BAILLOU

A mes Frères et Soeurs

A ma Femme:

Yao Adjoua Léa AKOU

A mon Fils:

S. Alexandre N. OUATTARA

Pour leur témoigner mon affection et ma profonde gratitude

A mes amis : M'bi KABORE

Petronille KAFANDO

Aboudramane GBANE

Assane SALAMI

Ibrahim SAKO

Olivier OBROU

En témoignage de leur soutien et conseil

REMERCIEMENTS

Je prie Monsieur le **Professeur Séka Antoine ACIY**, **Directeur** du **Laboratoire** de la **Physique de L'Atmosphère** au sein de l'**Unité de Formation et de Recherche (U.F.R)** des **Sciences des Structures de la Matière et Technologie (S.S.M.T)** à l'**Université de Cocody-Abidjan**, d'accepter mes remerciements pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de Thèse et d'avoir participé à ma formation universitaire.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur le **Professeur Siaka TOURE**, **Directeur** du **Laboratoire d'Energie Solaire**, au sein de l'**Unité de Formation et de Recherche (U.F.R)** des **Sciences des Structures de la Matière et Technologie (S.S.M.T)** à l'**Université de Cocody-Abidjan**, pour m'avoir accepté parmi ses étudiants.

Je le remercie aussi pour avoir accepté d'être le **Directeur de cette Thèse**. Ses conseils et ses critiques m'ont été d'un grand apport pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur **Paul ASSAMOI**, **Maître de Conférences** au sein de l'**Unité de Formation et de Recherche (U.F.R)** des **Sciences des Structures de la Matière et Technologie (S.S.M.T)** à l'**Université de Cocody-Abidjan**, pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je le remercie également pour ses conseils et critiques qu'il a bien voulu m'apporter dans ce travail.

Je tiens à remercier également Monsieur **Issa DOUMBIA**, **Maître de Conférences** au sein de l'**Unité de Formation et de Recherche (U.F.R)** des **Sciences des Structures de la Matière et Technologie (S.S.M.T)** à l'**Université de Cocody-Abidjan**, pour avoir accepté de participer à ce jury.

J'adresse ma profonde gratitude à Monsieur Augustin MEMELEDJE, Maître Assistant au sein de l'Unité de Formation et de Recherche (U.F.R) des Sciences des Structures de la Matière et Technologie (S.S.M.T)) à l'Université de Cocody-Abidjan, pour avoir dirigé ce travail avec sympathie et compréhension.
Qu'il reçoive mes remerciements pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je suis très reconnaissant :

- Au Directeur du Centre Informatique Régional de Côte d'Ivoire (C.I.R.C.I.) de m'avoir permis de mener à bien ce travail au sein de son centre.
- Aux enseignants et chercheurs de l'UFR SSMT qui ont contribué de près ou de loin par leur conseil et suggestion à la réalisation de ce travail.
- Aux étudiants et chercheurs du Laboratoire d'Energie Solaire pour leur grand réconfort.
- Aux personnels de l'Institut de Recherche en Energie Nouvelle (I.R.E.N.) en particulier à la secrétaire M^{me} Irmine et au Docteur N'guessan Guy Léopold OKA pour leur collaboration.
- Mes remerciements et regrets à tous ceux que je n'ai pu citer.

Nomenclature

NOMENCLATURE

Thèse troisième cycle

LETTRES LATINES

<i>SYMBOLE</i>	<i>OBJET ou DESIGNATION</i>
C_{Pa}	chaleur spécifique de l'air
T_j	température de la paroi j
T_{ac}	température de l'air extérieur
T_{ci}	température du ciel
Q^k	flux net échangé sur la paroi k
H_{cc}	coefficient de convection à l'extérieur de l'habitat
H_{ci}	coefficient de convection à l'intérieur de l'habitat
ΔT	différence de température
E_{tc}^j	émittance totale C.L.O de la paroi j
q_{ij}	flux incident sur j
q_{oj}	émittance totale de la paroi j
A_k	aire de k
M_j^o	émittance propre de j
F_{jk}	facteur de forme entre deux parois j et k
H_{rc}^j	coefficient d'échange radiatif G.L.O
k	conductivité thermique du matériau
q_k	flux net échangé sur k
C_j	émittance propre de j
H_{kj}	coefficient d'échange radiatif G.L.O entre deux surface k et j
CF, Ne	nébulosité du ciel
$I(i, \gamma, CF)$	flux direct sur une d'inclinaison i et par ciel de nébulosité CF
D_h	flux direct sur une surface horizontale
$D(i)$	flux direct sur une surface d'inclinaison i
G	flux global
G_h	flux global sur une surface horizontale
al	albédo du sol
I_h	flux direct sur une surface horizontale
L_v	chaleur latente de vaporisation
W	teneur en eau du matériau
D_w	coefficient de diffusion relatif à la vapeur d'eau
D_t	coefficient de diffusion relatif à la température
T	température
L	longueur caractéristique
k_l	coefficient de transfert thermique
Δr	pas d'espace radial dans la discrétisation
Δt	pas de temps dans la discrétisation
n, n_1	indice de repérage du temps dans la discrétisation
T_{ij}	température au noeud i, j du maillage
q_{eij}	flux incident sur j

Nomenclature

ABREVIATIONS

Rayonnement Grande Longueur d'Onde	R.G.L.O
Rayonnement Courte Longueur d'Onde	R.C.L.O
Nord-Est	NE
Sud-Ouest	SO

NOMBRES ADIMENSIONNELS

NUSSELT (Nu)	$h_c \cdot d / \lambda$
PRANDTL (Pr)	ν / a
SHERWOOD (Sh)	$H_m \cdot d / (\rho^2 \cdot D)$
LEWIS (Le)	D / a
SCHMIDT (Sc)	ν / D
GRASHOFF (Gr)	$g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot d^3 / \nu^2$

LETTRES GRECQUES

SYMBOLE

OBJET ou DESIGNATION

α	coefficient d'absorption
β	coefficient de dilatation
λ	conductivité thermique
θ	angle ; second axe du maillage
ε	émissivité
ρ	coefficient de réflexion ; masse volumique
ρ_a	masse volumique de l'air
ε_{ci}	émissivité du ciel
Q_i	flux incident sur une paroi quelconque
Q_{\pm}	flux net échangé par R.G.L.O à l'extérieur
ϕ_p	flux convectif plancher-air intérieur
ϕ_{cond}	flux conductif à travers la paroi
ϕ_{conv}	flux convectif paroi-fluide
Φ_{rc}	flux radiatif G.L.O
σ	constante de STEFAN-BOLTZMANN
θ_k	température de la paroi k en °C
ν	viscosité
ϕ_f	déperdition à travers les ouvrants
θ	axe angulaire
ε'	tau de vapeur d'eau dans le matériau
$\Delta\theta$	pas de discrétisation suivant θ
γ	azimut de la paroi
θ_z	angle zénithal
ϕ_t	déperdition à travers le plancher
λ_t	conductivité du sol
ϕ_r	déperdition par renouvellement d'air
δ_{ij}	delta de KRONECKER

	<i>PAGE</i>
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I ETUDE DU CLIMAT IVOIRIEN	6
I.1 INTRODUCTION	6
I.2 LES DIFFERENTES ZONES CLIMATIQUES	6
I.2.1 la zone climatique sud	6
I.2.2 la zone climatique centre	6
I.2.3 la zone climatique nord	7
I.3 CONCLUSION	7
II ARCHITECTURE ET CONFORT EN COTE D'IVOIRE	8
II.1 INTRODUCTION	8
II.2 ARCHITECTURE TRADITIONNELLE	8
II.2.1 présentation générale	8
II.2.2 confort dans les maisons traditionnelles	14
II.3 ARCHITECTURE COLONIALE	14
II.3.1 présentation générale	15
II.3.2 confort dans les maisons coloniales	16
II.4 ARCHITECTURE MODERNE	17
II.4.1 présentation générale	17
II.4.2 confort dans les maisons modernes	21
a) les constructions économiques	21
b) les villas de standing	21
c) les immeubles de bureaux	21

Sommaire

II.5 CONCLUSION	22
III ETAT DES TRAVAUX SUR L'HABITAT	23
III.1 INTRODUCTION	23
III.2 AMÉLIORATION DU CONFORT THERMIQUE DES MAISONS TRADITIONNELLES	24
III.3 BIOCLIMATISATION DES MAISONS MODERNES	26
III.4 VERS UNE NOUVELLE ARCHITECTURE	27
IV CONCLUSION	27

CHAPITRE II

ANALYSE DES RESULTATS EXPÉRIMENTAUX

I INTRODUCTION	29
II DESCRIPTION DE L'HABITAT	29
II.1 LE SITE	29
II.2 LA BRIQUETTE EN GÉOBÉTON	30
II.3 DIMENSIONS DE L'HABITAT	31
II.3.1 description de l'habitat	31
II.3.2 caractéristiques de l'habitat	32
III MESURES	32
III.1 PERIODES DE MESURES	32
III.2 METROLOGIE	33
III.3 EMPLACEMENT DES THERMOCOUPLES	34

IV ANALYSE DES RESULTATS	36
V ETUDE DU CONFORT DANS L'HABITAT	44
V.1 UTILISATION DE LA TEMPÉRATURE D'AIR	44
V.2 UTILISATION DE LA ZONE DE CONFORT	45
V.3 UTILISATION DE L'INDICE DE CONFORT	47
VI CONCLUSION	48

<p style="text-align: center;">CHAPITRE III</p> <p style="text-align: center;">ETUDE THEORIQUE</p>
--

I INTRODUCTION	51
II REPERE	52
III MODELISATION MATHEMATIQUE	53
III.1 ETUDE DE LA CONDUCTION	54
III.1.1 position du problème et hypothèses	54
a) définition	54
b) densité de flux conductif	54
c) hypothèses	54
III.1.2 écriture du flux conductif	55
a) flux conductif	55
b) équation de diffusion	55
c) remarques	55

III.2 COUPLAGE TRANSFERT DE CHALEUR-TRANSFERT DE MASSE	56
III.2.1 étude unidimensionnelle	58
III.2.2 étude bidimensionnelle	59
III.3 ETUDE DU FLUX CONVECTIF	60
III.3.1 position du problème et hypothèses	60
III.3.2 écriture du flux convectif	60
a) définition et généralités	60
b) écriture du flux convectif	61
III.3.3 coefficients d'échange convectif	61
a) généralités	61
b) coefficient d'échange convectif avec l'extérieur	62
c) coefficient d'échange convectif avec l'intérieur	63
III.4 ETUDE DU RAYONNEMENT SOLAIRE	65
III.4.1 expression du flux direct	65
III.4.2 expression du flux diffus	67
III.4.3 expression du flux global	68
III.4.4 remarque	68
III.5 ETUDE DES ECHANGES RADIATIFS	68
III.5.1 position du problème et hypothèses	68
III.5.2 matrice de facteur de forme	69
III.5.3 échange par rayonnement avec l'extérieur	70
a) flux net échangé par R.G.L.O	70
<i>a-1 coefficient d'échange par R.G.L.O</i>	71
<i>a-2 expression de l'émissivité du ciel</i>	72
b) flux net échangé par R.C.L.O	73
III.5.4 échange par rayonnement avec l'intérieur	74
a) flux net échangé par R.G.L.O	74
<i>a-1 émittance totale de la paroi(j)</i>	74
<i>a-2 flux net échangé sur une paroi(k)</i>	74

Sommaire

<i>a-3 linéarisation de q^k</i>	76
<i>a-4 coefficient d'échange par R.G.L.O</i>	76
b) flux net échangé par R.C.L.O	77
<i>b-1 étude du flux direct</i>	79
<i>b-2 étude du flux diffus</i>	79
<i>b-3 étude du couplage flux direct-flux diffus</i>	80
<i>b-3-1 emittance totale diffuse</i>	80
<i>b-3-2 densité de flux net échangé par R.C.L.O.</i>	82
III.6 EQUATIONS DE CONDITION AUX LIMITES	82
III.6.1 cas de la toiture	82
a) face intérieure	82
<i>a-1 détermination du coefficient de transfert de masse</i>	85
<i>a-2 écriture de la condition aux limites</i>	87
b) face extérieure	87
III.6.2 cas du mur cylindrique	88
III.7 CONDUCTION AU NIVEAU DES OUVRANTS	88
III.8 AUTRES PERTES DE CHALEUR DANS L'HABITAT	90
III.8.1 perte à travers la longueur de liaison au sol	90
III.8.2 perte par manque d'étanchéité	91
III.8.3 déperdition par renouvellement d'air	91
III.8.4 perte due à une ouverture au niveau du toit	92
III.9 ETUDE DU PLANCHER	93
III.10 ETUDE DE L'ENCEINTE DE L'HABITAT	94
III.10.1 caractéristiques de l'air	94
III.10.2 équation de l'enceinte de l'habitat	95
III.11 CONCLUSION	95
IV MODELISATIONS NUMERIQUES	96
IV.1 RESOLUTION DE L'EQUATION DE L'ENCEINTE	96
IV.1.1 principe de la méthode	96
IV.1.2 schéma de la méthode	97

IV.2 MODELISATION UNIDIMENSIONNELLE	97
IV.2.1 maillage	98
IV.2.2 modélisation de l'équation de diffusion	98
IV.2.3 résolution de l'équation de diffusion	100
IV.3 MODELISATION BIDIMENSIONNELLE	102
IV.3.1 maillage	103
IV.3.2 modélisation de l'équation de diffusion	105
IV.3.3 recherche des températures frontières	105
a) généralités	105
b) méthode de la variation de l'énergie interne	107
c) équation de condition aux limites	109
<i>c-1 équation de condition aux limites pour un noeud de</i>	
<i>l'axe $(0,r)$</i>	109
<i>c-1-1 noeud commun aux secteurs K_1 et K_2</i>	109
<i>c-1-2 noeud commun aux secteurs K_1 ET K_2</i>	110
<i>c-2 équation de condition aux limites pour un noeud de</i>	
<i>l'axe $(0,0)$</i>	110
<i>c-2-1 noeud de la frontière intérieure</i>	110
<i>c-2-2 noeud de la frontière extérieure</i>	110
<i>c-3 équation de condition aux limites pour le noeud $(0,0)$</i>	111
<i>c-4 équation de condition aux limites pour le noeud $(9,0)$</i>	111
<i>c-5 équation de condition aux limites pour le noeud $(0,9)$</i>	111
<i>c-6 équation de condition aux limites pour le noeud $(9,9)$</i>	111
V CONCLUSION	112

<p style="text-align: center;">CHAPITRE IV</p> <p style="text-align: center;">VALIDATION ET EXPLOITATION</p>
--

I INTRODUCTION	114
II VALIDATION	114
II.1 DETERMINATION DES TEMPERATURES THEORIQUES	114
II.1.1 modèle unidimensionnel	114
II.1.2 modèle bidimensionnel	117
II.2 COURBES THEORIQUES	119
II.3 VALIDATION	123
II.3.1 cas du modèle unidimensionnel	123
II.3.2 cas du modèle bidimensionnel	136
II.3.3 conclusion	150
II.4 COMPARAISON MODELES UNIDIMENSIONNEL ET BIDIMENSIONNEL	151
II.5 CONCLUSION	153
III EXPLOITATION DU LOGICIEL	154
III.1 ETUDE ENERGETIQUE	154
III.2 EFFET D'UNE ORIFICE AU NIVEAU DU TOIT	161
III.3 EFFET DE LA NATURE DE DIVERS MATERIAUX	164
III.3.1 effet de la nature du matériau de la toiture	165
III.3.2 effet de la nature du matériau du mur	171
III.3.3 conclusion	171

IV CONCLUSION PARTIELLE	172
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	174
A. CONCLUSION GÉNÉRALE	175
B. PERSPECTIVES	177
BIBLIOGRAPHIE	178
ANNEXES	
1: coordonnés solaires	I
2: détermination de la matrice de facteur de forme	V

LISTE DES SCHEMAS

	<i>page</i>
1: photographie de l'habitat	31

LISTE DES TABLEAUX

1: paramètres climatiques des mois de septembre et d'octobre	7
2.1: dimension de la brique en géobéton	30
2.2: dimension de l'habitat et des ouvrants	32
2.3: période de mesure	33
2.5.a: températures moyennes journalières	45
2.5.b: températures et vitesses moyennes journalières	46
2.6: variation de l'indice E.C.I.	47
2.7: sensation de confort dans l'habitat	48
3.1: valeurs des coefficients A_p , B_p , n_i	64
3.2: conductivité thermique et conductance au niveau des ouvrants	90
3.3: identification des frontières d'un secteur angulaire par les indices	109
4.1: effet de la vitesse d'air sur le confort	163
4.2: simulation de la case ronde en fonction du matériau	164
4.3: caractéristiques thermophysiques des matériaux utilisés	165

LISTE DES FIGURES

1.1: schéma des relations entre la conception architecturale et les facteurs externes	9
1.2: typologie de l'habitat ivoirien	10
1.3.a: architecture du sud	11
1.3.b: architecture du centre	12
1.3.c: architecture du nord	13
1.4.a: maison coloniale (Grand Bassam)	15
1.4.b: palais du gouverneur(Grand Bassam)	16
1.5.a: logement économique en bande	18
1.5.b: logement économique	19
1.5.c: plan de villa standard en Côte d'Ivoire	20
1.6.a: heat gain prevention	25
1.6.b: heat loss enhancement	26
1.7: la toiture diode en tant qu'améliorant, à faible coût, d'un dispositif de toiture répandu en Afrique	26
2.1: schéma du circuit d'acquisition de mesure	34
2.2.a: noeuds de mesure sur une coupe verticale de l'habitat	35
2.2.b: noeuds de mesure sur une coupe horizontale de l'habitat à 122cm du sol	35
2.3: comparaison de l'évolution des températures internes et externes	
a: données du 23/09/88	37
b: données du 26/09/88	37
c: données du 8-9/10/88	38
2.4 évolution temporelle du gradient vertical	
a: mesures diurnes	39
b: mesures nocturnes	39

Liste

2.5.a.1: évolution temporelle des températures des faces internes des parois du toit de l'habitat (23/09/88)	41
2.5.a.2: évolution temporelle des températures des faces internes des parois du mur de l'habitat (23/09/88)	41
2.5.b.1: évolution temporelle des températures des faces internes des parois du toit de l'habitat (26/09/88)	42
2.5.b.2: évolution temporelle des températures des faces internes des parois du mur de l'habitat (26/09/88)	42
2.5.c.1: évolution temporelle des températures des faces internes des parois du toit de l'habitat (8-9/10/88)	43
2.5.c.2: évolution temporelle des températures des faces internes des parois du mur de l'habitat (8-9/10/88)	43
2.6: zone de confort	45
3.1: schéma du principe de relation entre «données», «procédure de résolution», et «résultats»	51
3.2: repère cylindrique	53
3.3: habitat sous investigation	53
3.4: triangle sphérique	67
3.5: définition géométrique du facteur de forme	69
3.6: définition mathématique du facteur de forme	69
3.7: schématisation des différents échanges radiatifs	78
3.8 flux incident par unité de surface sur une paroi "j"	80
3.9: schématisation du phénomène de transfert de masse	85
3.10: fonction d'influence d'un simple vitrage	89
3.11: délimitation des zones pour l'étude de la conduction du plancher	93
3.12: maillage sur une coupe horizontale de la case ronde	98
3.13: coupe horizontale de l'habitat: maillage unidimensionnel du secteur angulaire K	99
3.14: coupe horizontale de l'habitat: maillage bidimensionnel du	

secteur angulaire K	103
3.15: schématisation des différentes surfaces sur lesquelles les conditions aux limites peuvent exister	106
3.16: représentation d'un élément de volume interne au maillage	107
3.17: schématisation des différents éléments de volume à la frontière du maillage	108
4.1.a: évolution temporelle de la température interne de l'habitat (simulation unidimensionnelle; journée du 23/09/88)	120
4.1.b: évolution temporelle de la température interne de l'habitat (simulation unidimensionnelle; journée du 26/09/88)	120
4.1.c: évolution temporelle de la température interne de l'habitat (simulation unidimensionnelle; journée du 8-9/10/88)	121
4.2.a: évolution temporelle de la température interne de l'habitat (simulation bidimensionnelle; journée du 23/09/88)	121
4.2.b: évolution temporelle de la température interne de l'habitat (simulation bidimensionnelle; journée du 26/09/88)	122
4.2.c: évolution temporelle de la température interne de l'habitat (simulation bidimensionnelle; journée du 8-9/10/88)	122
4.3: comparaison courbes théorique et expérimentale (étude unidimensionnelle)	
a: journée du 23/09/88	
1: côté interne NE du toit	124
2: côté externe NE du toit	124
3: côté interne SO du toit	125
4: côté externe SO du toit	125
5: côté interne SO du mur	126
6: côté externe SO du mur	126
7: côté interne NE du mur	127
8: température interne de l'habitat	127

Liste

4.3: comparaison courbes théorique et expérimentale

(étude unidimensionnelle)

b: journée du 26/09/88

1: côté interne NE du toit	128
2: côté externe NE du toit	128
3: côté interne SO du toit	129
4: côté externe SO du toit	129
5: côté interne SO du mur	130
6: côté externe SO du mur	130
7: côté interne NE du mur	131
8: température interne de l'habitat	131

4.3: comparaison courbes théorique et expérimentale

(étude unidimensionnelle)

c: journée du 8-9/10/88

1: côté interne NE du toit	132
2: côté externe NE du toit	132
3: côté interne SO du toit	133
4: côté externe SO du toit	133
5: côté interne SO du mur	134
6: côté externe SO du mur	134
7: côté interne NE du mur	135
8: température interne de l'habitat	135

4.4: comparaison courbes théorique et expérimentale

(étude bidimensionnelle)

a: journée du 23/09/88

1: côté interne SO du toit	137
2: côté externe SO du toit	137
3: côté interne NE du toit	138
4: côté externe NE du toit	138
5: côté interne SO du mur	139

Liste

6: côté externe SO du mur	139
7: côté interne NE du mur	140
8: température interne de l'habitat	140
9: température du plancher	141
4.4: comparaison courbes théorique et expérimentale (étude bidimensionnelle)	
b: journée du 26/09/88	
1: côté interne SO du toit	141
2: côté externe SO du toit	142
3: côté interne NE du toit	142
4: côté externe NE du toit	143
5: côté interne SO du mur	143
6: côté externe SO du mur	144
7: côté interne NE du mur	144
8: température interne de l'habitat	145
9: température du plancher	145
4.4: comparaison courbes théorique et expérimentale (étude bidimensionnelle)	
c: journée du 8-9/10/88	
1: côté interne SO du toit	146
2: côté externe SO du toit	146
3: côté interne NE du toit	147
4: côté externe NE du toit	147
5: côté interne SO du mur	148
6: côté externe SO du mur	148
7: côté interne NE du mur	149
8: température interne de l'habitat	149
9: température du plancher	150
4.5: comparaison des températures bidimensionnelle et monodimensionnelle	

a: journée du 23/09/88	152
b: journée du 26/09/88	152
c: journée du 8-9/10/88	153
4.6.a: étude comparative des différents flux sur le côté SO du toit	157
4.6.b: étude comparative des différents flux sur le côté NE du toit	157
4.6.c: étude comparative des différents flux sur le côté SO du mur	158
4.6.d: étude comparative des différents flux sur le côté NE du mur	158
4.7.a: étude comparative des flux radiatifs sur le côté NE de l'habitat	159
4.7.b: étude comparative des flux radiatifs sur le côté SO de l'habitat	159
4.8.a: étude comparative des flux convectifs sur le côté SO de l'habitat	160
4.8.b: étude comparative des flux convectifs sur le côté NE de l'habitat	160
4.9: évolution de la reponse thermique en fonction des dimensions de l'ouverture	
a: journée du 23/09/88	161
b: journée du 26/09/88	162
c: journée du 8-9/10/88	162
4.10: effet de la vitesse d'air sur la sensation de confort	163
4.11: évolution de la reponse thermique de l'habitat en fonction des matériaux (géobéton et matériaux modernes)	
a: journée du 23/09/88	168
b: journée du 26/09/88	168
c: journée du 8-9/10/88	169
4.12: évolution de la reponse thermique de l'habitat en fonction des matériaux locaux (géobéton, paille comprimée, bois, tuile)	
a: journée du 23/09/88	169
b: journée du 26/09/88	170
c: journée du 8-9/10/88	170
4.13: évolution de la température interne en fonction de la nature du matériau du mur	172

Dans les pays à climat tropical humide, la température et l'humidité sont les principales sources d'inconfort dans l'habitat.

Au cours du temps, les habitants de ces régions à climat humide ont réussi progressivement à maîtriser ces conditions climatiques difficiles en constituant une architecture traditionnelle adaptée.

La toiture faite en paille ou en banco (terre battue) suivant les régions et l'enveloppe en banco de ces maisons traditionnelles jouent un rôle important dans le confort thermique de deux façon:

- la toiture réduit de façon considérable la pénétration du rayonnement solaire direct par conduction vers l'intérieur.
- l'enveloppe empêche le réchauffement excessif de l'ambiance intérieure.

Cependant, le brassage culturel a entraîné progressivement l'abandon des modèles architecturaux traditionnels au profit des modèles architecturaux occidentaux dans les centre urbains: cela a eu pour conséquence la coexistence de deux genres architecturaux: architecture traditionnelle dans les campagnes et architecture moderne dans les centres urbains

L'urbanisation croissante de nos pays, l'inadaptation des modèles architecturaux occidentaux, l'affaiblissement du pouvoir d'achat de la population, imposent une étude du confort thermique pour ces habitats en construction.

Cette étude de confort devra tenir compte:

- ♦ Premièrement, de la ventilation naturelle des locaux pour des raisons économiques; l'objectif recherché est d'obtenir une ambiance confortable sans usage de systèmes de conditionnement d'air actif.

♦ Deuxièmement, eu égard à la bonne adaptation des matériaux locaux aux conditions climatiques et aux coûts élevés des matériaux dits modernes, il est nécessaire sinon primordiale d'intégrer les matériaux locaux dans les habitats modernes.

La prise en compte de ces matériaux locaux nécessite une étude scientifique approfondie pour maîtriser leur réponse thermique lorsqu'ils sont soumis à différentes sollicitations climatiques.

Dans cette optique, une étude expérimentale est effectuée in situ dans une case ronde toute en géobéton. C'est un type d'habitats traditionnels.

Dans une deuxième étude, nous faisons l'analyse des résultats expérimentaux. Nous avons, lors de cette étude, constaté un inconfort thermique de la case ronde. Pour solutionner ce problème à moindre coût et dans un délai raisonnable, nous avons opté pour la simulation numérique.

Après la mise au point et la validation des modèles, nous avons utilisé le meilleur modèle pour résoudre le problème de l'inconfort thermique.

Pour ce faire, ce travail se compose comme suit:

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique.

Nous traitons du climat ivoirien. Nous présentons les différents types d'habitats rencontrés en Côte d'Ivoire et différentes études déjà menées sur ce sujet.

Le second chapitre porte sur l'analyse des résultats expérimentaux.

Nous donnons la description du prototype construit et la métrologie adoptée.

Nous faisons une analyse critique des résultats obtenus par l'étude expérimentale de la case en géobéton et une étude du confort de cet habitat.

Le troisième chapitre est une étude théorique. Il renferme la modélisation mathématique et numérique.

Nous faisons une étude des transferts de chaleur en vue d'aboutir aux équations permettant la modélisation de l'habitat.

Nous résolvons ces équations par des méthodes numériques unidimensionnelle et bidimensionnelle.

Le dernier chapitre porte sur la validation et l'exploitation du logiciel de simulation numérique.

Nous validons les modèles unidimensionnel et bidimensionnel avec les résultats expérimentaux.

Nous faisons une étude comparative des deux modèles afin de déterminer le meilleur logiciel de simulation numérique.

Nous appliquons le logiciel à la recherche d'un habitat d'ambiance confortable.

Nous terminerons par une conclusion générale débouchant sur les perspectives que les études présentes permettent d'entrevoir.

CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. ETUDE DU CLIMAT IVOIRIEN

I.1 INTRODUCTION

Dans le temps et dans l'espace, la répartition des pluies est dominée par l'oscillation du Front Intertropical de convergence (F.I.T) et par la mousson de l'Ouest africain.

Le F.I.T se définit comme la frontière entre l'air maritime humide des régions équatoriales caractérisé par des vents de secteur Sud-Ouest (mousson) et l'air continental sec saharien, caractérisé par des vents de secteur Nord-Est.

Son déplacement en latitude au cours de l'année conditionne par conséquent les saisons. Il en résulte globalement trois grandes zones climatiques.

I.2 LES DIFFÉRENTES ZONES CLIMATIQUES

I.2.1 LA ZONE CLIMATIQUE SUD

Elle se caractérise par quatre saisons:

- ◆ la grande saison sèche (décembre à mars).
- ◆ la grande saison des pluies (avril à mi-juillet) caractérisée par des averses orageuses de mars à début mai, puis par des pluies de mousson le reste de la saison.
- ◆ la petite saison sèche (mi-juillet à mi-septembre).
- ◆ la petite saison des pluies (mi-septembre à mi-novembre) caractérisée par des orages.

I.2.2 LA ZONE CLIMATIQUE CENTRE

Elle se caractérise aussi par quatre saisons:

- la grande saison sèche (novembre à mi-mars) caractérisée par une brume sèche presque permanente (harmattan) de décembre à février.

- la grande saison des pluies (mi-mars à mi-juillet) marquée, en pleine saison, par des passages fréquents de lignes de grains, avec des orages et des averses suivis de poussée de mousson avec pluies continues, faibles et modérées.
- l'inter-saison orageuse (mi-juillet à mi août) marquée par une baisse quantitative des précipitations hormis les régions montagneuses.
- la petite saison des pluies (mi-août à fin octobre).

I.2.3 LA ZONE CLIMATIQUE NORD

Elle se caractérise par deux saisons distinctes:

- ◊ la grande saison sèche (novembre à mi-avril) caractérisée par la permanence de la brume sèche et l'absence quasi totale des précipitations.
- ◊ la saison des pluies (avril à octobre) avec le maximum de précipitation en août -septembre où l'on a des orages quasi journaliers (en soirée et nuit) et des passages fréquents de lignes de grains donnant des pluies abondantes.

Après l'étude du climat ivoirien, nous donnons les paramètres climatiques des jours de mesures (tableau.1).

TABLEAU 1: paramètres climatiques des mois de Septembre et d'Octobre

MOIS	TEMPERATURE MAXIMALE ABSOLUE A L'OMBRE	TEMPS	MOYENNE MENSUELLE D'HUMIDITE RELATIVE
Septembre 1988	30,5 °C	très nuageux	98,9% maxima 77,1% minima
Octobre 1988	31,5 °C	très nuageux	96,5% maxima 71,3% minima

I.3 CONCLUSION

La connaissance des données climatiques sur l'ensemble du territoire ivoirien, nous permettra de faire une étude de la conception bioclimatique acceptable et fiable.

Au niveau de la toiture les matériaux utilisés sont le palmier, la paille, la terre sur ossature en bois tandis que ceux du mur sont le bambou, le banco avec ossature en bois et le banco plein.

Les figures 1.3 a-c représentent quelques types de maisons traditionnelles suivant les régions {3}.

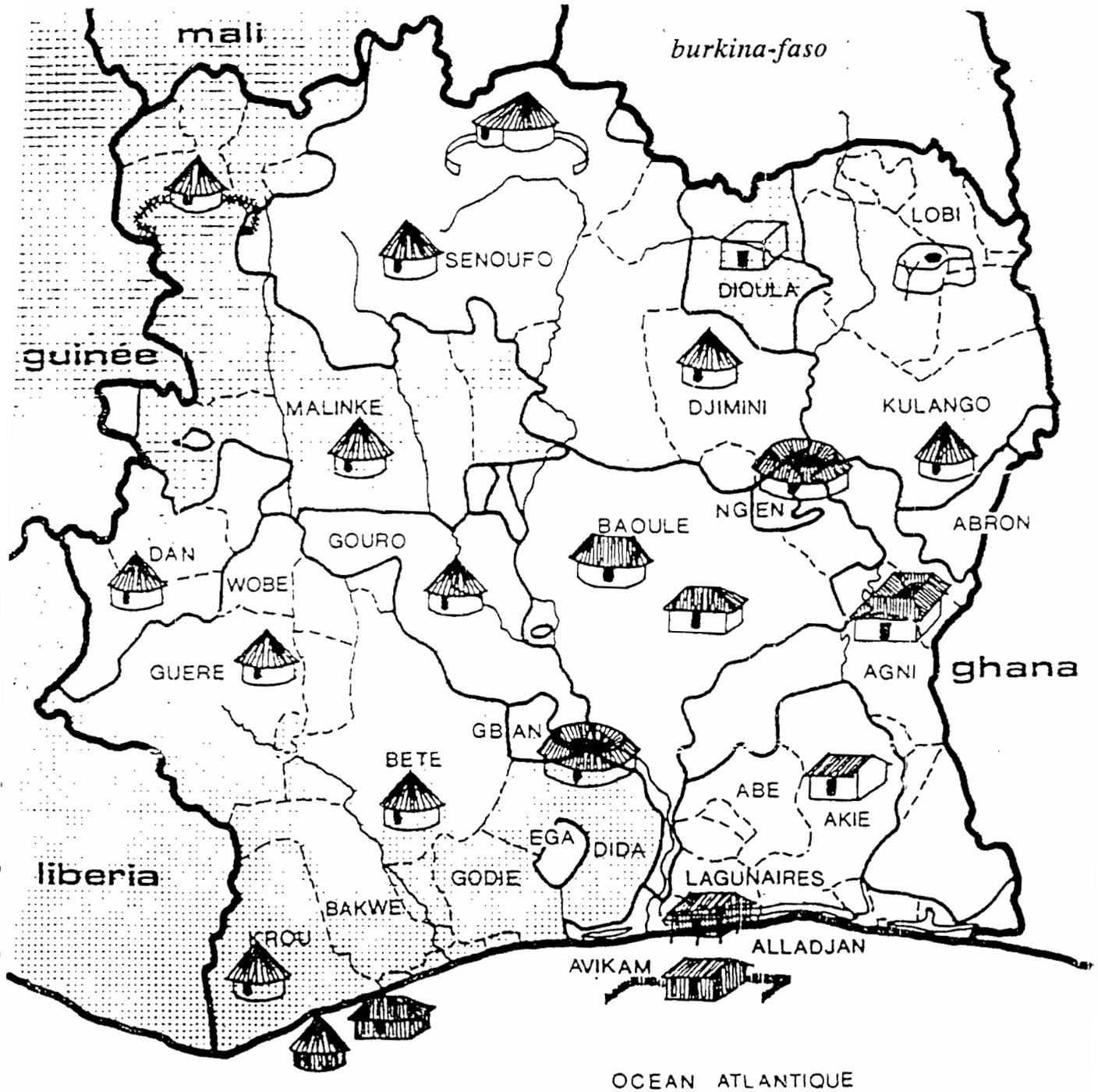


FIGURE.1.2: Typologie de l'Habitat Ivoirien {3}

Toit : en palmier
Murs : en Bambou
Inertie thermique : faible
Ventilation : maximum

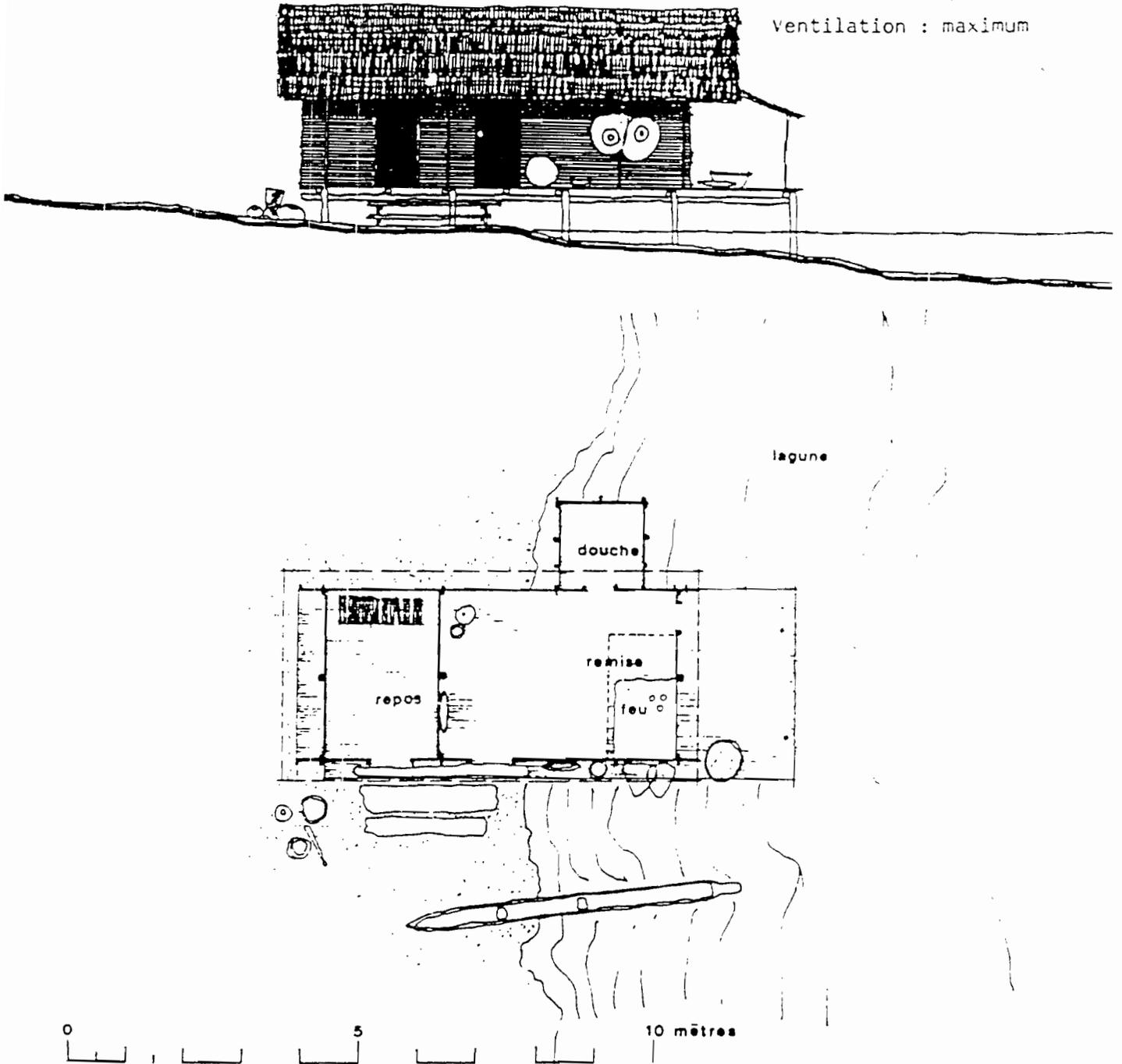
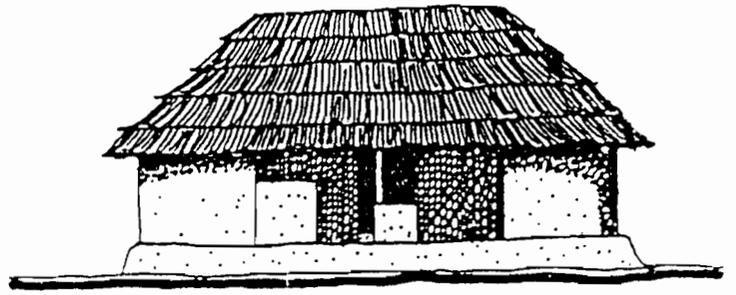


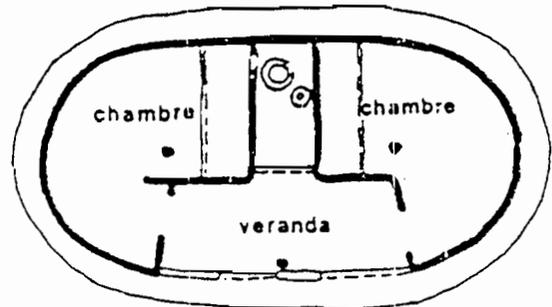
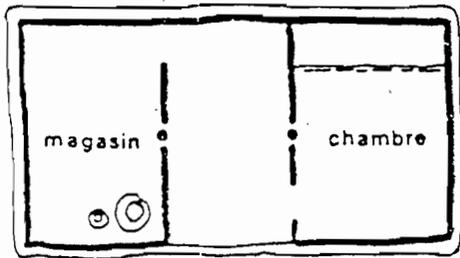
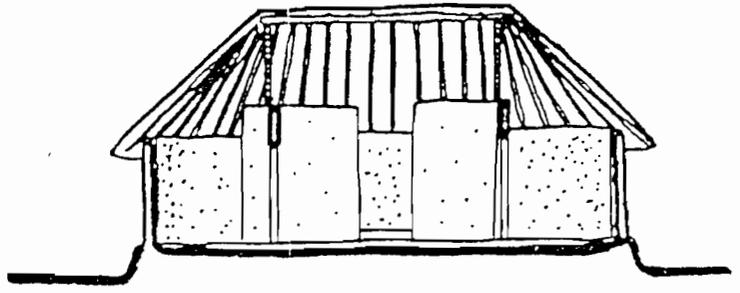
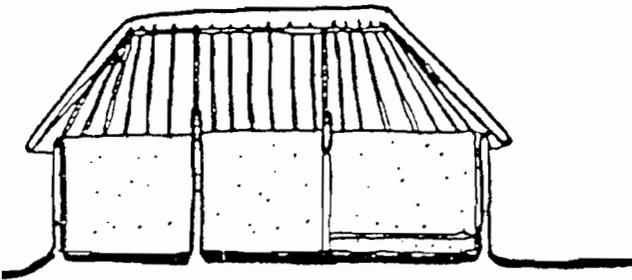
FIGURE.1.3.a: Architecture du Sud



yasua sua



bla sua



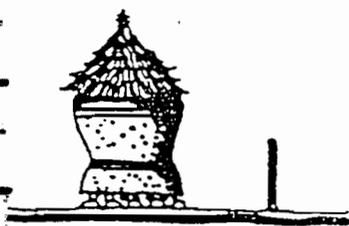
Architecture du Centre :

Toit : en paille

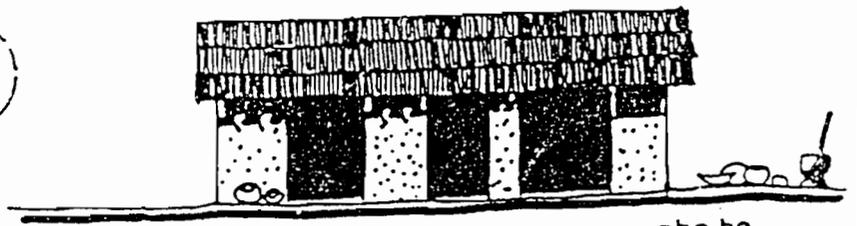
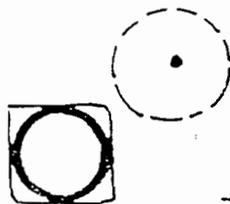
Murs : en banco avec ossature en bois

Inertie thermique : moyenne

Ventilation : moyenne

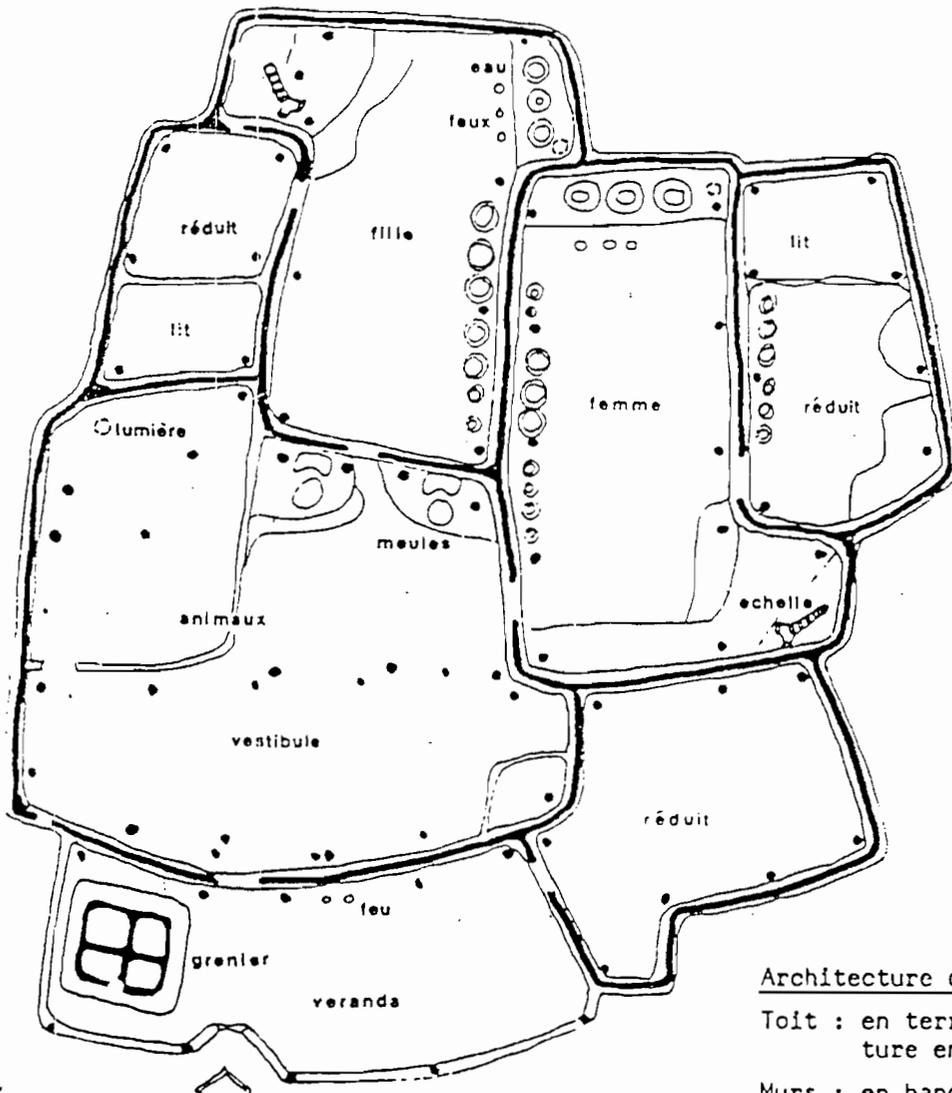
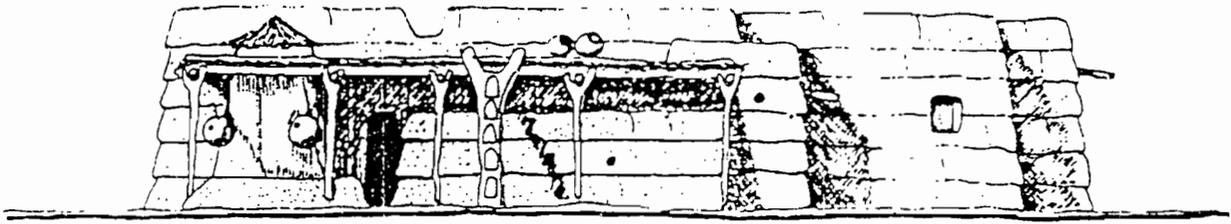


tangani



gbo bo

FIGURE.1.3.b: Architecture du centre



Architecture du Nord

Toit : en terre sur ossature en bois

Murs : en banco plein

Inertie thermique : maximum

Ventilation : faible

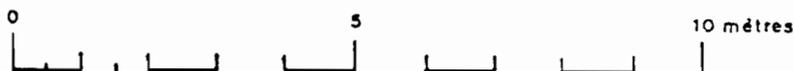


FIGURE.1.3.c: Architecture du Nord

II.2.2 CONFORT DANS LES MAISONS TRADITIONNELLES

Depuis l'abri minimum des campements isolés jusqu'aux maisons en terre des premières agglomérations en passant par les maisons en bois sur pilotis, l'amélioration du confort climatique de l'habitat a été et demeure encore basée sur la ventilation naturelle des locaux et l'isolation thermique par des matériaux naturels tels que le bois et la terre.

Ainsi l'éclatement des fonctions de logements dans l'espace permet la ventilation transversale de chaque local. Les ouvertures dans les parois sont fonctions du besoin de ventilation. C'est pourquoi, dans les zones côtières où l'humidité est la plus forte et où la ventilation maximum est nécessaire, les parois en bambous sont relativement ajourées; par contre, au fur et à mesure qu'on monte à l'intérieur des terres, les ouvertures se rétrécissent et les murs en banco se font de plus en plus épais, pour retarder le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur des maisons; ceci permet la protection contre la chaleur diurne et contre la fraîcheur nocturne dans les zones chaudes et sèches.

Nous pouvons donc affirmer que l'architecture traditionnelle est adaptée au climat tropical, par sa conception et ses matériaux.

Les habitants de ces zones peuvent se rendre compte du degré de confort des maisons traditionnelles durant toute la journée et toute l'année.

II.3 ARCHITECTURE COLONIALE

II.3.1 PRESENTATION GENERALE

L'architecture coloniale est un héritage des anciens colons français qui ont essayé d'appliquer la technologie occidentale pour construire des maisons adaptées au climat local.

En effet, avec la colonisation, c'est l'introduction des matériaux modernes produits industriels, dans la construction sous nos tropiques.

Ces matériaux nouveaux que sont le béton, le métal et le verre arrivaient par bateau sur les côtes, pour édifier les bâtiments administratifs et les résidences des nouveaux maîtres. Ces colonisateurs arrivaient avec une autre culture et une autre architecture qu'il fallait adapter au climat local. En d'autre terme, il fallait « tropicaliser » l'architecture européenne de l'époque.

L'architecture coloniale n'a gardé qu'une apparence européenne, par ses façades classiques et ses matériaux importés; car la distribution des fonctions à l'intérieur de la maison avait changé pour les besoins de la ventilation naturelle de locaux.

A cette époque, la climatisation était inexistante ou rare; il fallait donc adapter les moyens traditionnels de conditionnement d'air: la ventilation naturelle et l'isolation thermique.

Les figures. 1.4.a-b donnent quelques types de maisons coloniales{3}.

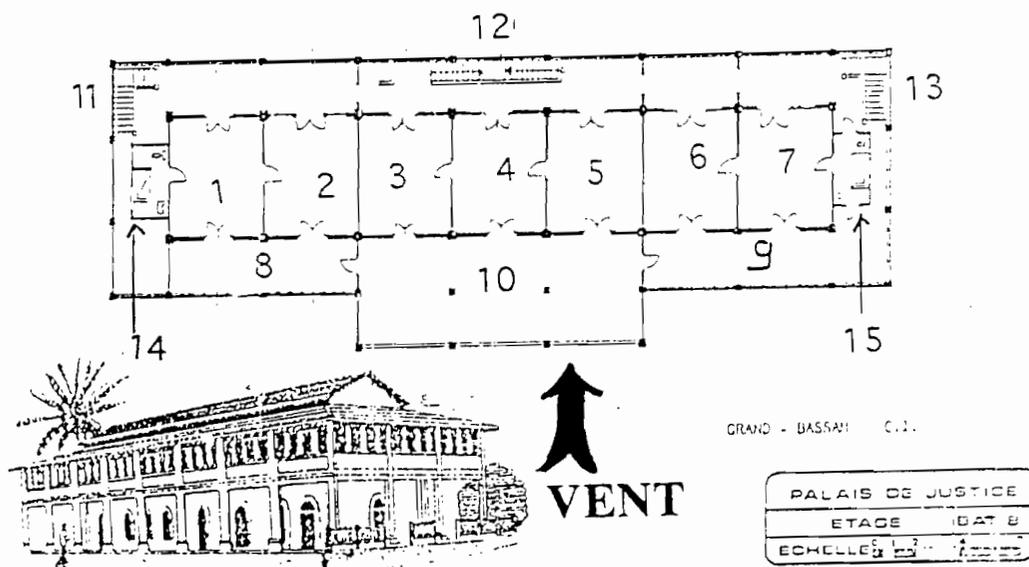


FIGURE. 1.4.a: Maison coloniale(Grand-Bassam)

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 : Chambre; 8,9: Balcon; 10: Véranda;

11, 12, 13: Escaliers; 14, 15: Salles d'eau

que les matériaux modernes (béton, métal, verre) sont de mauvais isolants thermiques; d'où la nécessité de les protéger contre l'échauffement, quelque soit le système de climatisation choisi pour une meilleure efficacité à moindre coût.

Par ailleurs, chaque pièce principale (chambre ou séjour) était d'une seule épaisseur, traversée par un courant d'air permanent.

Pour améliorer la sensation de confort, un ventilateur électrique suspendu au plafond brassait l'air de la pièce. On assistait à une combinaison de deux systèmes de ventilation: l'un naturel, l'autre mécanique pour le confort de la maison coloniale où il faisait bon vivre {3}.

II.4 ARCHITECTURE MODERNE

II.4.1 PRESENTATION GENERALE

L'avènement des indépendances a été accompagné par la consécration des matériaux importés (béton, métal, verre), au détriment des matériaux locaux (bois, terre), par l'intermédiaire du jeu commercial en faveur des premiers, les rendant compétitifs souvent, et par les interdits officiels sur les seconds, les dévaluant aux yeux des populations, même démunies.

Ce paradoxe politique et économique est doublé d'une politique architecturale qui ne tient plus compte de la nature et des conditions climatiques locales.

Les figures.1.5.a-c {3} donnent le plan de quelques types de maisons modernes à savoir économiques et villas standing

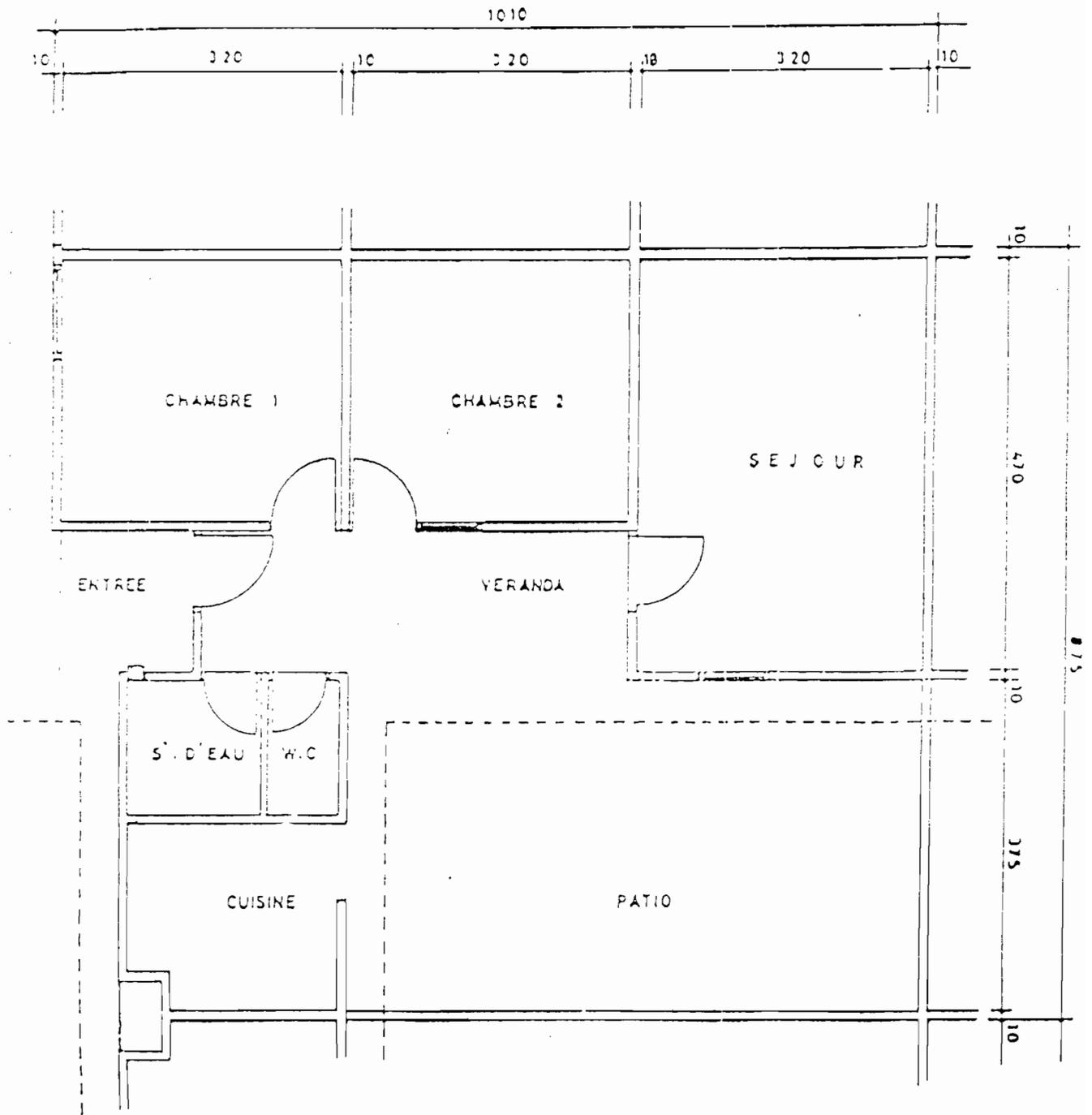


FIGURE.1.5.a: Logement économique en bande

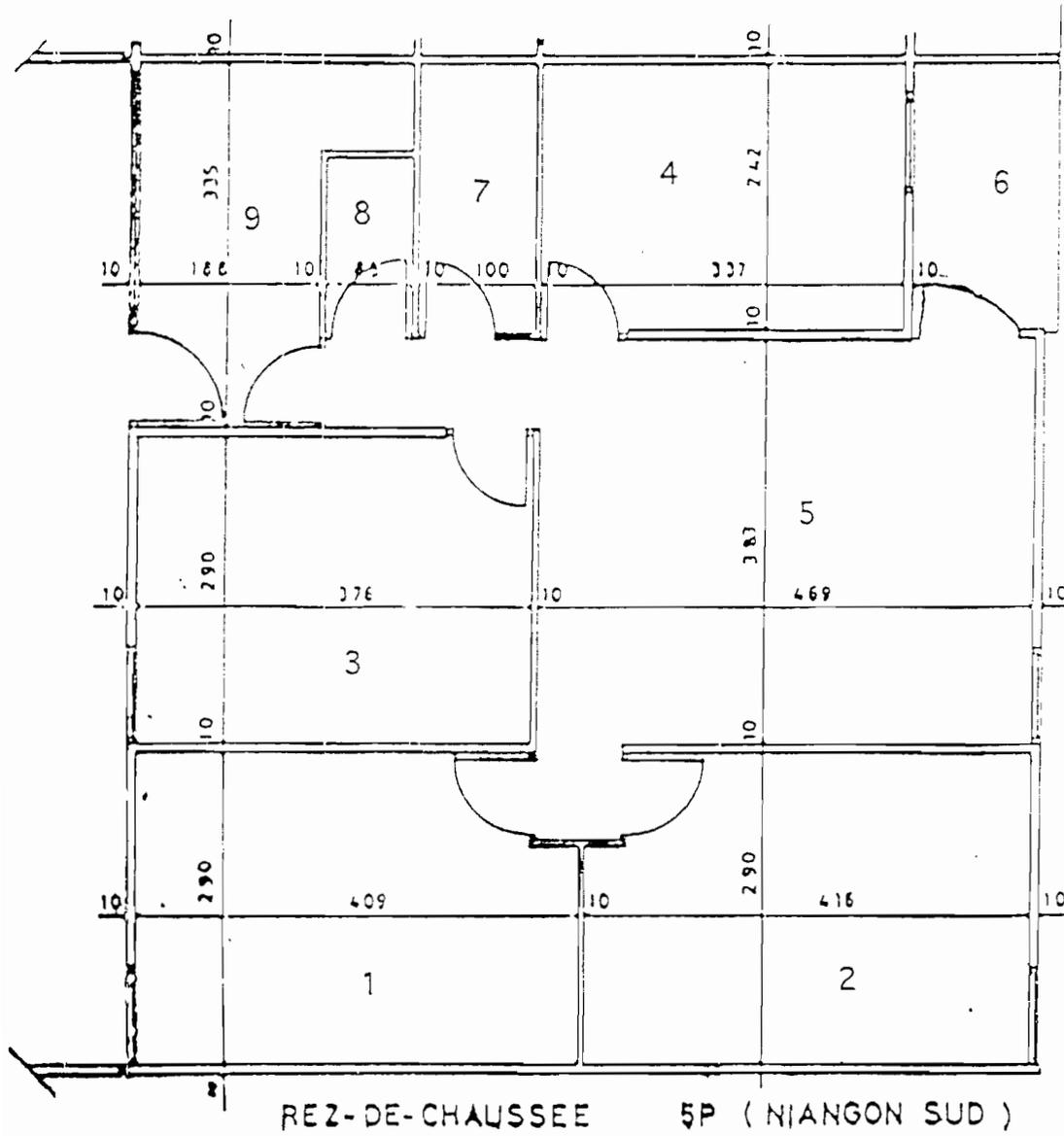


FIGURE.1.5.b: Logement économique

1, 2, 3, 4: Chambre; 5: Séjour; 6: Véranda; 7: Salle d'eau; 8: WC; 9: Cuisine

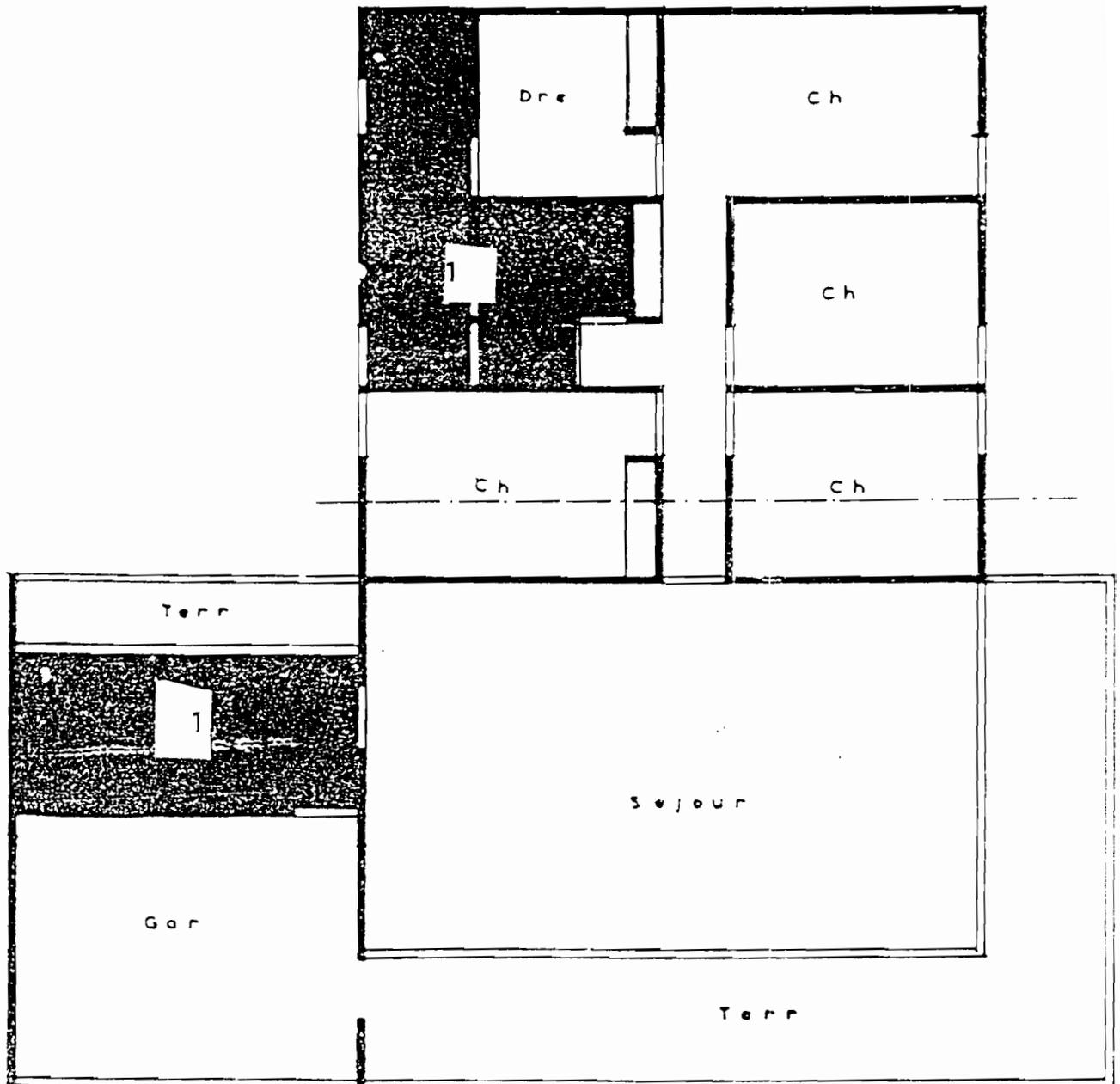


FIGURE.1.5.c: Plan de villa standard en Côte d'Ivoire

Dre: Dressing; Terr: Terrasse; ch: Chambre; Gar: Garrage; 1: Salle d'eau

II.4.2 CONFORT DANS LES MAISONS MODERNES

a) LES CONSTRUCTIONS ECONOMIQUES

Dans ces constructions les murs sont en parpaings de ciment et le toit en bacs d'aluminium ou d'acier galvanisé, sans plafonnage généralement, pour des raisons économiques. Par conséquent, il n'y a aucune protection contre l'échauffement des locaux si bien qu'ils deviennent intenable dès les premiers rayons de soleil.

De plus les ouvertures sont si étroites et si mal disposées que la ventilation des locaux est difficile, sinon nulle. Dans ces conditions, même une ventilation mécanique devient inefficace.

b) LES VILLAS DE STANDING

Ces villas sont construites avec les mêmes matériaux, avec un plafonnage en bois, mais sans isolation thermique des murs extérieurs; avec davantage de cloisons et de couloirs intérieurs, avec des ouvertures vitrées.

Par conséquent ces maisons de riches sont aussi chaudes que celles des pauvres et la ventilation est rendue difficile par le vitrage et les multiples cloisons intérieures.

Pour rendre confortables ces constructions inadaptées aux conditions climatiques locales, les habitants fortunés ont recours aux moyens mécaniques chers à l'achat et en énergie: les climatiseurs centraux ou individuels.

c) LES IMMEUBLES DE BUREAUX

Le matériau dominant de ces constructions est le mur rideau en verre clair ou réfléchissant, exposé directement au soleil ou parfois timidement protégé par des brise-soleils. Même réfléchissants, ces panneaux vitrés ne peuvent empêcher la surchauffe des locaux du fait de leur transparence partielle et de leur épaisseur.

De plus ces tours de verre hermétiques nécessitent une climatisation centrale coûteuse en matière importée et en énergie. C'est ainsi qu'on a constaté que le tiers de l'énergie électrique consommée à Abidjan concernait la climatisation des locaux.

La climatisation centrale au lieu d'être un appoint est la source principale de confort; la protection solaire et la ventilation naturelle sont considérées comme inutiles.

II.5 CONCLUSION

L'architecture coloniale peut être considérée comme bioclimatique car une comparaison avec l'architecture traditionnelle souligne une démarche analogue; en effet:

- la protection solaire est assurée dans les maisons traditionnelles par la nature des matériaux locaux (bois, terre) bons isolants thermiques; dans les maisons coloniales les matériaux nouveaux (béton, métal, verre) mauvais isolants thermiques sont protégés du soleil par une galerie périphérique.

- les locaux sont d'une seule épaisseur avec des ouvertures opposées pour bénéficier d'une bonne ventilation naturelle.

L'architecture moderne est inadaptée au climat local; elle ignore les principes de base de l'architecture bioclimatique et elle est coûteuse financièrement, techniquement et énergétiquement.

L'adaptation d'un édifice est indépendante de sa forme ou de son style{3}. On peut donc se poser la question de savoir si l'on peut proposer une architecture résolument bioclimatique pour les pays tropicaux?

Pour répondre à cette question nous aborderons dans la partie suivante les études déjà effectuées dans les habitats.

III ETAT DES TRAVAUX SUR L'HABITAT

III.1 INTRODUCTION

La proposition d'une architecture résolument bioclimatique dans les pays tropicaux passe par l'adéquation entre la science et l'architecture. C'est pourquoi ROBERTO COSTA^{6}, dans son article intitulé «*Architecture in Black Africa between development and tradition*», traite une étude comparée de deux maisons traditionnelles YORUBA au NIGERIA. L'une, construite dans le strict respect de la tradition occidentale et l'autre, dans la pure tradition YORUBA.

Cette étude consistait à prévoir le comportement thermique de ces deux types d'habitat par une simulation numérique.

Le résultat de ces travaux devrait permettre l'intégration des concepts scientifiques dans l'élaboration des nouveaux types de bâtiments; ceci devrait faire ressortir l'adéquation entre la science et l'architecture.

L'adéquation science et architecture ressort aussi de l'étude de H.P.GARG et al^{7}; en effet, dans leur article intitulé: "*case study of passive houses built for free climatic conditions of India*" ils prédisent la réponse thermique de deux des trois bâtiments à partir de simulations faites sur le troisième bâtiment.

A partir de ces résultats, nous allons nous intéresser à la façon de procéder soit pour améliorer le confort thermique des maisons traditionnelles, soit pour palier à l'inadaptation des maisons modernes.

III.2 AMELIORATION DU CONFORT THERMIQUE DES MAISONS TRADITIONNELLES

L'article de BORDA-DIAZ et al{8} «*passive cooling strategies for building prototype design in a warm-humid tropic climate*» concerne l'amélioration du confort dans la maison traditionnelle YORUBA au Nigeria dans la région d'Ifé.

Cette amélioration se fait par:

- ◆ une prévention contre un éventuel gain de chaleur (figure.1.6.a). Cette prévention est basée :
 - ** sur l'orientation des fenêtres et la forme de l'enveloppe de l'habitat pour minimiser la surchauffe intérieure.
 - ** sur une ventilation double enveloppe afin de réduire le flux de chaleur entrant et d'augmenter la perte de chaleur par convection.
 - ** sur une augmentation de la résistance thermique du plafond pour isoler l'intérieur des flux descendants.
 - ** sur une protection solaire par des rideaux de bambous et des volets au dessus de l'espace habitable.
 - ** sur des volets qui réduisent la ventilation croisée pendant le jour.
- ◆ une augmentation de la perte de chaleur par l'habitat (figure.1.6.b). Cette augmentation est due à:
 - ** la ventilation naturelle et au gradient thermique pendant la nuit. En effet, le volume habitable est ventilé complètement par l'ouverture des volets opposés. Cet effet s'accroît grâce à un effet de cheminée lorsque la température extérieure est plus basse que la température intérieure.
 - ** la ventilation extérieure de l'enveloppe le jour. Cette ventilation crée un flux ascendant à travers la cheminée et la toiture.

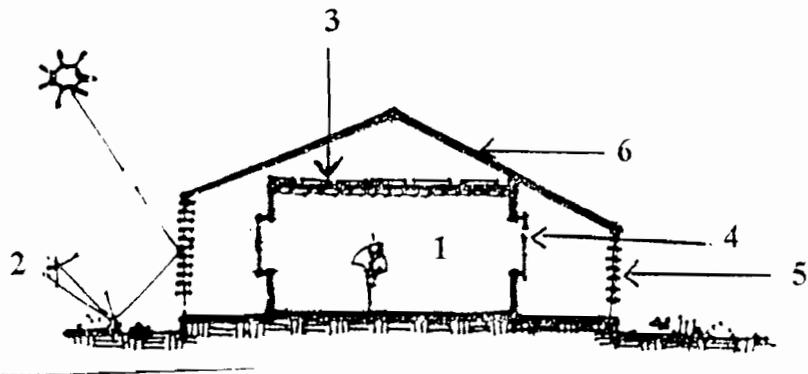
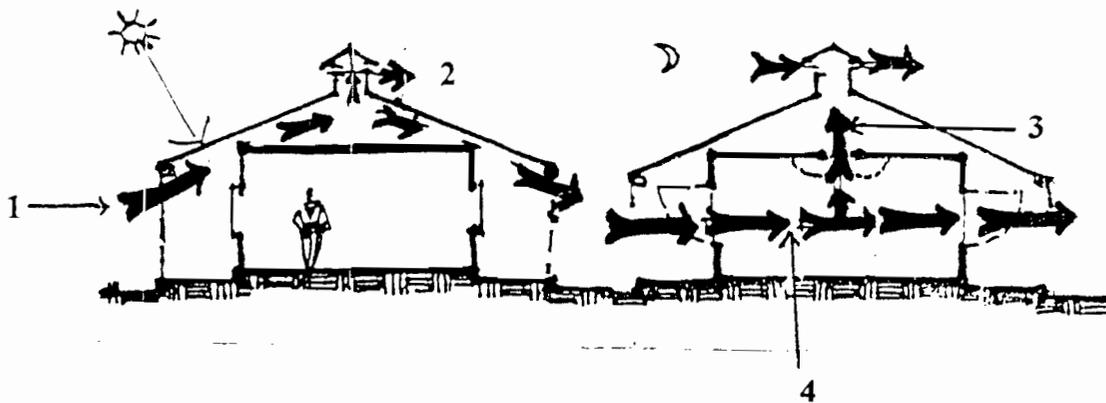


FIGURE.1.6.a: Heat gain prevention

1: Espace habitable; 2: Arbre; 3: Protection solaire; 4: Fenêtre ouvrable muni de grillage anti-moustique; 5 Isolation thermique; 6: Enveloppe de protection solaire



JOUR

NUIT

FIGURE.1.6.b: Heat loss enhancement

1: Direction du vent; 2: Effet de cheminée;
3: Ventilation verticale; 4: Ventilation horizontale



III.3 BIOCLIMATISATION DES MAISONS MODERNES

L'article de M.A.GULMA et al{9} «*passive solar houses in northern Nigeria: the west African Sub-Region*» propose des méthodes passives de recherche de confort telles que l'orientation des maisons pour une judicieuse exposition au soleil, une bonne combinaison de verre et de bois dans la confection des fenêtres, une enveloppe solide face aux intempéries (vent etc...), une véranda circulaire comme masque solaire.

L'article de C.N. AWANOU et P.F. KIENO et al{10} «*climatisation en pays chauds et secs par toiture diode*» présente un dispositif de climatisation passive permettant d'assurer le confort thermique de l'habitat des régions sèches et chaudes: la toiture diode.

La conception de cette toiture est:

- ◆ de renforcer l'aspect isolant pour la journée en refusant le plus possible les apports solaires au moyen d'une peinture sélective, et en introduisant une masse de galets dans la toiture faisant office de tampon thermique.
- ◆ d'ajouter un aspect conducteur pour la nuit par effet caloduc: le mouvement vertical de l'eau évaporée contenue dans la toiture, et descendant gravifique du condensat engendrent un transfert de calories depuis l'intérieur de l'habitat vers l'extérieur (figure.1.7). Les frigories obtenues sont stockées dans la masse inertielle qui les restituera avec un déphasage de plusieurs heures.

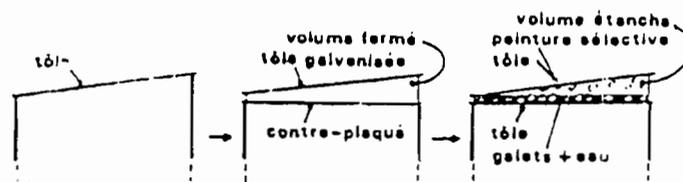


FIGURE.1.7: la toiture diode en tant qu'améliorant, à faible coût, d'un dispositif de toiture répandu en Afrique

Les travaux de A. GBANE{11} concerne "*l'étude théorique et expérimentale du comportement thermique d'une cellule parallélépipédique équipée de deux capteurs solaires cheminées Est-Ouest*".

Dans son travail, un programme de calcul est élaboré pour simuler le comportement thermique de la cellule et l'effet des capteurs solaires sur l'air intérieur.

Il ressort de son travail un dispositif de climatisation passive assuré par l'effet des capteurs solaires.

III.4 VERS UNE NOUVELLE ARCHITECTURE

Nous pensons que nous devons tendre vers une architecture qui sera à la fois bioclimatique et à la fois économique pour les tâches quotidiennes des habitants.

Cette architecture sera celle qui utilisera comme appoint aux moyens passifs de conditionnement d'air (ventilation naturelle, protection solaire) l'énergie solaire comme système actif de climatisation.

Nous aboutirons à une architecture dite solaire; elle utilisera les sources d'énergie naturelle (rayonnement solaire, énergie éolienne, biomasse).

IV CONCLUSION

La synthèse bibliographique a permis de dégager les qualités thermiques des matériaux locaux en matière architecturale.

Malgré les avantages (coût de construction peu élevé, accessibilité facile etc...) des matériaux locaux, ils rencontrent une véritable difficulté quant à leur promotion et leur vulgarisation.

La vulgarisation des matériaux locaux ne peut se faire qu'à partir de preuves s'appuyant sur une étude scientifique ayant prouvé leur bonne adaptation et leur bonne réponse en matière de sollicitation climatique. C'est pourquoi nous aborderons dans la suite, l'étude d'une case ronde entièrement construite en géobéton (matériau local).

I INTRODUCTION

L'étude bibliographique(Cf. chapitre1) a permis de constater la bonne réponse thermique des matériaux locaux. Cependant il n'est pas facile de les intégrer totalement et massivement dans la conception architecturale contemporaine à cause des conditions générales de modernisation{5}.

En effet, les délais de construction, la sécurité, le choix des matériaux, le coût de construction...etc, imposent une adaptation des concepts traditionnels en vue de leur intégration à l'époque contemporaine.

Le respect des conditions générales de modernisation nécessite des études scientifiques des matériaux locaux.

C'est dans cette optique que l'étude expérimentale d'une case ronde entièrement construite en géobéton a été effectuée au sein de l'Université de Cocody-Abidjan.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'habitat expérimental, donner la métrologie, analyser les résultats expérimentaux{1} et enfin faire une étude de confort de l'habitat expérimental.

II DESCRIPTION DE L'HABITAT

II.1 LE SITE

L'habitat, qui a servi à l'étude expérimentale, est situé au Centre de Recherche en Architecture et Urbanisme (C.R.A.U.) à l'université de Cocody-Abidjan.

Il est entouré à l'Est et au Nord-Est par des arbres qui constituent un masque au rayonnement solaire.

Au Sud-Ouest l'ombre portée d'un arbre masque l'habitat dans sa partie cylindrique vers le couché du soleil.

Cette situation demeure un avantage en ce sens qu'elle limite l'échauffement de la case par le rayonnement direct en augmentant le flux diffus.

Le sol au voisinage de l'habitat est couvert d'herbes, cet état de fait réduit la contribution du sol au niveau des échanges radiatifs par un albédo faible.

II.2 LA BRIQUETTE EN GEOBETON

Le géobéton est{1} une terre non organique contenant en adéquate composition de l'argile stabilisée avec du ciment et comprimée dans un moule sous forme de blocs avec démoulage immédiat. La quantité de ciment varie entre 5 et 10 % du poids sec de terre stabilisée, la pression de compression est d'environ 25 bar.

En Côte d'Ivoire, les blocs de géobéton sont confectionnés à partir de deux types de terre: le graveleux latéritique que l'on trouve dans le domaine du socle qui couvre environ 95% de la surface du territoire et le sable argileux que l'on trouve dans le domaine des bassins sédimentaires, zone d'Abidjan, qui recouvre environ 3% de la surface de ce territoire {12}.

Le graveleux latéritique résulte de l'altération de la roche mère (gneiss, migmatites, granites hétérogènes, charnockites, itabirites) alors que le sable argileux résulte de dépôts sédimentaires du continent.

Les dimensions de la brique de forme parallélépipédique sont les suivantes (TABLEAU.2.1)

TABLEAU.2.1: dimensions de la brique en géobéton

LONGUEUR	LARGEUR	ÉPAISSEUR
220 mm	105 mm	56 mm

II.3.2 CARACTERISTIQUES DE L'HABITAT

Nous regroupons en caractéristiques de l'habitat, les dimensions des murs, de la toiture et des ouvrants (tableau.2.2).

TABLEAU.2.2: dimensions de l'habitat et des ouvrants

	<i>RAYON INTERIEUR (cm)</i>	<i>HAUTEUR (cm)</i>	<i>EPAISSEUR (cm)</i>	<i>LARGEUR (cm)</i>	<i>LONGUEUR (cm)</i>
<i>MUR</i>	250	244	15		
<i>TOITURE</i>	250	250	14,66		
<i>PORTE en contre plaqué</i>			3,7	76	197
<i>FENETRES VITREES ET OPPOSEES (n1 , n2)</i>			0,5	74	103
<i>FENETRE VITREE NON OUVRABLE (n3)</i>			0,5	70	103
			0,5	70	31

III MESURES

III.1 PÉRIODE DE MESURES

Les mesures des températures en différents points à l'intérieur et à l'extérieur du local ont été réalisées toutes les heures. La porte et la troisième fenêtre ont été maintenues fermées au cours de toutes les mesures.

Le tableau 2.3 est un récapitulatif des journées de mesure.

TABLEAU.2.3: période de mesures (extrait de MUSERUKA{1})

MESURES	DATE	HEURES	ETATS DES FENETRES OPPOSEES
JOURNALIERES	20-24/09/88	6h à 18 h	fermé
JOURNALIERES	26-30/09/88	6h à 18 h	ouvert
NOCTURNES	8-9/10/88	18h à 7h	fermé
JOURNALIERES	15-16/10/88	16h à 16h	fermé
ET NOCTURNES	22-23/10/88	14h à 12h	ouvert

III.2 MÉTROLOGIE

Les mesures des températures ont été effectuées à l'aide de thermocouples de type K (Chromel/Alumel) et de sondes de platine (norme DIN 43760 :100Ω à 0°C). Un microvoltmètre, à déviation d'aiguille de marque AIP (sensibilité 0,2 μV et de précision variant de 2 à 5%), nous a servi à mesurer les forces électromotrices délivrées par les thermocouples de type K de sensibilité 41μV/°C et d'incertitude variant entre 0,3 et 0,5°C. Un Ohmmètre de sensibilité 0,1Ω et de précision 0,05%, nous a permis d'obtenir les résistances des sondes de platine (figure.2.1).

Dans le circuit d'obtention de mesures, la température de référence (T') est donnée par les tables des valeurs normalisées des résistances. La loi de variation de la force électromotrice (E) du capteur de type K est une fonction linéaire de l'écart (T; T') entre la température locale cherchée et celle de référence. Nous en déduisons une relation du type :

$$T_j = \frac{E}{\delta} + T'$$

avec δ une constante liée au chromel-alumel de valeur 41μV/°C.

La résistance des fils de connexion étant négligeable devant celle du microvoltmètre, la différence de potentiel lue sur cet appareil est sensiblement égale à la force électromotrice (E) du couple Chromel/Alumel.

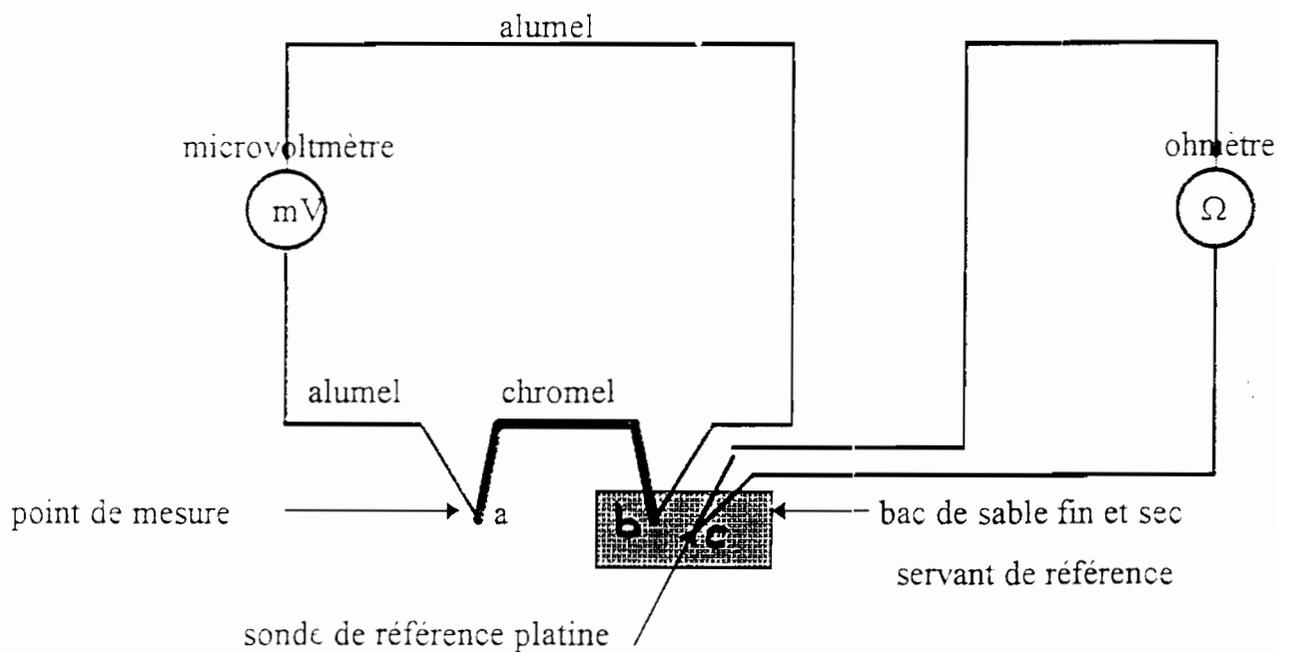


FIGURE.2.1: Schéma du circuit d'acquisition de mesures

III.3 EMBLEMMENT DES THERMOCOUPLES

Les valeurs des températures, utilisées sont obtenues à partir des mesures expérimentales effectuées aux noeuds du maillage des figures.2.2a-b

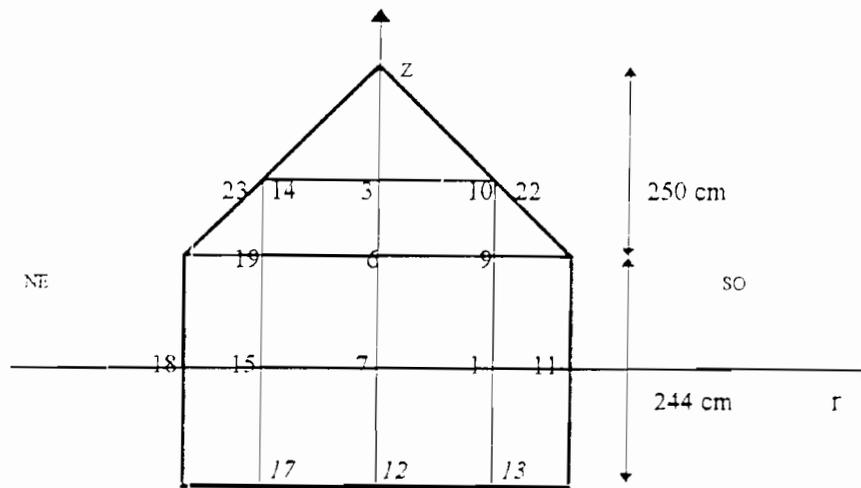


FIGURE.2.2 a : Noeuds de mesures sur une coupe verticale de l'habitat

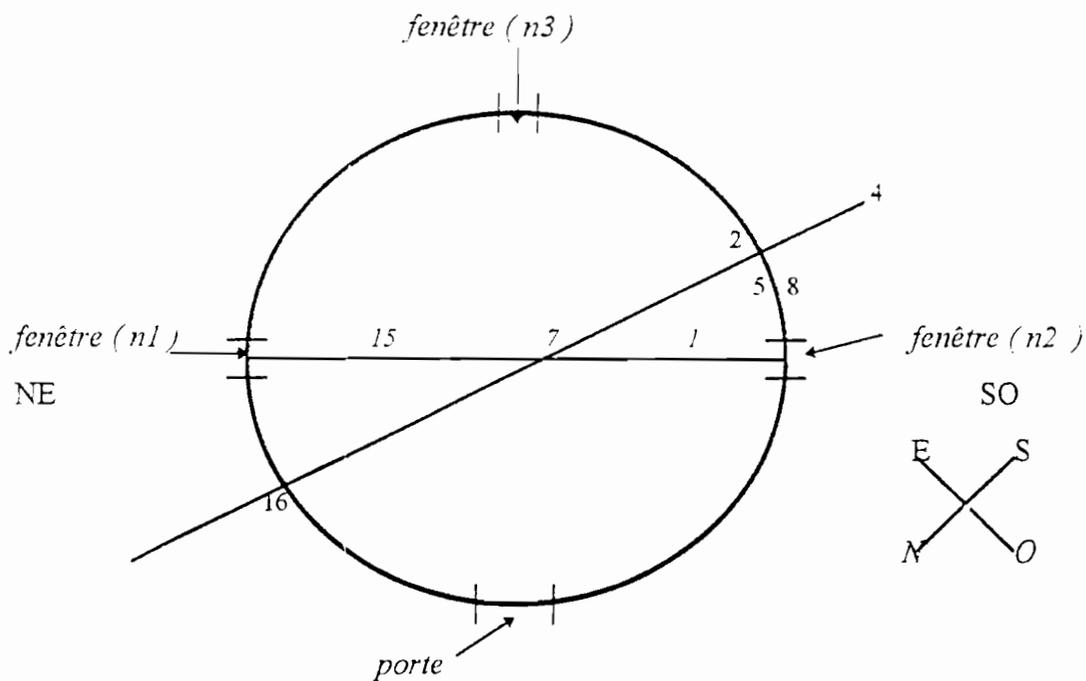


FIGURE.2.2.b : Noeuds de mesure sur une coupe horizontale à 122 cm du sol

IV ANALYSE DES RESULTATS

Pour l'analyse des mesures expérimentales, nous avons choisi, deux jours de mesures diurnes case fermée et ouverte, un jour de mesures nocturnes case fermée.

Pour ces jours de mesures, nous donnons les courbes traduisant l'évolution temporelle de la température intérieure de l'habitat (figure.2.3).

La figure.2.3 montre de faibles variations de la température interne de la case ronde d'un instant à un autre: cet état de fait montre la forte inertie thermique du matériau utilisé: cela se traduit par la persistance de l'inconfort aux environs de dix-sept heures.

Les courbes du 26/09/88 montrent une variation similaire de la température interne et de la température externe surtout après quinze heures, heure à partir de laquelle les deux courbes divergeaient quand la case était fermée(journée du 23/09/88). Nous pouvons en déduire l'effet des ouvrants dans l'évacuation de la quantité de chaleur qui devrait s'accumuler dans l'habitat si celui-ci était fermé.

L'effet de la ventilation se perçoit aussi par la décroissance de la température interne à partir de quinze heures; nous avons ainsi un aperçu d'un facteur important dans la recherche du confort à savoir l'effet de ventilation de l'habitat.

La variation régulière de la température du 8-9/10/88 de la figure.2.3 permet de nous rendre compte de l'effet du rayonnement solaire dans la réponse thermique d'un habitat

CASE FERMEE (8-9/10/88)

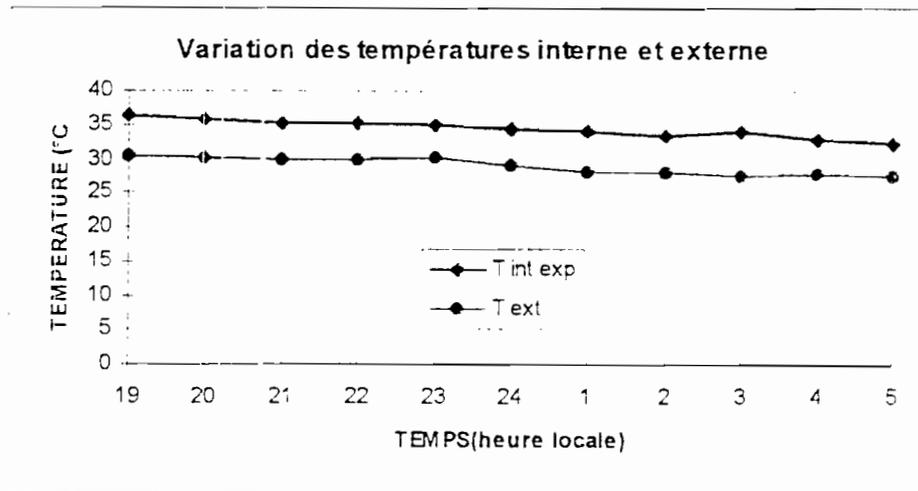


FIGURE.2.3.c: Comparaison de l'évolution des températures interne et externe

Nous étudierons les stratifications thermiques du local par l'analyse du gradient vertical défini par $\frac{T_3 - T_{12}}{Z_3 - Z_{12}}$; dans cette relation T_3 et T_{12} désignent les températures des sondes n°3 et n°12, Z_3 et Z_{12} représentent les côtes des sondes n°3 et n°12.(figure.2.2.a).

Les perturbations du gradient vertical {1} de la case ouverte montre l'effet de la ventilation naturelle sur le comportement thermique de l'habitat. Cet effet se traduit par le faible gradient de la case ouverte par rapport à celui de la case fermée (figure.2.4).

La décroissance des courbes de la figure.2.4.a entre six heures et onze heures montre la perte de chaleur par l'habitat. La croissance du gradient de onze heures à dix huit heures traduit le gain de chaleur par l'habitat et surtout le réchauffement de l'air du toit.

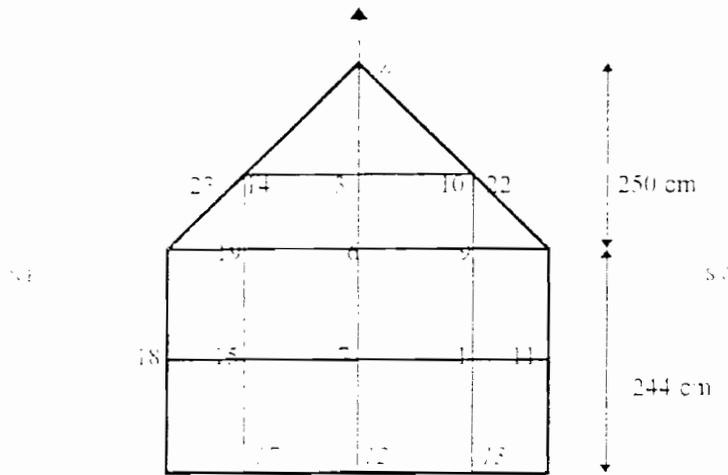
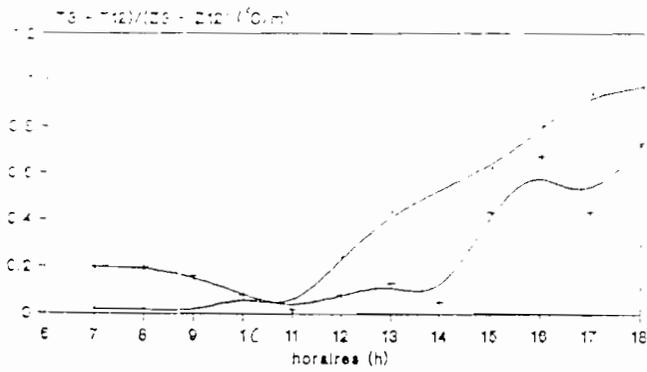


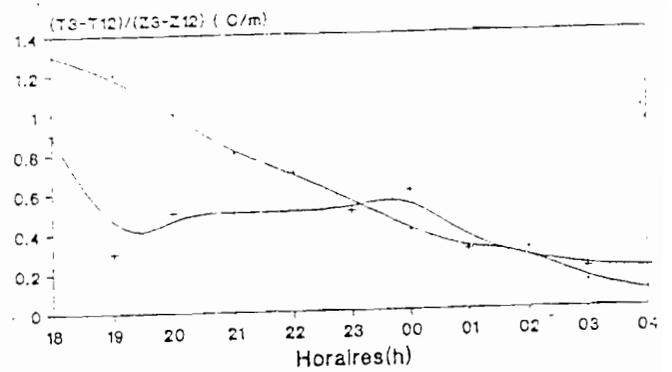
FIGURE.2.2 a : Noeuds de mesures sur une coupe verticale de l'habitat

La faible différence entre les gradients de case ouverte et fermée à partir de vingt et trois heures montre une déperdition indépendante de la ventilation naturelle.



. fermé(journée du 21/09/88)
 + ouverte(journée du 26/09/88)

FIGURE.2.4.a: Evolution temporelle du gradient vertical (mesures diurnes)



. fermé(nuit du 15-16/10/88)
 + ouverte(nuit du 22-23/10/88)

FIGURE.2.4.b: Evolution temporelle du gradient vertical (mesures nocturnes)

Considérons à présent l'évolution de la température des parois interne du toit et du mur de l'habitat.

Conformément à la figure.2.2.a. nous désignerons par:

$T_{i \text{ int NE}}$ la température délivrée par la sonde n° 14.

$T_{i \text{ int SO}}$ la température délivrée par la sonde n° 10.

$T_{m \text{ int NE}}$ la température délivrée par la sonde n° 18.

$T_{m \text{ int SO}}$ la température délivrée par la sonde n° 11.

L'évolution des courbes de la figure.2.5 montre que le côté Nord-Est est toujours plus Chaud que le côté Sud-Ouest.

Ce déséquilibre thermique est indépendant de l'état des ouvrants (fermés ou non) et de la période (jour ou nuit).

Nous pensons que ce déséquilibre thermique indépendant du temps peut être dû à une insuffisance de la convection naturelle au sein de l'habitat.

L'analyse de la figure.2.5.a montre un décalage entre les maxima des températures de parois NE et SO. Nous pensons que ce décalage est dû à l'effet des radiations solaires sur l'habitat.

La forte exposition de la toiture au rayonnement solaire explique la présence de maxima sous forme de pic au niveau des courbes de la figure.2.5.a.1; phénomène non observé au niveau du mur (figure.2.5.a.2).

A partir de seize heures on observe sur la figure.2.5.a une réduction de l'écart entre les courbes des températures NE et SO; cette réduction peut être interprétée comme un refroidissement par rayonnement vers le côté SO.

La figure.2.5.b.1 montre l'absence de décalage entre les maxima des courbes; ceci peut s'expliquer par l'effet de la ventilation naturelle des locaux.

Sur la figure.2.5.b.2 on observe une décroissance de la température de la paroi SO du mur. Cette décroissance peut être expliquée par l'effet de masque sur le côté SO du mur.

La constance de l'écart entre les courbes de la case ouverte diurne peut être due à l'égalité entre le flux net échangé par rayonnement et les pertes par convection naturelle due à l'ouverture de fenêtres.

CASE FERMÉE (NUIT DU 8-9/10/88)

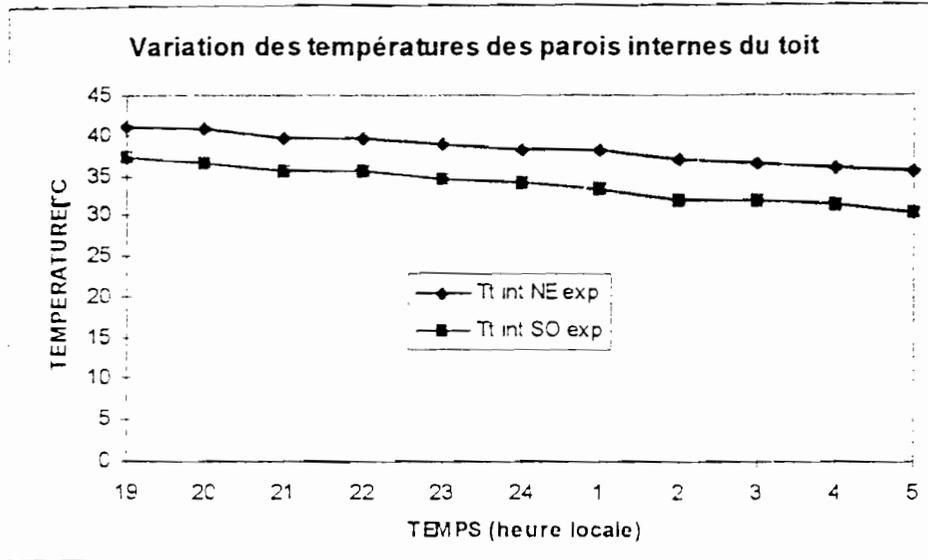


FIGURE.2.5.c.1: Evolution des températures des parois internes du toit

CASE FERMÉE (NUIT DU 8-9/10/88)

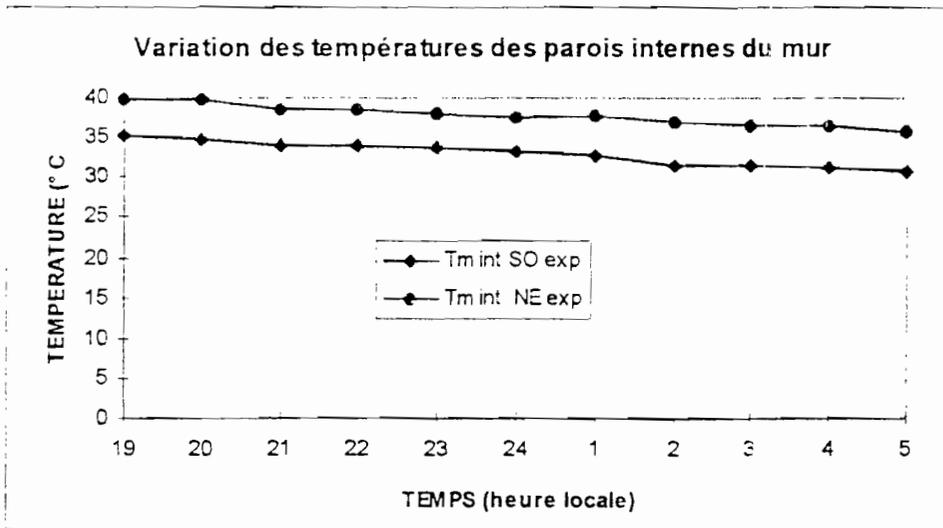


FIGURE.2.5.c.2: Evolution des températures des parois internes du mur

1. ETUDE DU CONFORT DANS L'HABITAT

Si un individu peut maintenir l'équilibre thermique avec l'ambiance sans avoir à solliciter les mécanismes thermorégulateurs, il se trouve dans une situation de confort thermique {5}.

Cette situation étant variable d'un individu à un autre, elle est basée sur un équilibre thermique entre le corps qui produit de la chaleur (métabolisme) et l'ambiance caractérisée par: la température de l'air, la température radiante moyenne, l'humidité relative et la vitesse de l'air.

Pour l'étude du confort nous allons utiliser la température d'air, le concept de la zone de confort et l'indice de confort.

1.1. DÉTERMINATION DE LA TEMPÉRATURE D'AIR

La méthode d'évaluation de confort développée par Mc INTYRE {13} admet le rôle déterminant de la température sur les réponses des individus.

Les résultats de plusieurs recherches sur la sensation de confort thermique pour la zone tropicale humide montrent que la température optimale se situe autour de 26°C (DE DEAR à Singapour {14}, MAS SANTOSA en Indonésie {15}, BUSCH en Thaïlande {16}, DEVAL en France {17}, tandis que la température maximale acceptable pour une activité légère est de 31°C (DE DEAR et al {14}).

La température d'air choisie comme paramètre de détermination du confort thermique dans l'habitat est la température moyenne journalière (\bar{T}).

Cette température se détermine par la formule suivante:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} \bar{T}_i}{n_h}$$

où n_h est le nombre d'heure de mesure.

La température moyenne horaire \bar{T}_i se détermine grâce à la formule ci-dessous:

$$\bar{T}_i = \frac{T_3 + \frac{T_{19} + T_6 + T_9}{3} + \frac{T_{15} + T_7 + T_1}{3}}{3}$$

Dans cette expression $T_3, T_1, T_6, T_9, T_7, T_{19}, T_{15}$ désignent les températures des sondes n°3, n°1, n°6, n°9, n°7, n°19, n°15 (figure.2.2.a).

Les valeurs du tableau.2.5.a montrent que les températures moyennes sont supérieures à la température moyenne acceptable qui est de 31°C. Nous en déduisons alors l'inconfort thermique de l'habitat.

TABLEAU.2.5.a: Températures moyennes journalières

état de la case	fermée	ouverte	fermée
jour de mesures	23/09/88	26/09/88	8-9/10/88
Température moyenne(°C)	32,5	32,1	34,4

V.2 UTILISATION DE LA ZONE DE CONFORT

On appelle zone de confort le domaine formé par l'ensemble des valeurs des grandeurs caractéristiques du confort thermique pour lesquelles l'individu se trouve en situation de confort{5}.

La FIGURE.2.6 extrait de GANDEMER{18} donne la zone de confort.

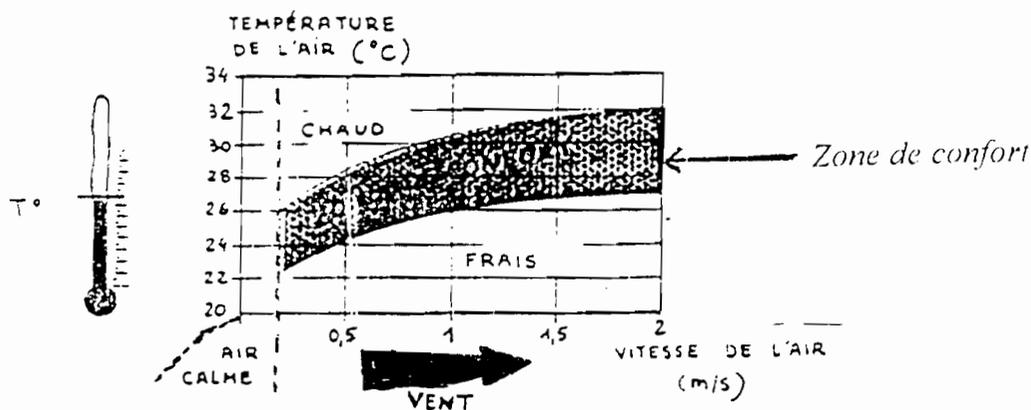


FIGURE.2.6: Zone de confort

Pour déterminer l'état du confort thermique de l'habitat à partir de la figure.2.6, il faut connaître, en plus de la température moyenne, la vitesse moyenne de l'air intérieur.

La vitesse de l'air est évaluée à partir de la relation suivante:

$$v^2 = g\beta(\bar{T}_p - \bar{T}_{ai})h$$

avec g intensité de la pesanteur, β le coefficient de dilatation, \bar{T}_p la température moyenne journalière du plancher, \bar{T}_{ai} la température moyenne journalière de l'air intérieur et h la hauteur du mur cylindrique.

La grandeur \bar{T}_p se détermine par la formule ci-dessous:

$$\bar{T}_p = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} \bar{T}_{p_i}}{n_h}$$

la température moyenne horaire du plancher \bar{T}_{p_i} s'obtient à partir de la formule suivante: $\bar{T}_{p_i} = \frac{T_{17} + T_{12} + T_{13}}{3}$ où T_{17}, T_{12}, T_{13} sont les températures des sondes n°17, n°12 et n°13 (figure.2.2.a).

Le tableau.2.5.b contient les vitesses et les températures moyennes journalières de l'air intérieur pour les différents jours expérimentaux choisis.

En reportant les valeurs de ce tableau sur le repère de la FIGURE.2.6, nous voyons que les différents points correspondants sont dans la zone chaude; par conséquent il règne dans l'habitat un inconfort thermique.

Le faible niveau des vitesses traduit une insuffisance de la convection naturelle dans l'habitat.

TABLEAU.2.5.b: Températures et vitesses moyennes journalières

Jours de mesures	23/09/88	26/09/88	8-9/10/88
Température moyenne(°C)	32,5	32,1	34,4
Vitesse moyenne théorique (m/s)	0,12	0,13	0,18

V.3 UTILISATION DES INDICES DE CONFORT

Pour caractériser la qualité thermique d'une ambiance vis à vis du critère de confort, on utilise l'indice de confort{5}.

Parmi les indices de confort notre choix s'est porté sur l'indice E.C.I.(Equatorial Confort Index) variant de -3 à 3 et défini par la relation suivante{15}:

$$Y=0,501.ECI-5,234$$

avec

$$ECI=0,574.T_{ai}+2,033P_{va}-1,81V^{0,5}+4,2$$

où T_{ai} et P_{va} sont respectivement la température de l'air intérieur et la pression de vapeur de l'air

La sensation de confort peut être définie par rapport aux valeurs du tableau.2.6.

La répartition de la sensation de confort dans l'intervalle [-3,3] donnée par le tableau.2.6 vient de l'échelle de l'indice P.M.V.(Predicted Mean Vote) donné par FANGER{19}et CELESTINE{21}.

Les valeurs de Y venant de l'indice E.C.I. données par les mesures et les sensations de confort qui en découlent sont regroupées dans le tableau.2.7.

Au vue de ces résultats, nous concluons que dans la case en géobéton règne un inconfort thermique (sensation de chaud).

TABLEAU.2.6: Variation de l'indice ECI

<i>Echelle numérique adimensionnelle : Y</i>	3	2	1	0	-1	-2	-3
<i>Sensation de confort</i>	très chaud	chaud	tiède	neutre	frais	froid	très froid

TABLEAU.2.7: Sensation de confort dans l'habitat

<i>état de la case</i>	<i>fermée</i>	<i>ouverte</i>	<i>fermée</i>
<i>Jour de mesures</i>	<i>23/09/88</i>	<i>26/09/88</i>	<i>8-9/09/88</i>
<i>Y</i>	<i>7,19</i>	<i>6,9</i>	<i>8,55</i>
<i>Sensation de confort</i>	<i>très chaud</i>	<i>très chaud</i>	<i>très chaud</i>

Le choix de cet indice se justifie par le fait qu'il prend en compte les paramètres climatiques essentiels dans la région tropicale humide que sont l'humidité de l'air (pression de vapeur d'eau) et sa vitesse.

VI CONCLUSION

L'étude des valeurs expérimentales nous a permis de constater l'insuffisance de la convection naturelle et l'inconfort de l'habitat.

Pour résoudre ces problèmes, on peut procéder de la manière suivante:

- * soit mener de nouvelles études expérimentales sur des habitats similaires pour résoudre chaque problème spécifique et à l'issue de ces études, on pourra dresser un prototype d'habitat bioclimatique.

- * soit mener une étude numérique pour obtenir un modèle qui, validé pourra être utilisé pour la recherche du confort en vue de dresser un prototype d'habitat bioclimatique.

Des deux méthodes notre choix s'est porté sur l'étude numérique eu égard aux avantages suivants{5}:

- ** *rapidité*: la rapidité d'obtention des résultats facilite l'analyse des concepteurs. Il est envisageable d'étudier plusieurs configurations.

- ** *moins coûteux*: dans la plupart des applications, le coût de calcul par ordinateur est moins élevé que celui d'une réalisation expérimentale.

**** les informations complètes:** La solution numérique d'un problème donne facilement accès aux variables d'état caractéristiques du problème traité(champs des températures par exemple) dans le domaine étudié. Par contre expérimentalement il est difficile de réaliser un aussi grand nombre de mesures.

**** Possibilité de simuler une condition réelle:** on peut représenter facilement une condition réelle. Il n'est pas nécessaire de réaliser une étude en échelle réduite: on évite ainsi, le problème de similitude.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder la mise en place d'un logiciel de simulation de l'habitat en site réel.

CHAPITRE III: ETUDE THEORIQUE

I INTRODUCTION

Pour concevoir les bâtiments, on utilise souvent un diagramme de processus comme outils d'aide pour le traitement des données, les procédures de résolutions, et tendre ainsi vers une conception optimale. Les nombreuses relations entre les éléments de construction pour un bâtiment induisent un diagramme de processus complexe{5}.

Le diagramme de processus est un outil de résolution pour un problème de conception. Il contient les données, la procédure de résolution, et les résultats.

Schématiquement les liaisons entre eux peuvent être représentées comme suit{5}:

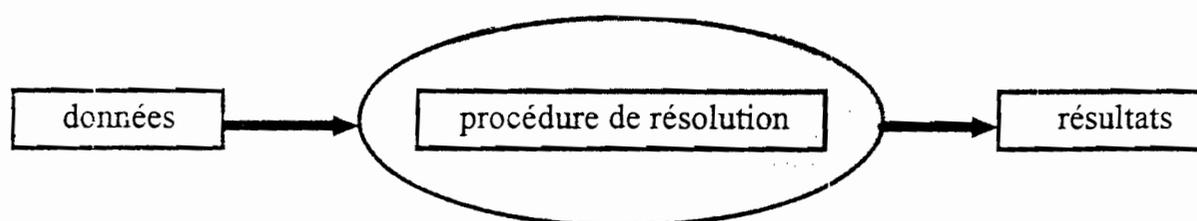


FIGURE.3.1: Schéma du principe de relation entre «données», «procédure de résolution», et «résultats».

Ce schéma peut être appelé un sous programme{21} si on parle d'un système qui s'exprime sous la forme d'un ensemble de sous problèmes indépendants.

Dans le cas simple d'un seul sous programme, il y a deux types de données{21}:

- * les données non contrôlées par le processus qui sont appelées données extérieures(données de température d'air, vitesse d'air, pression etc...).

- * les données contrôlées par le processus qui sont appelées données élaborées (choix ou proposition d'un matériau).

Les premiers sont non modifiables par le concepteur mais interviennent de façon plus ou moins explicite dans l'expression des secondes.

Le sous programme va opérer des transformations des calculs, pour produire des résultats sous une forme adoptée et interprétable.

D'un côté, on peut définir deux niveaux de conception{18}:

- * le premier a pour objet le choix d'une esquisse architecturale.
- * le second a pour objet le choix du parti technique.

Les sous problèmes sont attachés aux composants du système alors que les niveaux de conception expriment la progression dans la résolution.

Notre procédure de résolution des problèmes posés par l'habitat expérimental(Cf. chapitre 2) est une application d'un modèle du type prévisionnel.

Au sens large du terme un modèle prévisionnel a pour fonction, à partir de la connaissance d'un système dans les situations données, d'interférer son comportement dans des situations non encore observées (modèle de simulation){22}{23}. Au sens restreint, un modèle prévisionnel doit permettre, à partir de la connaissance des variables d'entrée et de la relation entrée-sortie du système, d'évaluer la valeur des sorties dans le futur (modèle de prévision){23}.

Pour la mise en place de notre modèle prévisionnel, nous allons d'abord faire une étude de modélisation mathématique puis une étude de modélisation numérique.

II REPERE

La mise en place d'un modèle mathématique capable de traduire le comportement thermique d'un habitat, nécessite l'utilisation d'un repère; ce repère doit tenir compte de la géométrie de l'habitat.

L'habitat expérimental étant une case ronde en géobéton, nous utiliserons un repère en coordonnées cylindriques (R, θ , Z);

ainsi :

$$\vec{OM} = X\vec{E}_x + Y\vec{E}_y + Z\vec{E}_z, \text{ deviendrait } \vec{OM} = L_r\vec{E}_r + L_\theta\vec{E}_\theta + L_z\vec{E}_z,$$

Comme

$$\vec{E}_x = \cos\theta \vec{E}_r - \sin\theta \vec{E}_z$$

$$\vec{E}_y = \sin\theta \vec{E}_r + \cos\theta \vec{E}_z$$

$$\vec{E}_z = \vec{E}_z$$

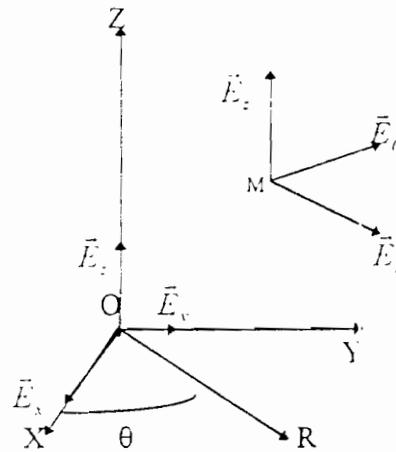


FIGURE.3.2: Repère cylindrique

nous avons: $O\vec{M}(X, Y, Z) \Leftrightarrow O\vec{M}(L_r, L_\theta, L_z)$

III MODELISATION MATHEMATIQUE

Une paroi de température de faces T_1 , T_2 et d'épaisseur e échange avec son environnement de la chaleur par conduction, convection et rayonnement(FIGURE.3.3).

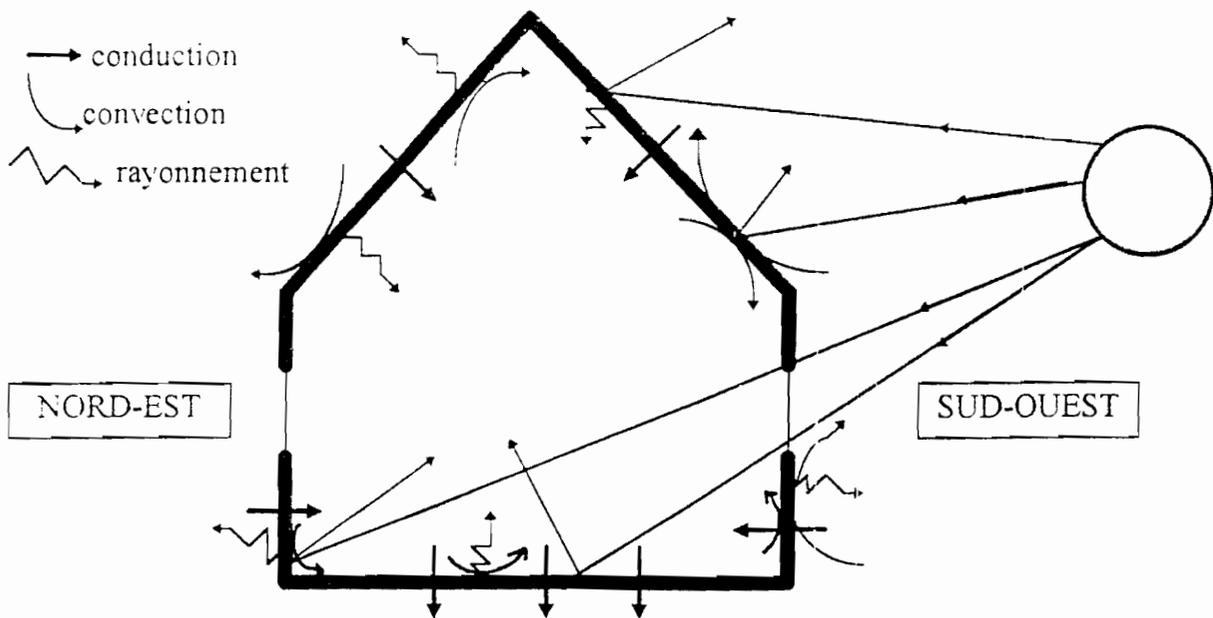


FIGURE.3.3 Habitat sous investigation

La modélisation thermique d'un habitat passe par la mise en équation de ses échanges de chaleur avec son environnement; ainsi, nous donnons dans la suite les équations régissant les différents échanges thermiques.

III.1 ETUDE DE LA CONDUCTION

III.1.1 POSITION DU PROBLEME ET HYPOTHESES

a) DÉFINITION

La conduction dans un solide homogène se définit{24} comme le transfert de chaleur d'un endroit à un autre, sous l'influence d'un gradient de température, sans déplacement appréciable de particules. Elle implique le transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre adjacente.

b) DENSITÉ DE FLUX CONDUCTIF

La densité de flux conductif est donnée par la loi de FOURIER{24}{25}{26}{27}

$\vec{Q} = -\lambda \vec{g} \vec{a} dT$ soit en coordonnées cylindriques:

$$\text{(Eq.3.1) } \vec{Q} = -\lambda \left[\frac{\partial T}{\partial r} \vec{E}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \vec{E}_\theta + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{E}_z \right]$$

c) HYPOTHESES

Les caractéristiques des matériaux (géobéton, porte, persiennes, sol): conductivité (λ), masse volumique (ρ), capacité calorifique (C_p) seront considérées comme constantes

III.1.2 ECRITURE DU FLUX CONDUCTIF

a) FLUX CONDUCTIF

Le flux conductif à travers une paroi de surface S est le produit de sa surface et du coefficient d'échange conductif H_{cond} par la différence de température des faces de la paroi; ce qui se traduit par l'équation (Eq.3.2)

$$\text{(Eq.3.2)} \quad \Phi_{\text{cond}} = H_{\text{cond}} \cdot S \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$$

b) EQUATION DE LA CHALEUR

L'équation générale qui régit la conduction à travers une paroi est donnée par Jalura et al{28}; nous l'écrivons sous forme d'équation (Eq.3.3).

$$\text{(Eq.3.3)} \quad \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + \dot{Q}_p = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

c) REMARQUES

Nous utiliserons l'équation (Eq.3.2) pour l'étude conductive à travers les ouvrants et l'équation (Eq.3.3) avec \dot{Q}_p égal à zéro (car il n'y a pas de source interne de chaleur dans les parois) pour la conduction à travers les parois en géobéton (toiture, mur).

Dans un référentiel cylindrique, la conduction radiale est la conduction la plus importante; on peut donc, développer une étude unidimensionnelle de la conduction. Dans cette étude, la température $T=T(r,\theta,z,t)$ deviendra $T=T(r,t)$.

Selon Jalura et al{28} beaucoup de problèmes pratiques et importants peuvent être traités en dimension deux à cause de l'uniformité suivant la troisième dimension.

Pour une configuration cylindrique, le problème devient bidimensionnel à cause de l'axisymétrie.

De cette façon, on peut faire une étude bidimensionnelle de la conduction. Dans cette étude, la température $T=T(r,\theta,z,t)$ deviendra $T=T(r,\theta,t)$.

L'équation vectorielle (Eq.3.3) peut alors se mettre sous les formes suivantes:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) \quad (1)$$

(Eq.3.3)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

avec $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$

Comme les transferts d'humidité au sein des matériaux sont liés en particulier aux gradients de température et d'humidité, les équations qui régissent les transferts de chaleur et de masse se trouvent couplées par le terme diffusif de la vapeur d'eau.

Ainsi, nous allons, après avoir étudié la conduction, établir les équations qui régissent le couplage «transfert de chaleur-transfert de masse».

III.2 COUPLAGE TRANSFERT DE CHALEUR-TRANSFERT DE MASSE

Au sein du géobéton, matériau poreux, constituant l'enveloppe de l'habitat, il existe deux phases:

- phase liquide (eau).
- phase gazeuse (air humide); celle-ci est constituée de la vapeur d'eau et de l'air sec.

Si nous faisons les hypothèses suivantes:

- ◆ la masse volumique de l'eau est constante,

- ◆ La phase gazeuse obéit à la loi des gaz parfaits,
- ◆ le rayonnement est négligeable.
- ◆ on néglige les termes travaux des forces de pression, la viscosité, de façon générale, les termes de dissipation de l'énergie:
- ◆ les effets de pesanteur sur la phase gazeuse, les termes de flux convectif sont supposés négligeables; cette supposition se justifie par le faible diamètre des pores et la prépondérance des forces capillaires sur celles de gravité.

Dans ces conditions, on obtient deux équations, l'une de transfert de masse d'humidité, l'autre de transfert d'énergie. Soit {29}:

équation de transfert de masse d'humidité

$$(I) \frac{\partial W}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (D_w \bar{\nabla} W + D_T \bar{\nabla} T)$$

équation de transfert d'énergie

$$(II) \rho_o C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (\lambda \bar{\nabla} T + \rho_s L_v \bar{J}_v)$$

$$\text{avec } \bar{J}_v = D_{wv} \bar{\nabla} W + D_{Tv} \bar{\nabla} T$$

Ces deux équations constituent le modèle de PHILIP et DE VRIES {29}.

Dans ces équations, C_p est la chaleur spécifique du milieu poreux humide, D_w et D_T sont les coefficients de transferts d'humidité dus au gradient de teneur en eau et de température respectivement; J_v est le terme diffusif de la vapeur d'eau, ρ_o est la masse volumique du matériau humide, λ est la conductivité du matériau humide, ρ_s la masse volumique du matériau sec, L_v la chaleur latente de vaporisation, D_{wv} le coefficient de diffusion dû au gradient d'humidité sous forme vapeur et D_{Tv} le coefficient d'humidité dû au gradient de température sous forme vapeur.

W la teneur en eau se définit par $W = \frac{m_e}{m_s}$ avec m_e la masse d'eau dans le matériau et m_s

la masse du matériau sec.

On peut aussi exprimer l'équation de transfert d'énergie en fonction des coefficients globaux D_w et D_T . Cette équation s'exprime comme suit {29}:

$$(II') \rho_o C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (\lambda \bar{\nabla} T) + \varepsilon' L_v \frac{\partial W}{\partial t} \rho_s$$

Selon FAUCONNIER{30} on peut assimiler le taux de changement de phase par l'équation suivante: $\varepsilon' = \frac{D_{WV}}{D_{Wl}}$ où D_{Wl} est le coefficient de diffusion dû au gradient d'humidité sous forme liquide.

Les équations (I) et (II') constituent le modèle de LUIKOV.

Comme expérimentalement les coefficients globaux (D_w et D_T) sont plus facilement accessibles que les coefficients de diffusion sous forme vapeur{29}, nous allons utiliser le modèle de LUIKOV qui s'exprime comme suit:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (D_w \bar{\nabla} W + D_T \bar{\nabla} T) & (I) \\ \rho_o C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (\lambda \bar{\nabla} T) - \varepsilon' L_v \frac{\partial W}{\partial t} \rho_s & (II') \end{cases}$$

En supposant que les caractéristiques thermophysiques du matériau humide (ρ_o , λ , C_p), sont les mêmes que celles du matériau sec, nous pouvons utiliser les caractéristiques thermophysiques des matériaux secs trouvées dans la littérature{31} en lieu et place de celles du matériau humide dans les équations précédentes.

Nous supposons que les coefficients de transferts d'humidité sont constants dans le matériau.

Du fait de l'étude unidimensionnelle et bidimensionnelle de la conduction, nous allons établir les équations de couplage en une et deux dimensions.

III.2.1 ETUDE UNIDIMENSIONNELLE

A partir des équations (I) et (II') et du fait que nous avons supposé les coefficients de transfert d'humidité constants l'équation de couplage transfert de masse-tranfert de chaleur en une dimension peut donc s'écrire

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \varepsilon \cdot \frac{L_v}{C_{pa}} \frac{\partial W}{\partial t}$$

(Eq.3.4)

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_w \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) + D_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

Comme le matériau n'est pas soumis à un séchage, nous pouvons admettre que la teneur en eau (W) est constante dans le matériau et que seules les surfaces connaissent cette variation à condition qu'elles soient refroidies; ainsi nous pouvons découpler l'équation de la chaleur de celle de transfert de masse. Dès lors, l'équation de chaleur se simplifie et devient:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

Compte tenu de notre hypothèse le couplage ne se fera qu'en surface lorsque celle-ci est refroidie (case ouverte diurne et case fermée ou ouverte nocturne); ceci ne sera valable que pour les faces internes.

III.2.2 ETUDE BIDIMENSIONNELLE

Pour une étude bidimensionnelle, les hypothèses précédentes permettent d'écrire l'équation de transfert de chaleur sous la forme suivante:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right)$$

Après avoir donné les équations de transfert de chaleur par conduction, nous allons étudier le mode de transfert de chaleur par convection.

III.3 ETUDE DU FLUX CONVECTIF

III.3.1 POSITION DU PROBLEME ET HYPOTHESES

* Comme nous voulons traduire le comportement thermique de la case ronde en évolution libre (pas de ventilation artificiel), les échanges convectifs se font en convection naturelle.

* Actuellement des recherches sont menées pour mieux connaître les mouvements convectifs dans un local{36}. Dans notre travail, nous définirons les coefficients d'échange grâce aux formules trouvées dans la littérature.

* La valeur du coefficient moyen d'échange superficiel par convection (H_{conv}) est uniforme sur toute la surface de la paroi.

III.3.2 ECRITURE DU FLUX CONVECTIF

a) DÉFINITION ET GÉNÉRALITÉS

La convection naturelle est due {33} à l'action combinée de la conduction à l'interface fluide-solide et aussi entre les filets fluides, de l'accumulation de l'énergie par les particules et du mouvement du milieu fluide. Les mouvements produits au sein du fluide sont simplement provoqués par la différence de densité résultant des gradients de température existants entre la paroi et le fluide. La seule force extérieure responsable du mouvement est la pesanteur.

La convection libre est caractérisée par trois régimes d'écoulement, Laminaire, Transitoire et Turbulent{34}.

- ◇ La zone laminaire est le lieu où l'écoulement est considéré comme stable et est celle qui est le plus souvent étudiée.
- ◇ La zone de transition correspond au passage d'un écoulement en régime laminaire à un régime turbulent. C'est le lieu où les fluctuations thermiques atteignent la plus forte

amplitude; elle définit aussi le lieu où les instabilités thermiques apparaissent dans la couche limite.

◊ La zone turbulente est principalement définie {34} comme le lieu où la valeur du coefficient d'échange est constante. WARNER{35} considère que le début de cette zone correspond à l'abscisse où disparaissent les fluctuations de températures.

b) ECRITURE DU FLUX CONVECTIF

Le flux convectif au voisinage d'une paroi de surface S_p est le produit du coefficient moyen de convection H_{conv} et de sa surface par la différence de température entre le fluide et la paroi. Il est donné par l'équation (Eq.3.5)

$$(Eq.3.5) \quad \Phi_{conv} = H_{conv} \cdot S_p \cdot (T_p - T_a)$$

III.3.3 COEFFICIENTS D'ECHANGE CONVECTIF

a) GÉNÉRALITÉS

Le coefficient d'échange convectif avec l'extérieur est donné par des formules du type plaque plane; elles ne tiennent pas compte de la direction du vent.

Des auteurs comme SPARROW et TIEN{37} ont testé l'influence de la direction du vent pour des inclinaisons de capteur de 20° à 90° et du vent faisant un angle de 0° à 45° par rapport à la perpendiculaire au capteur.

Ils ont constaté que l'influence de la direction du vent sur la variation de H_{cc} n'excédait pas 2.6 %: aussi dans la détermination de H_{cc} , nous prendrons en première approximation les formules trouvées dans la littérature sans tenir compte de la géométrie de nos parois (arcs de cylindre verticaux considérés comme des plaques verticales et les arcs de cône comme des plaques inclinées) et aussi sans tenir compte de la direction du vent.

b) COEFFICIENT D'ÉCHANGE CONVECTIF AVEC L'EXTÉRIEUR

L'extérieur de l'habitat est exposé à l'air ambiant et les pertes convectives entraînées sont proportionnelles à la vitesse (V) du vent.

Le coefficient de convection s'exprime {38} depuis JURGUES (1924) sous la forme:

$$H_{cc} = A + B.V^n$$

avec A , B et n des constantes.

Les coefficients A , B , n diffèrent selon les auteurs {39}; aussi nous trouvons dans la littérature:

$$\begin{array}{lll} \{24\} & \text{MAC ADAMS} & H_{cc}^{Ma} = 5,7 + 3,8.V \\ 0 < V < 5 \text{m/s} & \text{HOTTEL et WOERTZ} & H_{cc}^{HW} = 5,67 + 3,86.V \\ \{36\} & \text{NUSSEL et JURGUES} & H_{cc}^{NJ} = 5,8 + 4,1.V \end{array}$$

Ces formules très employées sont actuellement contestées.

Pour WATMUFF {40}, elles incluraient un terme de rayonnement; il propose $H_{cc}^W = 2,8 + 3.V$ avec $0 < V < 7 \text{m/s}$. Son hypothèse est confirmée par BERNARD {38}; en effet, pour retrouver le rendement expérimental de son capteur plan par simulation, il a été amené à soustraire le terme radiatif de la formule de MAC ADAMS.

Nous utiliserons la relation (Eq.3.6) proposée par BAILLY {41}.

Cette formule permet de s'affranchir du manque de valeurs instantanées de la vitesse du vent et aussi de reproduire les valeurs expérimentales lors de notre simulation.

Après avoir établi les équations de conduction et de convection, nous allons étudier le mode de transfert de chaleur par rayonnement.

Pour ce faire, nous allons d'abord, faire une étude du rayonnement solaire puis, établir les équations de transfert de chaleur par rayonnement.

III.4 ETUDE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Les flux solaires sont obtenus à l'aide des formules trouvées dans la littérature; ainsi nous donnons dans ce qui suit les différentes formules permettant d'obtenir les flux diffus, direct, global quelque soit l'état du ciel et l'inclinaison de la paroi qui reçoit ce flux solaire.

III.4.1 EXPRESSION DU FLUX DIRECT

on appelle sphère céleste, la sphère imaginaire de rayon arbitraire et de centre un point arbitraire de l'espace qui porte à sa surface les positions des astres telles qu'on les voit dans le ciel à un certain instant et à partir d'un point donné de l'espace{43}.

Sur une sphère céleste, on peut repérer un astre par ses coordonnées équatoriales (figure.3.4) qui sont: δ la déclinaison, h_s la hauteur de l'astre, a_z l'azimut de l'astre, ϕ la latitude géographique du lieu, w l'angle horaire compté depuis midi.

⇒ Pour un ciel clair, le flux solaire direct{43}{44}{45} est donné par les expressions ci-après:

- Le flux solaire direct (I_h) reçu par une surface horizontale s'exprime par la relation(1)

$$(1) I_h = I_n \cdot \sin h_s$$

Dans cette relation h_s est la hauteur du soleil et YAGHOUBI et al{46} donnent la formule suivante pour I_n :

$$\text{(Eq.3.8) } I_n = 951,55 \cdot \{1 - \exp(-0,075 \cdot [9 - \theta_z])\}$$

avec $\theta_z = 90 - h_s$

Cette expression du flux solaire direct sous incidence normale est valable pour un ciel contenant des aérosols.

- Pour une surface verticale et d'orientation par rapport à la direction SUD (γ), le flux direct s'obtient à partir de la formule (2).

$$(2) I_v = I_n \cdot (\cos h_s) \cdot \cos(a_z - \gamma)$$

- Pour une surface d'inclinaison (i) et d'azimut (γ) le flux direct $I(i, \gamma)$ est donné par la formule (3):

$$(3) I(i, \gamma) = I_n \cdot \cos i + I_v \cdot \sin i$$

Cette formule peut s'écrire sous la forme $I(i, \gamma) = I_n \cdot \cos \theta_i$

$$\text{avec } \cos \theta_i = (\sin h_s) \cdot \cos i + (\cos h_s) \cdot (\sin i) \cdot \cos(a_z - \gamma).$$

Nous utiliserons la relation (3) sous la forme donnée par l'équation (Eq.3.9).

$$\text{(Eq.3.9) } I(i, \gamma) = I_n \cdot [(\cos h_s) \cdot (\sin i) \cdot \cos(a_z - \gamma) + (\sin h_s) \cdot \cos i]$$

⇒ Le flux solaire direct par un ciel de nébulosité (N_e) (ici $N_e \neq 0$ car pour $N_e = 0$ nous avons le cas du ciel clair sans nuage) est donné par YAGHOUBI et al {46}.

$$\text{(Eq.3.9) } I(i, \gamma, N_e) = I(i, \gamma) \cdot (1 - N_e)$$

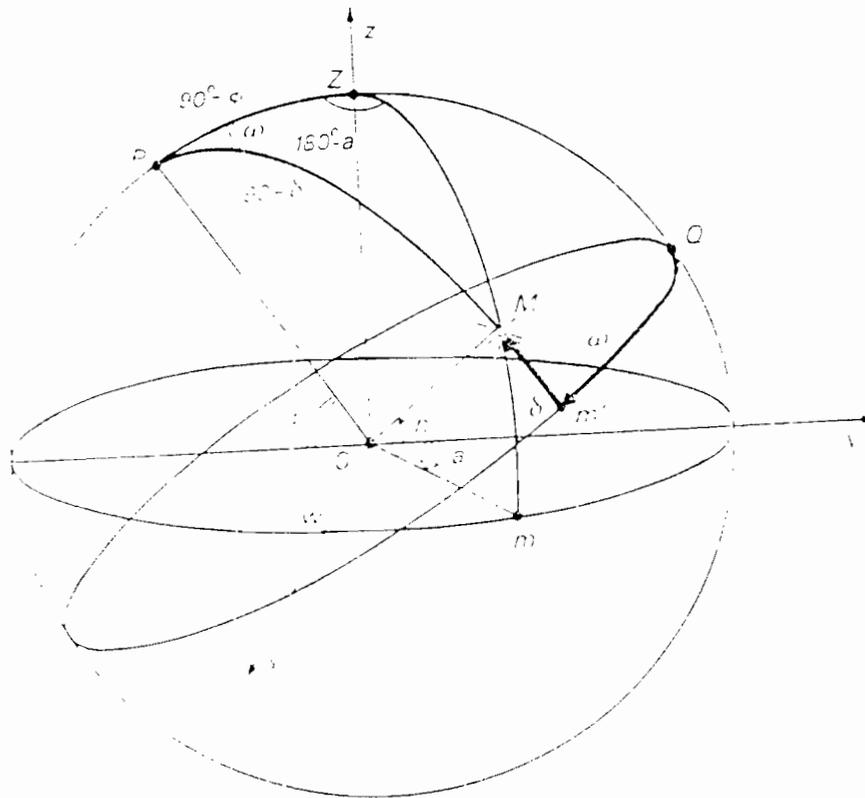


FIGURE 3.4: Triangle sphérique

III.4.2 EXPRESSION DU FLUX DIFFUS

L'expression du flux diffus est donnée par BERNARD et al{43}

$$\text{Eq 3.10) } D(i) = \frac{1 - \cos i}{2} D_h + \frac{1 - \cos i}{2} Al.G_h$$

avec Al l'albédo du sol.

Dans cette équation le flux solaire global sur une surface horizontale est donné par G_h . Il s'exprime par $G_h = D_h + I_h$ où le flux diffus sur une surface horizontale (D_h) a pour expression YAGHOUBI et al{46} :

$$\text{(Eq.3.11) } D_h = 1.432 - 2.107.h_s + 121.3.N_e$$

III.5.2 MATRICE DE FACTEUR DE FORME

Pour caractériser les échanges radiatifs, nous devons tenir compte de la géométrie du local {36}.

* Pour cela nous utiliserons la notion de facteur de forme définie géométriquement par la figure ci-dessous:

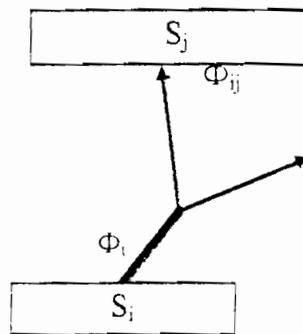


FIGURE.3.5 : Définition géométrique du facteur de forme

*Plusieurs auteurs {24} {36} {47} donnent la formulation mathématique du facteur de forme

$$F_{i,j} = \int_{ds_i} \left(\int_{ds_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi r^2} ds_j \right) ds_i$$

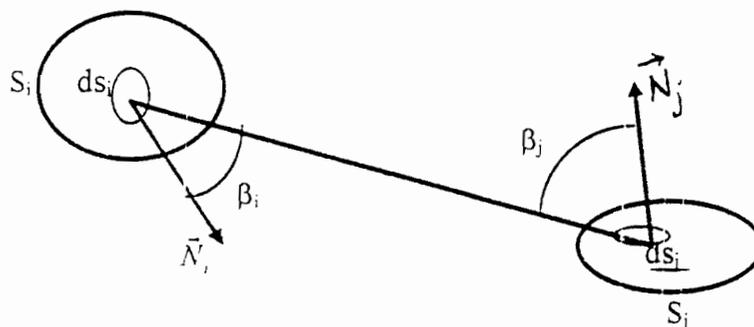


FIGURE.3.6 : Définition mathématique du facteur de forme

Chapitre 3

* la définition physique du facteur de forme est donnée par la littérature {36} conformément à la figure.3.5.

$$F_{ij} = \frac{\Phi_{ij}}{\Phi_i}$$

Dans cette équation, Φ_{ij} est le flux issu de la surface S_i qui atteint la surface S_j et Φ_i est le flux total émis par la surface S_i .

* Matrice de facteur de forme

Les calculs permettant l'obtention de la matrice de facteur de forme sont donnés dans l'ANNEXE.2.

(FF) =	0.29	0.44	0.27	Toit
	0,31	0.38	0,31	Mur (Eq.3.13)
	0.31	0.62	0	Plancher

III.5.3 ECHANGE PAR RAYONNEMENT AVEC L'EXTERIEUR

a) FLUX NET ÉCHANGÉ PAR R.G.L.O

Le flux net échangé par R.G.L.O sur une paroi d'inclinaison θ dépend des hypothèses sur la température de la surface terrestre.

- En faisant l'hypothèse que la température de la surface terrestre est égale à celle de la température du ciel WIART {38} obtient comme flux net échangé l'équation (2).

$$(2) \quad \Phi'_{ge} = \sigma \varepsilon_p \left[\frac{1 + \cos p}{2} T_{ci}^4 + (1 - Al) \frac{1 - \cos p}{2} T_{ae}^4 + Al \frac{1 - \cos p}{2} T_{ci}^4 \right]$$

avec Al = albédo du sol, T_{ci} = température du ciel, T_{ae} = température de l'air extérieure, ε_p = émissivité de la paroi, θ = angle d'inclinaison de la paroi par rapport à l'horizontal et σ = constante de STEPHAN-BOLTZMANN

- En prenant la température du sol égale à celle de l'air ambiant GRELAT et al{4} obtiennent comme expression du flux net échangé l'équation (3)

$$(3) \quad \Phi_{gc} = \sigma \varepsilon_p T_f^4 - \sigma \varepsilon_p \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} T_{ci}^4 - \frac{1 - \cos \theta}{2} T_{ae}^4 \right)$$

Comme l'albédo du sol (Al) est connu avec une forte imprécision, nous utiliserons l'équation (3).

Cette équation peut s'écrire sous la forme (Eq.3.14) donnée par la littérature{33}.

$$(Eq\ 3\ 14) \quad \Phi_{gc} = \sigma \varepsilon_p (T_f^4 - T_{ae}^4) - \sigma \varepsilon_p \frac{1 + \cos \theta}{2} (1 - \varepsilon_{ci}) T_{ae}^4$$

où $\varepsilon_{ci} \sigma T_{ae}^4$ est la puissance radiative G.L.O réémise par l'atmosphère et $\varepsilon_p \sigma T_p^4$ est l'émissance propre de la surface extérieure de la paroi.

a-1 COEFFICIENT D'ÉCHANGE PAR R.G.L.O

Si nous écrivons $\sigma \varepsilon_p \{T_p^4 - T_{ae}^4\}$ sous la forme $H_{re} \cdot (T_p - T_{ae})$, nous pouvons obtenir l'expression du coefficient d'échange R.G.L.O. (H_{re}):

$$H_{re} = \sigma \varepsilon_p \frac{T_p^4 - T_{ae}^4}{T_p - T_{ae}}$$

Dans le souci de réduire le temps de calcul machine, nous allons linéariser l'expression donnant H_{re} .

En développant la relation $T^4(K) = (\theta(^{\circ}C) + 273)^4$ suivant le binôme de Newton et en faisant l'approximation suivante :

$$6 \frac{\theta^2}{(273)^2} \ll 1$$

on obtient l'équation ci-dessous.

$$(Eq.3.15) H_{rc}^j = 5,68 \cdot \epsilon_p$$

a-2 EXPRESSION DE L'ÉMISSIVITÉ DU CIEL

Plusieurs formules empiriques {48} donnent l'émissivité du ciel à savoir :

BLISS

$$\epsilon_{ci} = 0,8004 + 0,00396 \cdot T_r$$

avec T_r = température de rosée

PICHA E VILLANUEVA

$$\epsilon_{ci} = 0,5 + 0,072 \cdot \sqrt{e}$$

avec e = tension de vapeur d'eau en bar

BRUNT

$$\epsilon_{ci} = 0,66 + 0,040 \cdot \sqrt{e}$$

Ces formules sont valables pour un ciel clair. Une correction est à faire en fonction de la nébulosité ($Ne = 0$ pour un ciel clair et $Ne = 10$ pour un ciel couvert).

La formule de correction est alors la suivante:

$$1 - \epsilon_{ci \text{ couvert}} = (1 - \epsilon_{ci \text{ ciel clair}}) \cdot (1 - 0,07 \cdot Ne)$$

GENE CLARK et CHESTER ALLEN

$$1 - \epsilon_{ci \text{ couvert}} = (1 - \epsilon_{ci \text{ ciel clair}}) \cdot (1 - 0,056 \cdot Ne)$$

BRUN

$$1 - \epsilon_{ci \text{ couvert}} = (1 - \epsilon_{ci \text{ ciel clair}}) \cdot (1 - 0,09 \cdot Ne)$$

RAOUST{48}

$$1 - \epsilon_{ci} = (0,34 - 0,04 \cdot e) \cdot (1 - 0,07 \cdot Ne)$$

avec e = tension de vapeur au sol (mmHg)

N_e = nébulosité du ciel ($0 \leq N_e \leq 10$)

D'autres auteurs proposent encore si on utilise la formule (3):

WHILLER {38}

$$T_{ci} = T_{ae} - 6^\circ \text{ en été}$$

$$T_{ci} = T_{ae} - 20^\circ \text{ en hiver}$$

SMITH {49}

$$T_{ci} = T_{ae} - 12^\circ \text{ C}$$

SWINBANK

$$T_{ci} = T_{ae \text{ ciel couvert}}$$

$$T_{ci} = 0,0552 \cdot T_{ae \text{ ciel clair}}^{3,2}$$

Nous utiliserons celle de MENGUY et al {43} qui est fonction de la température extérieure.

$$(Eq.3.16) \quad \varepsilon_{ci} = 1 - 0,261 \cdot \exp\{-7,77 \cdot 10^{-4} \cdot (T_{ae} - 273)^2\}$$

b) FLUX NET ÉCHANGÉ PAR R.C.L.O

Si Q_e est le flux incident sur une paroi opaque alors le flux réfléchi par cette paroi est son émittance totale; elle s'exprime par l'expression ci-dessous:

$$E_{te} = \rho \cdot Q_e$$

où ρ est le coefficient de réflexion de la paroi.

On appelle flux net échangé (φ_e), la différence entre le flux incident (Q_e) et l'émittance totale (E_{te}); il a pour expression $\varphi_e = Q_e - E_{te}$; ainsi en remplaçant E_{te} par sa valeur de la relation précédente nous pouvons donner l'expression du flux net par l'équation (Eq.3.17).

$$(Eq.3.17) \varphi_e = \alpha \cdot Q_e$$

avec α le coefficient d'absorption de la paroi.

III.5.4 ECHANGE PAR RAYONNEMENT AVEC L'INTERIEUR

L'étude des échanges radiatifs à l'intérieur d'un habitat se fait en prenant en compte la contribution de toutes les composantes de l'enveloppe. Pour cela, chaque composante sera repérée par un indice (j) quelconque afin de pouvoir évaluer sa contribution dans les échanges radiatifs.

a) FLUX NET ÉCHANGÉ PAR R.G.L.O

Nous négligerons, la contribution grande longueur d'onde des ouvrants dans les échanges radiatifs; ainsi n'interviendront dans les échanges que le mur, le toit et le plancher.

a-1 ÉMITTANCE TOTALE DE LA PAROI (j)

Si M_o^j est l'émittance propre de la paroi (j) et Q_i^j le flux incident sur (j) alors l'émittance totale Q_o^j peut s'exprimer par l'équation suivante {26} {28}

$$(Eq.3.18) Q_o^j = \rho_j \cdot Q_i^j + M_o^j$$

avec $M_o^j = \sigma \cdot \epsilon_j \cdot T_j^4$ où ϵ_j est l'émissivité de la paroi (j); T_j est la température de la paroi (j), ρ_j le coefficient de réflexion de cette paroi et σ la constante de STEPHAN-BOLTZMANN.

Le flux incident peut s'exprimer comme une fonction de l'émittance totale, des facteurs de forme des parois de l'habitat et des surfaces des différentes parois. Cette

fonction est la suivante: (1) $A_j Q_j' = \sum_{k=1}^N Q_o^k F_{kj} A_k$ où F_{kj} est le facteur de forme entre les parois k et j ; les surfaces des parois k et j sont exprimées par A_k et A_j . N est le nombre total de parois constituant l'enveloppe de l'habitat. En tenant compte des propriétés des facteurs de forme ($A_k F_{kj} = A_j F_{jk}$), l'équation (1) peut être remplacée par l'équation (Eq.3.19).

$$(Eq.3.19) Q_j' = \sum_{k=1}^N Q_o^k F_{jk} \text{ avec } 1 \leq j \leq N$$

En supposant les surfaces grises et en posant $C_j = \sigma T_j^4$, les équations (Eq.3.18) et (Eq.3.19) permettent d'obtenir l'équation (Eq.3.20).

$$(Eq.3.20) C_j = \sum_{i=1}^N A_{ji} Q_o^i \text{ avec } 1 \leq j \leq N$$

avec $A_{ji} = \frac{\delta_{ji} - (1 - \varepsilon_j) F_{ji}}{\varepsilon_j}$ où δ_{ji} est le symbole de KRONECKER

L'équation (Eq.3.20) traduit l'expression matricielle de la radiosité à savoir $A \vec{Q}_o = \vec{C}$

En supposant (A) inversible (toujours vrai) et en appelant (B)=(A)⁻¹, il vient

$$(Eq.3.21) \vec{Q}_o = B \vec{C}$$

a-2 FLUX NET ÉCHANGÉ SUR UNE PAROI (k)

Le flux net échangé se définit comme la différence entre le flux du rayonnement effectif et l'irradiance {28} {50}. Il est obtenu par l'équation (Eq.3.22)

$$(Eq.3.22) Q^k = Q_o^k - Q_i^k \text{ avec } 1 \leq k \leq N$$

Les formules (Eq.3.20), (Eq.3.21), (Eq.3.22) nous permettent d'aboutir à l'expression (Eq.3.23) donnant le flux net échangé.

$$(Eq.3.23) \quad Q^k = \sigma \varepsilon_k \frac{\sum_{j=1}^N B_{kj} (T_k^4 - T_j^4)}{1 - \varepsilon_k} \quad \text{avec } 1 \leq k \leq N$$

Dans cette expression (B_{kj}) est la matrice inverse de (A_{kj}).

a-3 LINÉARISATION DE Q^k

Dans le but de faciliter les calculs, nous allons linéariser le flux net échangé: pour ce faire nous allons utiliser l'approximation $T^4(K) = 10^8 \cdot (\theta(^{\circ}C) + 55)$; on obtient alors l'expression suivante:

$$Q^k = 10^8 \varepsilon_k \sigma \frac{\sum_{j=1}^N B_{kj} (\theta_k - \theta_j)}{1 - \varepsilon_k}$$

$$\text{Soit } Q^k = 5,68 \varepsilon_k \frac{\sum_{j=1}^N B_{kj} (\theta_k - \theta_j)}{1 - \varepsilon_k} \quad \text{car } \sigma = 5,68 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4.$$

L'expression linéarisée de Q^k est alors donnée par l'équation (Eq.3.24)

$$(Eq.3.24) \quad Q^k = 5,68 \varepsilon_k \frac{\sum_{j=1}^N B_{kj} (\theta_k - \theta_j)}{1 - \varepsilon_k}$$

avec $1 \leq k \leq N$

a-4 COEFFICIENT D'ÉCHANGE PAR R.G.L.O.

En écrivant Q^k sous la forme $Q^k = \sum_{j=1}^N H_{kj} (\theta_k - \theta_j)$, nous obtenons

l'expression du coefficient d'échange grande longueur d'onde.

$$(Eq.3.25) \quad H_{\lambda_k} = 5,68 \varepsilon_{\lambda_k} \frac{B_{\lambda_k}}{1 - \varepsilon_{\lambda_k}} \quad \text{avec } 1 \leq k \leq N$$

b) FLUX NET ÉCHANGÉ PAR R.C.L.O.

On regroupe sous forme de R.C.L.O le rayonnement diffus et le rayonnement direct.

Pour analyser les différents échanges radiatifs C.L.O entre une paroi et son environnement, nous sommes amenés à faire un traitement séparé de ces deux flux.

Si nous avons un local qui comporte des parois opaques et des parois transparentes, les échanges radiatifs C.L.O sur une paroi quelconque (j) sont donnés par la figure.3.7.

Sur cette figure les quantités énergétiques se définissent de la manière suivante:

Q_c^j = flux diffus, par unité de surface, incident sur la face extérieure de la paroi(j).

Q_d^j = flux direct, par unité de surface, incident sur la face extérieure de la paroi(j).

Q_{ci}^j = flux incident, par unité de surface, incident sur la face intérieure de la paroi(j).

$\rho_j Q_{ci}^j$ = réflexion du flux incident, par unité de surface, C.L.O de la paroi (j) provenant des autres surfaces.

$\tau_j Q_{ci}^j$ = transmission du flux incident, par unité de surface, C.L.O de la paroi(j) provenant des autres surfaces.

$\rho_j Q_d^j$ = réflexion du flux direct, par unité de surface, incident sur la face extérieure de la paroi(j).

$\tau_j Q_d^j$ = transmission du flux direct, par unité de surface, incident sur la face extérieure de la paroi(j).

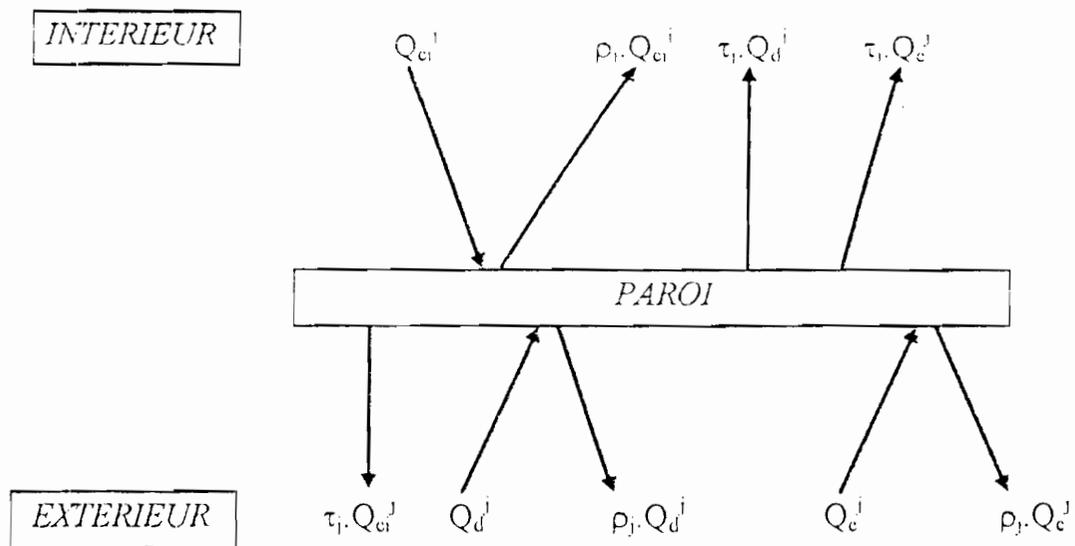


FIGURE.3.7 : Schématisation des différents échanges radiatifs

$\rho_j Q_e^j$ = réflexion du flux diffus, par unité de surface, incident sur la face extérieure de la paroi(j).

$\tau_j Q_e^j$ = transmission du flux diffus, par unité de surface, incident sur la face extérieure de la paroi(j).

b-1 ETUDE DU FLUX DIRECT

Si $\tau \cdot Q_d$ représente la densité de flux direct transmis par une paroi vitrée, la puissance rayonnante P_u sur un paroi opaque(S) est donnée par SIEGEL et al{51}.

$$(Eq.3.26) \quad P_u = \iint_{S_T} \tau Q_d \cos i \, ds$$

i = angle d'incidence: ds = élément de S_T (surface de la tache solaire sur la paroi opaque).

Par intégration de la puissance rayonnante P_u la densité de flux D sur la surface S de la paroi opaque est exprimée par BERRADA{36} et s'écrit sous la forme:

$$(Eq.3.27) \quad D = \frac{P_u}{S} = \tau Q_d \cos i \frac{S_T}{S}$$

où S est la surface de la paroi.

b-2 ÉTUDE DU FLUX DIFFUS

Si Q_{ci}^j est la densité de flux incident sur une paroi opaque (j) alors l'émittance totale diffuse (C_{ti}^j) de cette paroi est donnée par l'équation (Eq.3.28).

$$(Eq.3.28) \quad C_{ti}^j = \rho_j \cdot Q_{ci}^j$$

avec ρ_j le coefficient de réflexion de la paroi (j)

b-3 ÉTUDE DU COUPLAGE FLUX DIRECT ET FLUX DIFFUS

b-3-1 émittance totale diffuse

Le flux incident ($S_j \cdot Q_{ci}^j$) sur la face interne d'une paroi est la somme des flux direct, diffus extérieur (diffus solaire) et du diffus provenant des autres surfaces (figure.3.8).

- densité de flux $S_3 F_{3j} C_{ti}^3 / S_j$
- densité de flux $S_1 F_{1j} C_{u}^1 / S_j$
- densité de flux $D^k - \tau Q_e^k$

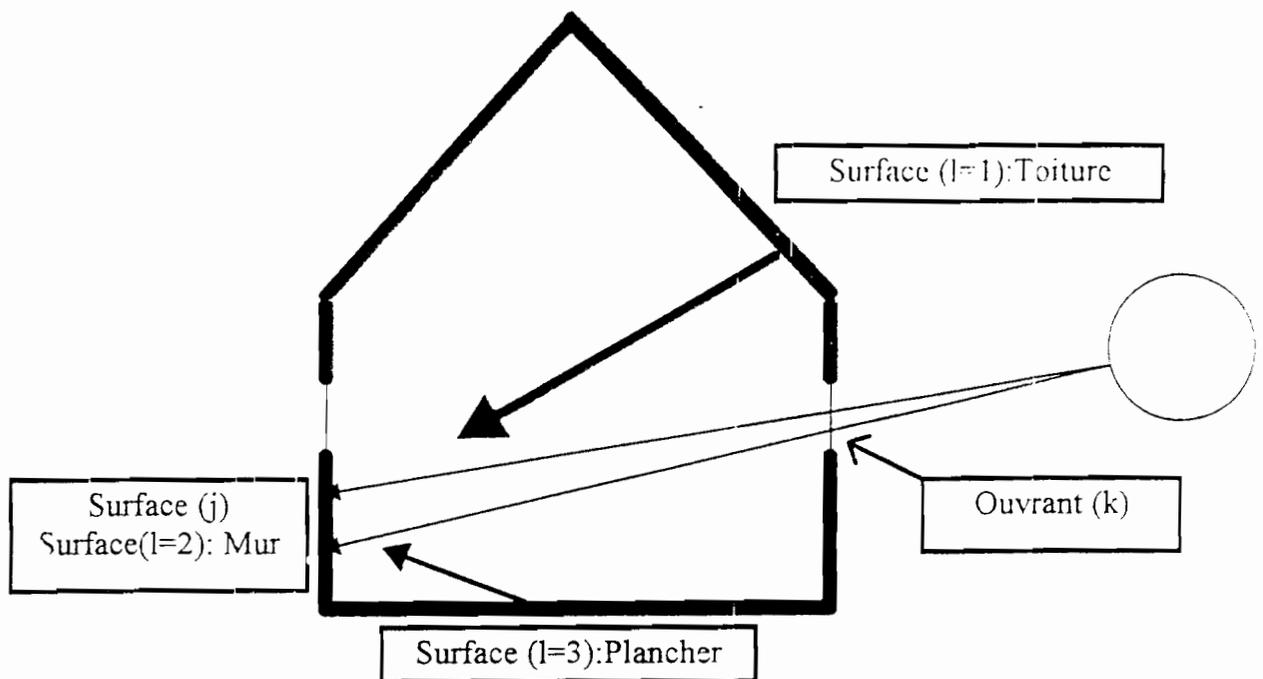


FIGURE.3.8: densité de flux incidents sur une paroi (j)

Nous traduisons cela par l'équation générale (Eq.3.29).

(Eq.3.29)

$$(1) S_j Q_c^j = S_j \sum_{k=1}^3 \tau Q_c^k + \sum_{l=1}^N S_l F_{lj} C_{li}^l \quad j = 1 \text{ à } P ;$$

$$(2) S_j Q_c^j = S_j \sum_{k=1}^3 (D^k + \tau Q_c^k) + \sum_{l=1}^N S_l F_{lj} C_{li}^l \quad j = 1 \text{ à } R ;$$

Dans ces équations N est le nombre total de parois opaques constituant l'enveloppe de l'habitat, P le nombre de parois opaques ne recevant pas le flux direct et R le nombre de parois opaques recevant le flux direct, Nous avons alors

$$N = P + R.$$

Le flux direct reçu par une paroi (j) est désigné par $S_j \sum_{k=1}^3 D^k$, le flux diffus extérieur

par $S_j \sum_{k=1}^3 \tau Q_c^k$ et le flux diffus provenant des autres surfaces par $\sum_{l=1}^N S_l F_{lj} C_{li}^l$.

Les équations (Eq.3.28) et (Eq.3.29) permettent d'écrire C_{li}^j sous la forme matricielle donnée par l'équation (Eq.3.30).

(Eq.3.30) $\sum_{i=1}^N A_{ji} C_{li}^i = b_j$ avec $j = 1 \text{ à } N$

Dans cette formule $A_{ji} = \delta_{ji} - \rho_j \cdot F_{ji}$ et $b_j =$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_j \sum_{k=1}^3 \tau Q_c^k \text{ avec } j = 1 \text{ à } P \\ \rho_j \sum_{k=1}^3 (D^k + \tau Q_c^k) \text{ avec } j = 1 \text{ à } R \end{array} \right.$$

si nous posons $(A1)^{-1} = (B1)$, l'équation (Eq.2.29) devient:

$$\vec{C} = B1 \vec{b}$$

b-3-2 densité de flux net échangé par R.C.L.O

En utilisant la définition du flux net échangé, et en se servant de l'équation (Eq.3.28) nous obtenons l'expression du flux net échangé ($\phi_{e'}^{(ci)}$): $\phi_{e'} = \frac{(1 - \rho_s) C_i'}{\rho_s}$

En supposant que les surfaces sont grises, nous avons l'équation (Eq.3.31)

$$(Eq.3.31) \phi_{e'} = \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_j} C_i'$$

III.6 EQUATIONS DE CONDITION AUX LIMITES

III.6.1 CAS DE LA TOITURE

a) FACE INTÉRIEURE

A la frontière intérieure, nous allons étudier le flux de masse et le flux de chaleur afin d'obtenir les équations de condition aux limites.

◆ *FLUX DE MASSE*

La conservation du flux de masse dans l'ambiance et dans le matériau suppose qu'au voisinage de la surface d'échange il y a égalité entre le flux de masse dans le matériau et le flux de masse dans l'ambiance.

L'équation de transfert de masse $\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial \left(D_w \frac{\partial W}{\partial r} + D_T \frac{\partial T}{\partial r} \right)}{\partial r}$ peut s'écrire en

faisant intervenir le débit-masse (D_m) de la manière suivante {52}: $\frac{\partial W}{\partial t} = - \frac{\partial \left(\frac{D_m}{\rho_s} \right)}{\partial r}$;

$$\text{soit (Eq.3.32) } D_m = - \rho_s \left[D_w \frac{\partial W}{\partial r} + D_T \frac{\partial T}{\partial r} \right]$$

où ρ_s est la masse volumique du matériau sec, D_w est le coefficient de diffusion globale de l'humidité dû au gradient de teneur en eau, D_T est le coefficient de diffusion globale de l'humidité dû au gradient de température.

Le débit-masse peut s'exprimer en fonction du coefficient de transfert de masse (H_m) {52} par la relation suivante:

$$M_m = H_m [C_{sf} - C_a]$$

Dans cette relation C_{sf} et C_a sont les concentrations respectives de la vapeur d'eau de l'air à la surface d'échange et loin de la surface d'échange.

En considérant la vapeur d'eau comme un gaz parfait, nous pouvons utiliser l'équation d'état des gaz parfaits pour obtenir la relation ci-après:

$$(Eq.3.33) \quad M_m = \frac{H_m}{461,5} \left[\frac{P_{v_p}}{T_p} - \frac{P_{v_a}}{T_a} \right]$$

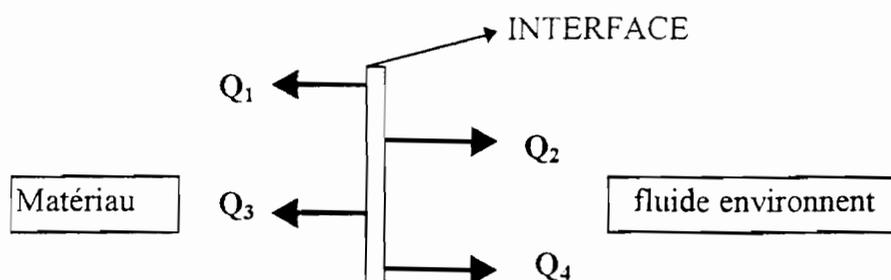
où P_{v_p} et P_{v_a} sont respectivement la pression de vapeur de l'air en contact avec la paroi et loin de la paroi; T_p et T_a sont les températures de paroi et de l'air intérieur et 461,5 est la valeur de la constante de la vapeur d'eau exprimée $J.Kg^{-1}.K^{-1}$ {53}.

La conservation du flux de masse entraîne que $M_m = -D_m$. Soit:

$$\frac{H_m}{461,5} \left(\frac{P_{v_p}}{T_p} - \frac{P_{v_a}}{T_a} \right) = \rho_v \left[D_w \frac{\partial W}{\partial r} + D_T \frac{\partial T}{\partial r} \right]$$

◆ FLUX DE CHALEUR

De façon analogue au flux de masse, on considère qu'il y a continuité du flux de chaleur à la surface d'échange.



Conformément à la figure ci-dessus, la conservation du flux de chaleur se traduit par l'équation suivante:

$$(1) Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0 \text{ avec:}$$

$$Q_1 = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \text{densité de flux conductif à travers la paroi,}$$

$$Q_2 = H_a (T_i - T_a) = \text{densité de flux convectif entre la paroi (j) et l'air intérieur,}$$

$$Q_3 = (1 - \varepsilon') L_v \rho_s \left[D_w \frac{\partial W}{\partial r} - D_T \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \text{densité de flux dû au transfert de masse dans le matériau suivant la direction radiale,}$$

$$Q_4 = \text{somme des densités de flux nets échangés par R.G.L.O et par R.C.L.O.}$$

L'équation (1) ci-dessus peut se mettre sous la forme suivante:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} - L_v \rho_s \left[D_w \frac{\partial W}{\partial r} - D_T \frac{\partial T}{\partial r} \right] = H_a (T_i - T_a) - \varepsilon' L_v \rho_s \left[D_w \frac{\partial W}{\partial r} - D_T \frac{\partial T}{\partial r} \right] - Q_1 + \phi_{ci}$$

où Q_1 et ϕ_{ci} sont respectivement les flux nets échangés par R.G.L.O. et R.C.L.O.

L_v est la chaleur latente de vaporisation; elle est obtenue à partir d'une équation déduite des tables données par BAILLY {54}

Si nous appelons H_g l'hygrométrie moyenne de la salle, nous aurons :

$$P_{v_p} = H_g \cdot P_{v_{sat}}(T_p) \quad \text{et} \quad P_{v_a} = H_g \cdot P_{v_{sat}}(T_a)$$

A partir du tableau, de valeurs de la pression de vapeur saturante ($P_{v_{sat}}$) en fonction de la température, donné par la littérature {54} nous avons obtenu à partir d'un logiciel d'interpolation linéaire la formule suivante: (Eq.3.34) :

$$(Eq.3.34) \quad P_{v_{sat}} (\text{mbars}) = 18,1835 \cdot 10^{0,1203 \cdot T}$$

Dans cette équation la température (T) est en degré celsius.

a.1 DÉTERMINATION DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE MASSE

Le cas qui nous intéresse concerne, conformément au dessin ci-après, est le transfert d'une phase (A) d'un milieu contenant ce constituant vers un courant de gaz contenant aussi (A).

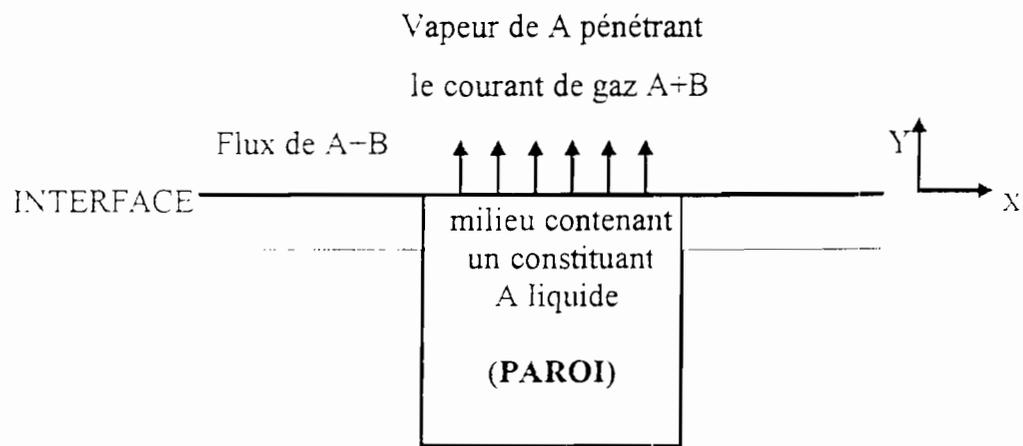


FIGURE.3.9: Schématisation du phénomène de transfert de masse

Dans notre cas, (A) est de l'eau et, (B) est de l'air. On définit un coefficient de transfert de masse permettant d'exprimer le flux diffusif de chaque constituant à l'interface.

Selon DAROLLE{52}, le problème de transfert de masse à l'interface peut être traité de la même manière que celui de transfert de chaleur car il y a analogie entre ces deux transferts. L'utilisation des termes adimensionnels permet de rendre les équations identiques et donc les mêmes techniques de traitement mathématiques.

Dans ces conditions, avec les hypothèses suivantes:

- ◇ les flux de masse sont faibles;
- ◇ les termes de dissipation sont négligeables;
- ◇ aucune réaction chimique;
- ◇ les propriétés physiques des phases sont supposées constantes;

◇ les profils de températures et de concentration sont identiques dans la sous couche visqueuse en convection naturelle.

Pour obtenir les profils de concentration, il suffit de remplacer le nombre de PRANDTL ($Pr = \frac{\nu}{a}$) par le nombre de SCHMIDT ($Sc = \frac{\nu}{D_{ab}}$) où D_{ab} est le coefficient de diffusion de (A) dans (B).

En supposant que le nombre de RICHARDSON est égal à l'unité, on peut écrire le nombre de NUSSELT comme une fonction de ($Re, Pr, \frac{L}{d}$).

Au nombre de NUSSELT (Nu) fonction de ($Re, Pr, \frac{L}{d}$) on substitue un nombre de NUSSELT de diffusion appelé nombre SHERWOOD fonction de ($Re, Sc, \frac{L}{d}$).

$$\text{avec: } Nu = H_{ci} \frac{d}{\lambda} \text{ et } Sh = H_m \frac{d}{\rho D_{ab}}$$

Pour une configuration d'écoulement donnée, la relation qui lie Nu et Sh est du type polynomial {52}; nous aurons alors:

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^p = \left(\frac{D_{ab}}{a} \right)^p$$

LEWIS {33} a formulé l'hypothèse que $\frac{Nu}{Sh} = \frac{Pr}{Sc}$. Selon DAROLLES {52}, ce qui revient à dire que le rapport $\frac{Sc}{Pr}$ (nombre de LEWIS (Le)) est voisin de $\left[\frac{Sc}{Pr} \right]^m$ quelque soit m .

Ceci est bien vérifié si le rapport tend vers un quelque soit m ; ce qui est à peu près vérifié pour l'air et la vapeur d'eau au voisinage des températures ambiantes.

Nous aboutissons à: $\frac{Nu}{Sh} = \frac{D_{ab}}{a}$; Ce qui entraîne que:

$$\text{(Eq.3.35) } H_m = \frac{H_{ci}}{\rho_a C_{pa}}$$

En supposant la teneur en eau de la brique constante, l'équation (1) devient l'équation (Eq.3.36).

$$(Eq.3.36) \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{int} = H_{ci}^t (T_i + T_{air}) + L_v M_m - Q^t + \phi_{ci}^t$$

H_{ci}^t et T_i sont respectivement le coefficient moyen de transfert de chaleur par convection vers l'intérieur et la température moyenne relatifs au toit.

b) FACE EXTÉRIEURE

La condition aux limites externes se traduit par l'équation (Eq.3.37):

$$(Eq.3.37) \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{ext} = H_{ce}^t (T_i - T_{air}) - \phi_{ce}^t + \Phi_{ge}$$

où Φ_{ge} et ϕ_{ce}^t sont les flux nets échangés par R.G.L.O. et R.C.L.O.

H_{ce}^t et T_i sont respectivement le coefficient moyen de transfert de chaleur par convection vers l'extérieur et la température moyenne relatifs au toit.

III.6.2 CAS DU MUR CYLINDRIQUE

Les équations régissant les transferts de chaleur et de masse au niveau du mur cylindrique s'expriment comme précédemment:

$$\text{(Eq.3.38)} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{m_i} = H_{ce}^m (T_m + T_{ae}) + L_v M_m - Q^m - \phi_{ci}^m$$

$$\text{(Eq.3.39)} \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{m_e} = H_{ca}^m (T_m - T_{ae}) - \phi_{ce}^m - \Phi_{gc}$$

H_{ce}^m , H_{ci}^m et T_m sont respectivement le coefficient moyen de transfert de chaleur par convection vers l'extérieur et l'intérieur, et la température moyenne relatifs au mur.

III.7 CONDUCTION AU NIVEAU DES OUVRANTS

La conduction dans un simple vitrage peut être traitée en régime permanent:

en effet la courbe d'influence obtenue par BERRADA {36} (figure.3.11) montre que le régime permanent est rapidement atteint (huit à dix minutes après sollicitation. On peut donc négliger le passé thermique dans l'étude de la conduction dans un simple vitrage.

La conduction au niveau de la porte sera également traitée en régime permanent; ainsi au niveau des ouvrants, la conduction sera étudiée en régime stationnaire .

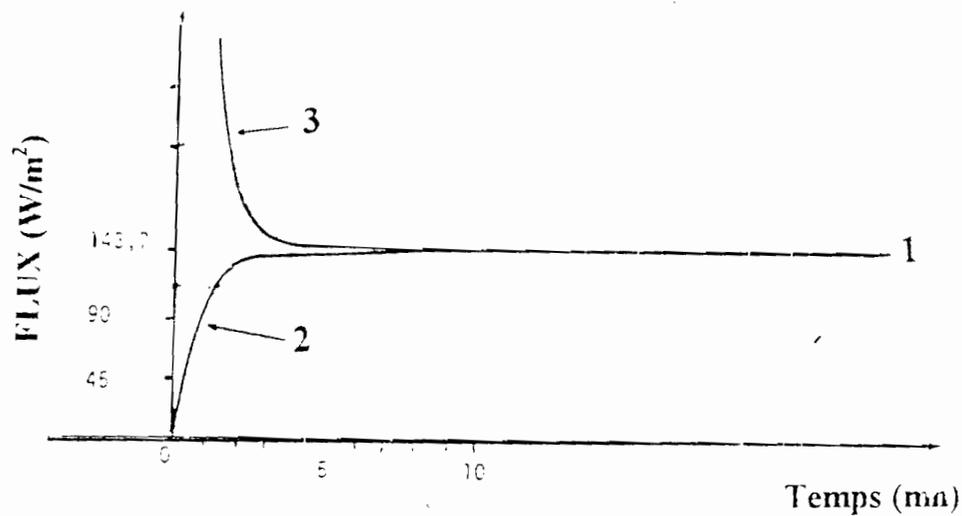


FIGURE.3.11: Fonction d'influence d'un simple vitrage

1: régime permanent

2: densité de flux sur la surface intérieure

3: densité de flux sur la surface extérieure

La déperdition totale ϕ_o à travers une paroi d'épaisseur e et de conductivité thermique λ et de surface S est donnée par la relation (Eq.3.40)

$$(Eq.3.40) \phi_o = K_t \cdot S \cdot (T_{ac} - T_{ai})$$

où, T_{ac} et T_{ai} sont les températures de l'air extérieur et de l'air intérieur et K_t la conductance thermique exprimée par $\frac{1}{K_t} = \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{H_e} + \frac{1}{H_i}$.

Les valeurs de la conductivité thermique et des coefficients globaux de transmission thermique (H_e à l'extérieur et H_i à l'intérieur) qui interviennent dans l'expression de la conductance thermique sont données par la littérature [31] et regroupées dans le tableau.3.2.

TABLEAU.3.2: conductivité thermique et conductance au niveau des ouvrants

<i>FRONTIERE</i>	λ W/m°C	$1/H_e$ m ² °CW ⁻¹	$1/H_i$ m ² °CW ⁻¹
<i>PORTE</i>	0,12	0,11	0,11
<i>FENETRE</i>	0,7	0,11	0,11

III.8 AUTRES PERTES DE CHALEUR DANS L'HABITAT

III.8.1 PERTE A TRAVERS LA LONGUEUR DE LIAISON AU SOL

La densité de flux due à la perte à travers la longueur de liaison est donnée par la littérature [31].

$$(Eq.3.41) \quad \phi_s = K_s \cdot L \cdot (T_{ai} - T_{ac})$$

Dans cette équation K_s désigne le coefficient de transmission linéique, L est la circonférence du cercle, T_{ai} et T_{ac} sont respectivement les températures de l'air intérieur et de l'air extérieur.

III.8.2 PERTE PAR MANQUE D'ETANCHEITE

Cette densité de flux est donnée par KREITH et KREIDER{42}; soit (Eq.3.42)

$$(Eq.3.42) \quad \phi_r = \phi_{ff} \cdot \rho_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{in} - T_{ae})$$

où ϕ_{ff} désigne le débit volumique et s'exprime par $\phi_{ff} = \phi_i \cdot L_t$, C_{pa} la capacité calorifique de l'air et ρ_a sa masse volumique.

ϕ_i est la fonction d'infiltration de la porte et des fenêtres et L_t la longueur totale de fuite.

En explicitant la longueur totale de fuite on obtient: $\phi_{ff} = \phi_i \left(\sum_{k=1}^{k=Q} Lf_k + Lf_p \right)$

avec Q (le nombre de fenêtre); dans cette formule, nous avons:

$$\phi_i = \frac{3.7 - 0.14 \Delta P}{3600} \text{ et } \Delta P = \frac{\rho_a V_c^2}{4}, \quad V_c = \text{vitesse du vent}$$

$Lf_p = 2 \cdot (\text{longueur} - \text{largeur}) = \text{longueur de fuite de la porte,}$

$Lf_1 = Lf_2 = 7 \cdot \text{largeur} + 2 \cdot \text{longueur} = \text{longueur de fuite des fenêtres NE et SO.}$

$Lf_3 = 3 \cdot \text{largeur} - 2 \cdot \text{longueur} = \text{longueur de fuite de la troisième fenêtre.}$

III.8.3 DEPERDITION PAR RENOUVELLEMENT D'AIR

Cette déperdition est calculée par la formule trouvée dans la littérature{55}; en effet le renouvellement de l'air dans les locaux, dont le taux horaire doit être compris entre 0,5 et 1 suivant la taille du local, occasionne des pertes thermiques égales à ϕ_r et exprimées par l'équation (Eq.3.43)

$$(Eq.3.43) \quad \phi_r = N_r \cdot \rho_a \cdot C_{pa} \cdot V \cdot \frac{T_{ai} - T_{ae}}{3600}$$

où N_r = taux de renouvellement horaire, V = le volume du local

III.8.4 PERTE DUE A UNE OUVERTURE AU NIVEAU DU TOIT

Un orifice au niveau du toit engendre une déperdition (F_m) qui peut être évaluée par l'équation (Eq.3.44).

$$(Eq.3.44) \quad F_m = C_{pa} \cdot D_m \cdot (T_{ai} - T_{ae})$$

Dans cette équation D_m est le débit massique, T_{ai} est la température de l'air intérieur, C_{pa} sa chaleur massique et T_{ae} la température extérieure.

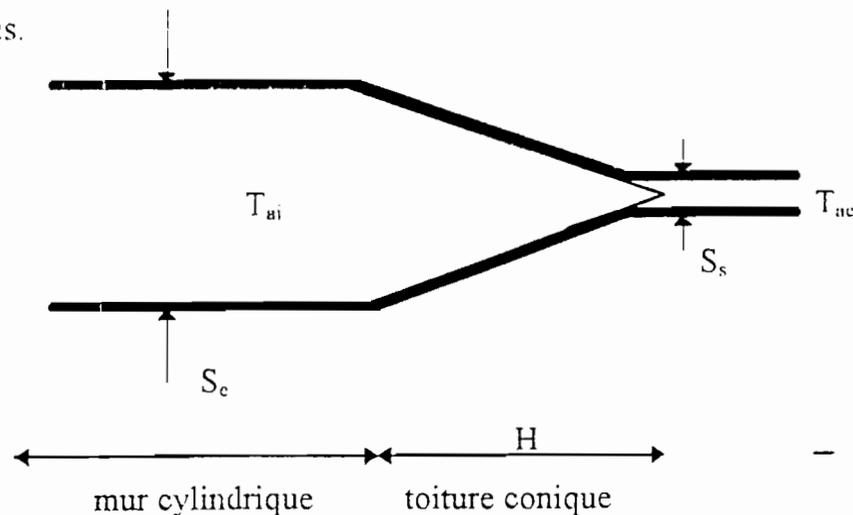
Le débit-masse peut être évalué à partir de la formule donnée par GRIMER{56}:

$$D_m = C S_s \rho \sqrt{gH} \frac{\bar{T} - T_{ai}}{\bar{T}} \quad \text{avec} \quad \bar{T} = \frac{T_{ai} + T_{ae}}{2}$$

Le coefficient C s'exprime dans le cas d'un rétrécissement progressif par{57}:

$$C = 0,63 + 0,37 \left[\frac{S_s}{S_e} \right]^3$$

La hauteur H, les surfaces de sortie(S_s) et d'entrée(S_e) se déterminent par rapport à la figure ci-dessous.



III.9 ETUDE DU PLANCHER

Pour résoudre le problème de la conduction de la chaleur du plancher de la case ronde, nous la subdivisons en deux zones distinctes:

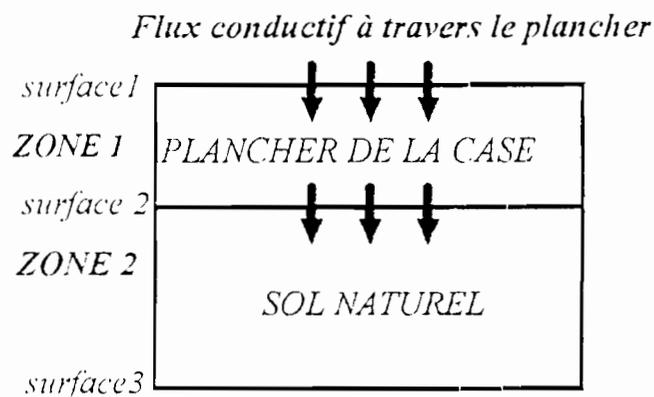


FIGURE.3.11 : délimitation des zones pour l'étude de la conduction du plancher

Dans la première zone (zone 1), compte tenu de la faible épaisseur du plancher, nous négligerons la conduction.

Dans la deuxième zone (zone 2), compte tenu de la valeur importante de la résistance thermique, nous allons étudier la conduction en régime permanent.

Si nous appelons E_s l'épaisseur de la zone 2 et si nous avons pour conductivité thermique du sol λ_s le flux conductif est de la forme:

$$(Eq.3.45) \quad \phi_s = \frac{\lambda_s}{E_s} S_p (T_p - T_s)$$

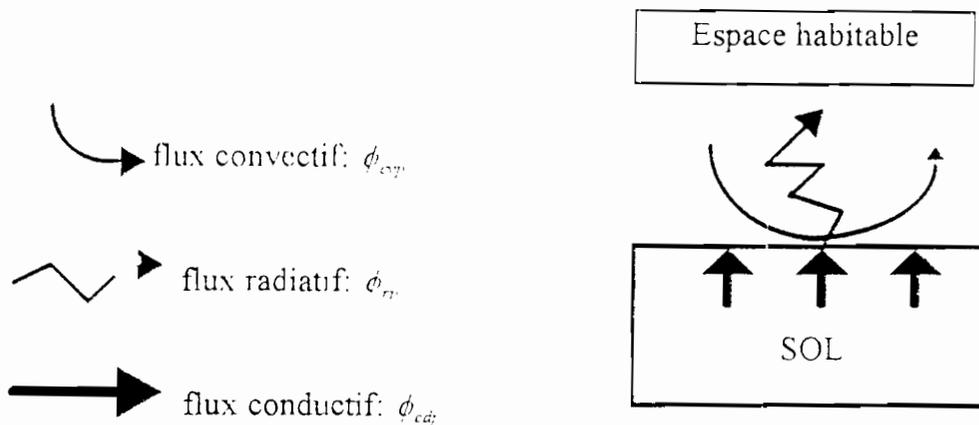
Dans cette expression T_s et T_p désignent les températures du sol et du plancher, S_p est la surface du plancher.

Au cours du temps, l'équation qui régit le plancher s'exprime comme suit:

$$\phi_{cap} = \phi_{cvp} + \phi_{rp}$$

$$\text{avec: } \phi_{cvp} = H_{cv} S_p (T_p - T_{ai}) \text{ et } \phi_{cdr} = \frac{\lambda_s}{E_s} S_p (T_s - T_p)$$

Les flux ϕ_{cvp} , ϕ_{rp} , ϕ_{cdr} désignent respectivement le flux convectif entre le plancher et l'air intérieur, la somme des flux radiatifs G.L.O et C.L.O au niveau du plancher et le flux conductif à travers le plancher (figure ci dessous)



III.10 ETUDE DE L'ENCEINTE DE L'HABITAT

III.10.1 CARACTERISTIQUES DE L'AIR

Les caractéristiques de l'air sont déterminées grâce aux formules trouvées dans la littérature {58} et s'expriment par l'équation (Eq.3.46).

$$\begin{aligned} \text{(Eq.3.46) } C_{pa} &= 1003,6 + 6,8 \cdot 10^{-2} \cdot T_{ai} + 2,2210^{-4} \cdot T_{ai}^2 \\ \rho_a &= 1,288 - 0,0039 \cdot T_{ai} \end{aligned}$$

avec T_{ai} température, de l'air intérieur, exprimée en degré Celsius.

ρ_a sa masse volumique (Kg/m^3) et C_{pa} sa chaleur massique ($\text{J/Kg}^\circ\text{C}$)

III.10.2 EQUATION DE L'ENCEINTE DE L'HABITAT

Connaissant les différents échanges thermiques entre les parois et l'air intérieur, les différentes déperditions de l'habitat, nous pouvons écrire l'équation (Eq.3.47) qui régit l'air intérieur.

$$(Eq.3.47) \quad m_a C_{pa} \frac{dT}{dt} = \phi_{conv}^t + \phi_{conv}^m + \phi_{conv}^p - \phi_s - \phi_f - \phi_r - F_m + \sum_{k=1}^{k=Q} \phi_o^k$$

Dans cette équation, ϕ_{conv}^t , ϕ_{conv}^m , ϕ_{conv}^p désignent respectivement les flux convectifs avec le toit, le mur, le plancher; l'indice de sommation maximale Q est le nombre total d'ouvrants de l'habitat.

III.11 CONCLUSION

La modélisation mathématique, nous a permis de mettre au point toutes les équations régissant la réponse thermique de notre habitat lorsqu'il est soumis à différentes sollicitations climatiques.

Pour nous affranchir des difficultés expérimentales (manque d'appareils de mesures, coût élevé de la construction d'un habitat, contrainte temporelle), l'élaboration d'un modèle numérique paraît nécessaire.

Dans ce qui suit, nous bâtirons un modèle numérique à partir des équations du modèle mathématique pour traduire non seulement la réponse thermique de l'habitat expérimental mais aussi pour faire une étude de confort dans l'habitat.

IV MODELISATIONS NUMERIQUES

Les équations qui gouvernent le comportement thermique de l'habitat sont des équations non linéaires.

La difficulté voire l'impossibilité de trouver les solutions analytiques de ces équations conduit à l'utilisation du calcul numérique.

Le calcul numérique consiste à linéariser les équations par la discrétisation puis à les résoudre par des méthodes numériques.

Dans cette partie, nous allons, d'abord donner le schéma de la méthode de résolution de l'équation de l'enceinte, puis les maillages nécessaires à la discrétisation de l'équation de la chaleur, ensuite présenter les équations discrétisées, et enfin donner la méthode de résolution de ces équations discrétisées.

IV.1 RESOLUTION DE L'EQUATION DE L'ENCEINTE

Nous allons résoudre l'équation de l'enceinte par la méthode de RUNGE-KUTTA{59}{60}: ce choix se justifie par:

- ◆ le fait que selon JALURA et al{28} elle est la méthode la plus commode pour résoudre ce genre d'équation différentielle,
- ◆ à son haut niveau de convergence,
- ◆ sa faible erreur de troncation ($o[(\Delta x)^5]$).

IV.1.1 PRINCIPE DE LA METHODE

L'idée fondamentale de cette méthode est de calculer :

$$Y_{j+1} - Y_j = \int f(t, Y(t)) dt$$

en utilisant une formule d'intégration approchée à q points intérieures

$t_{k+1} = t_k + h_i$ pour calculer l'intégrale. La valeur inconnue Y_{k+1} en chaque point intermédiaire t_{k+1} est déterminée par une formule du type EULER $Y_{k+1} = Y_k + h_i p_i$ où p_i est la dérivée en un point intermédiaire t_{k+1} et h_i est le pas de temps.

Pour une valeur de $q = 4$ nous avons la méthode de RUNGE-KUTTA d'ordre 4 (RK4)

IV.1.2 SCHEMA DE LA METHODE

Pour un pas d'ordre K nous avons:

$$K_0 = f(t_k, Y_k) \quad K_1 = f\left(t_k + \frac{h}{2}, Y_k + \frac{h}{2} K_0\right)$$

$$K_2 = f\left(t_k + \frac{h}{2}, Y_k + \frac{h}{2} K_1\right) \quad K_3 = f(t_k + h, Y_k + h K_2)$$

$$Y_{k+1} = Y_k + h \frac{K_0 + 2K_1 + 2K_2 + K_3}{6}$$

Connaissant les températures des faces internes des parois, nous pouvons appliquer le schéma de la méthode RK4 à l'équation de l'enceinte pour déterminer la température interne de l'habitat.

Comme la détermination de la température interne nécessite la détermination de la température de parois, nous allons par la suite aborder les méthodes (unidimensionnelle et bidimensionnelle) de détermination des températures des faces des parois.

IV.2 MODELISATION UNIDIMENSIONNELLE

La conduction au sein d'une paroi s'effectue de façon générale suivant les trois dimensions de l'espace.

Parmi celles-ci, la conduction la plus importante est celle qui s'effectue de l'intérieur vers l'extérieur ou inversement; c'est pourquoi dans l'évaluation des échanges de chaleur dans un habitat, la conduction est souvent traitée en une dimension.

En exemples de traitement unidimensionnel de la conduction nous citerons les travaux de YAGHOUBI et al{46} et MOHAMMED S.E. SHOBOKSHY et al{61}.

En se basant sur l'importance de la conduction de l'intérieur vers l'extérieur ou inversement, nous mettrons au point un logiciel unidimensionnel où la conduction est prise suivant la direction radiale dans un référentiel cylindrique.

IV.2.1 MAILLAGE

Pour prendre en considération la tache solaire sur l'habitat, nous utiliserons le maillage de la figure.3.12 ,

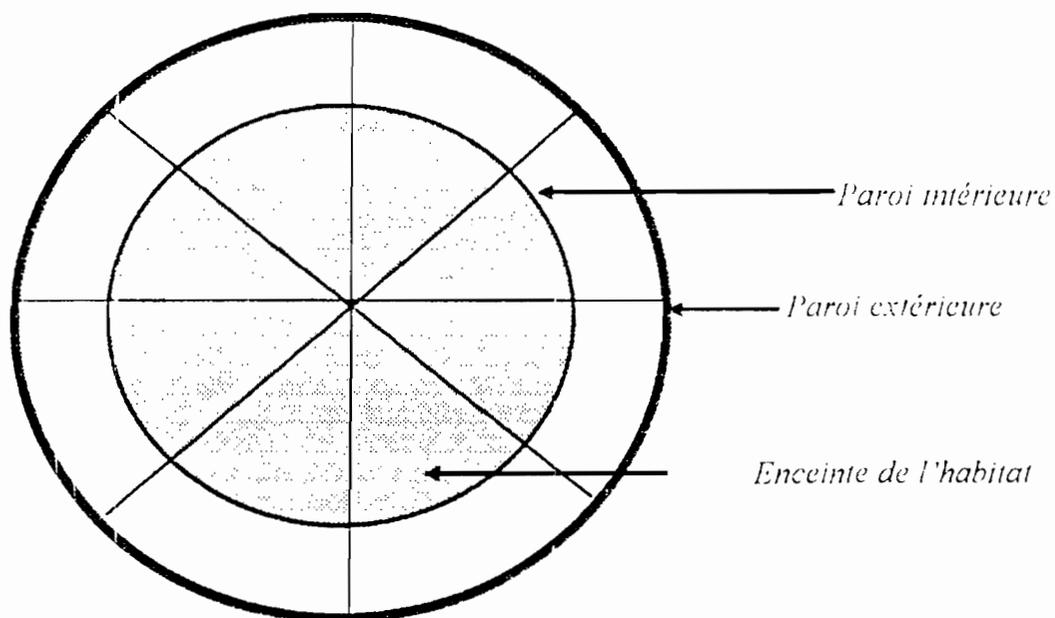


FIGURE.3.12 : Maillage sur une coupe horizontale de la case ronde

Ce maillage est constitué par huit(8) secteurs angulaires d'angle $\pi/4$.

IV.2.2 MODELISATION DE L'EQUATION DE LA CHALEUR

L'équation de la chaleur sera résolue pour chaque secteur angulaire du maillage de la figure.3.12 .

Pour la résolution, chaque secteur angulaire(k) de la figure.3.12 est muni du maillage de la figure.3.13 .

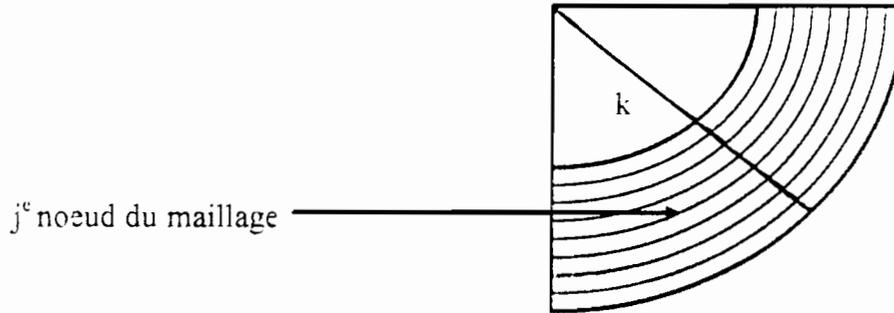


FIGURE.3.13 : Maillage unidimensionnel d'un secteur angulaire (k)

Pour discrétiser l'équation (Eq.3.3), nous avons utilisé la méthode des différences finies {59} {60} {62}

Posons : $T(t,r) = T(t,r_j) = T_{ij}$ où j est l'indice d'incrément du pas d'espace et i celui du pas de temps.

nous avons les équations suivantes:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \cong \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta r}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \cong \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta r^2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cong \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta t}$$

Dans ces équations Δr et Δt sont les pas d'espace et de temps.

L'équation (Eq.3.3) s'écrit alors:

$$\frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta t} = a \left[\frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r_j} \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{\Delta r} \right]$$

où a est la diffusivité thermique du matériau et r_j la position du noeud j sur la direction radiale.

En posant $b_j = \frac{a}{2r_j} \frac{\Delta t}{\Delta r^2}$ nous obtenons l'équation discrétisée (Eq.3.48)

$$(\text{Eq.3.48}) \quad T_{i+1} - T_i = b_j \cdot \{ (\Delta r + 2r_j) \cdot T_{i+1} + (2r_j - \Delta r) \cdot T_{i-1} - 4r_j \cdot T_i \}$$

IV.2.3 RESOLUTION DE L'EQUATION DE LA CHALEUR

Pour résoudre l'équation (Eq.3.48), nous allons utiliser la méthode de CRANK-NICOLSON [62]; pour cela nous procédons de la manière suivante:

1. Ecrivons l'équation (Eq.3.48) au temps t_{i-1}

$$T_{i-1j} - T_{ij} = b_j \{ (\Delta r + 2.r_j).T_{i-1j-1} + (2.r_j - \Delta r).T_{i-1j+1} - 4.r_j.T_{i-1j} \} \quad (1)$$

En faisant la somme des équations (Eq.3.48) et (1) et en posant $c_j = \frac{b_j}{2}$; il vient alors l'équation (Eq.3.49).

$$\begin{aligned} & T_{i-1j}.(1 - 4.r_j.c_j) - c_j.(\Delta r + 2.r_j).T_{i-1j-1} - c_j.(2.r_j - \Delta r).T_{i-1j+1} \\ \text{(Eq.3.49)} & \\ & = c_j.(2.r_j - \Delta r).T_{ij} + (1 - 4.r_j.c_j).T_{ij} + c_j.(\Delta r + 2.r_j).T_{ij-1} \end{aligned}$$

avec j variant de un (1) à $n-1$ où n est le nombre total de subdivision de l'épaisseur de l'enveloppe et i est le pas d'incrémentement du temps.

Ce système n'est valable que pour des points intérieurs au maillage.

$$\begin{aligned} \text{Si nous posons} & \left\{ \begin{array}{l} A_{jj} = 1 - 4.r_j.c_j, \quad A_{jj-1} = -c_j.(\Delta r + 2.r_j), \quad A_{jj+1} = -c_j.(2.r_j - \Delta r) \\ A_{1j} = 1 - 4.r_j.c_j, \quad A_{1j-1} = -c_j.(\Delta r + 2.r_j), \quad A_{1j+1} = -c_j.(2.r_j - \Delta r) \end{array} \right. \\ & \text{avec } 1 \leq j \leq n-1. \end{aligned}$$

nous obtenons le système matriciel suivant: $AT^{i-1} = A_1T^i$ où i est l'incrémentement du pas de temps.

2. En écrivant les équations de conditions aux limites sous la forme:

$$\begin{aligned} & \left. \left\{ \frac{\partial T}{\partial r} \right\} \right|_{\text{int}} = \beta T_{i,0} + \gamma \\ & \left. \left\{ \frac{\partial T}{\partial r} \right\} \right|_{\text{ext}} = \beta_1 T_{i,n} + \gamma_1 \end{aligned} \quad \text{où les coefficients sont des réels et,}$$

$T_{i,0}$ et $T_{i,n}$ sont respectivement les températures interne et externe des faces de la paroi, nous pouvons discrétiser les équations (Eq.3.36), (Eq.3.37), (Eq.3.38) et

(Eq.3.39) afin d'obtenir les coefficients de la matrice en fonction des points de la frontière.

Les équations discrétisées régissant les conditions aux limites sont les suivantes:

Conditions aux limites intérieures

à l'instant t_i

$$T_{i-1} = -2\Delta r \beta T_{i-1} - 2\Delta r \gamma + T_{i+1}$$

à l'instant t_{i-1}

$$T_{i-1-1} = -2\Delta r \beta T_{i-1-1} - 2\Delta r \gamma + T_{i-1+1}$$

Conditions aux limites extérieures

à l'instant t_i

$$T_{n-1} = 2\Delta r \beta_1 T_{i,n} + 2\Delta r \gamma_1 + T_{i,n-1}$$

à l'instant t_{i-1}

$$T_{i-1,n-1} = 2\Delta r \beta_1 T_{i-1,n} + 2\Delta r \gamma_1 + T_{i-1,n-1}$$

Pour les noeuds correspondant à $j=0$ (frontière intérieure) et $j=n$ (frontière extérieure), l'équation (Eq.3.49) s'écrit:

$j=0$ (face interne)

$$\begin{aligned} T_{i-1,0} \cdot (1 + 4 \cdot r_0 \cdot c_0) - c_0 \cdot (\Delta r + 2 \cdot r_0) \cdot T_{i-1,1} - c_0 \cdot (2 \cdot r_0 - \Delta r) \cdot T_{i+1,1} \\ = c_0 \cdot (2 \cdot r_0 - \Delta r) \cdot T_{i-1} + (1 - 4 \cdot r_0 \cdot c_0) \cdot T_{i,0} + c_j \cdot (\Delta r + 2 \cdot r_0) \cdot T_{i,1} \end{aligned}$$

$j=n$ (face externe)

$$\begin{aligned} T_{i-1,n} \cdot (1 + 4 \cdot r_n \cdot c_n) - c_n \cdot (\Delta r + 2 \cdot r_n) \cdot T_{i+1,n+1} - c_n \cdot (2 \cdot r_n - \Delta r) \cdot T_{i+1,n-1} \\ = c_n \cdot (2 \cdot r_n - \Delta r) \cdot T_{i,n-1} + (1 - 4 \cdot r_n \cdot c_n) \cdot T_{i,n} + c_n \cdot (\Delta r + 2 \cdot r_n) \cdot T_{i,n+1} \end{aligned}$$

En remplaçant T_{i-1} , T_{i-1-1} , $T_{i,n-1}$, $T_{i+1,n-1}$ par leurs expressions dans les équations ci-dessus, nous obtenons les équations (Eq.3.50) et (Eq.3.51)

(Eq.3.50) (frontière intérieure)

$$\left[1 + 4r_0 c_0 + 2 \Delta r \beta c_0 (2r_0 - \Delta r)\right] T_{i+1,0} - 4r_0 c_0 T_{i+1,1} = \left[1 - 4r_0 c_0 - 2 \Delta r \beta c_0 (2r_0 - \Delta r)\right] T_{i,0} + 4r_0 c_0 T_{i,1} - 4 \Delta r c_0 \gamma (2r_0 - \Delta r)$$

(Eq.3.51) (frontière extérieure)

$$\left[1 + 4r_n c_n - 2 \Delta r \beta_1 c_n (2r_n + \Delta r)\right] T_{i+1,n} - 4r_n c_n T_{i+1,n-1} = \left[1 - 4r_n c_n + 2 \Delta r \beta_1 c_n (2r_n + \Delta r)\right] T_{i,n} + 4r_n c_n T_{i,n-1} + 4 \Delta r c_n \gamma_1 (2r_n + \Delta r)$$

où n est le nombre total de subdivisions de l'épaisseur de l'enveloppe.

3. Le regroupement des équations (Eq.3.49), (Eq.3.50) et (Eq.3.51) donne un système $A.T^{i+1} = A1.T^i$ valable pour tous les points du maillage.

Nous avons à résoudre $A.T^{i+1} = A1.T^i$ avec l'incrémentation du pas de temps (1) égal à deux secondes.

Pour une résolution efficace du système, nous avons utilisé la décomposition LU.

IV.3 MODELISATION BIDIMENSIONNELLE

Pour tenir compte du déséquilibre thermique entre les côtés NE et SO de l'habitat, nous allons mettre au point un modèle de simulation bidimensionnel.

Ce modèle tiendra compte du couplage par conduction orthoradiale entre les différents secteurs angulaires de la figure.3.13.

IV.3.1 MAILLAGE BIDIMENSIONNEL

Pour la modélisation bidimensionnelle, chaque secteur angulaire(k) du maillage de la figure.3.12 est muni du maillage régulier de la figure.3.14 •

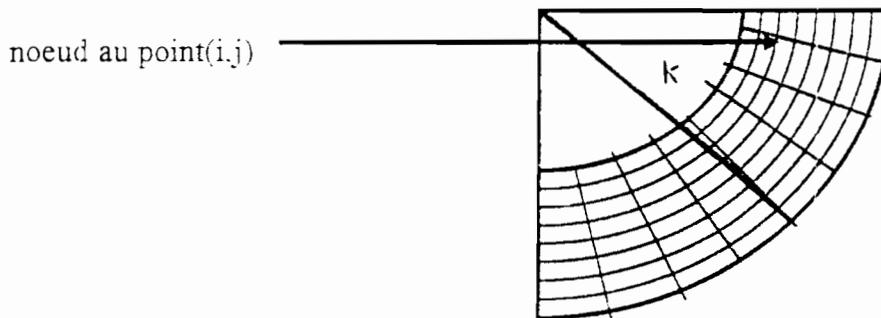


FIGURE.3.14 : Maillage bidimensionnel d'un secteur angulaire (k)

IV.3.2 MODELISATION DE L'EQUATION DE LA CHALEUR

En posant $T(r, \theta, t) = T_{ij}^n$ où i, j, n désignent respectivement les indices d'incrément des pas radial, orthoradial et temps, la discrétisation de l'équation (Eq.3.3) nous donne le schéma suivant:

$$(I) \quad \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta t} = \frac{\alpha}{2r_i^2 \Delta \theta^2 \Delta r^2} \left\{ 2r_i \Delta \theta^2 (T_{i+1,j}^n - 2T_{ij}^n + T_{i-1,j}^n) + r_i \Delta \theta^2 \Delta r (T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n) + 2\Delta r^2 (T_{i+1,j}^n - 2T_{ij}^n + T_{i-1,j}^n) \right\}$$

avec $1 \leq i \leq m-1$ et $1 \leq j \leq m-1$ où m est le nombre total de subdivision de l'épaisseur ou de la longueur de l'arc du secteur angulaire, Δt le pas de temps, $\Delta \theta$ le pas suivant la direction orthoradiale et Δr le pas suivant la direction radiale.

Pour résoudre ce système, nous allons utiliser la méthode de PEACEMAN ou *Alternating-Direction Implicit method (A.D.I)* {62}.

Cette méthode {28} est très utilisée dans le problème de transfert à deux dimensions grâce au fait qu'elle fournit des matrices tridiagonales dans chacune des directions alternées de son schéma numérique; cela conduit à un schéma beaucoup plus efficient.

Elle utilise deux équations de différences finies qui s'exécutent suivant un pas de temps Δt ou $\Delta t/2$. La première est implicite seulement suivant la direction radiale et la seconde suivant la direction orthoradiale.

Elle se caractérise par une stabilité quelque soit le pas de temps ou d'espace.

Pour aboutir au schéma numérique de notre modèle, l'intervalle de temps Δt sera divisé en deux intervalles égaux de longueur $\frac{\Delta t}{2}$. De ce fait, en posant

$$n_i = \frac{n}{2} \text{ et } B_i = \frac{a \Delta t}{2r_i^2 \Delta\theta^2 \Delta r^2} \text{ nous aurons les deux systèmes suivants}$$

$$(1) 2.(T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n) = B_i \{ r_i \Delta\theta^2 (2 + \Delta r) T_{i-1j}^{n+1} - 4 r_i \Delta\theta^2 T_{ij}^{n+1} + r_i \Delta\theta^2 (2 - \Delta r) T_{i+1j}^{n+1} - 2 \Delta r^2 T_{ij-1}^n - 4 \Delta r^2 T_{ij}^n + 2 \Delta r^2 T_{ij+1}^n \}$$

$$(2) 2.(T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^{n+1/2}) = B_i \{ r_i \Delta\theta^2 (2 + \Delta r) T_{i-1j}^{n+1} - 4 r_i \Delta\theta^2 T_{ij}^{n+1} + r_i \Delta\theta^2 (2 - \Delta r) T_{i+1j}^{n+1} - 2 \Delta r^2 T_{ij-1}^{n+1/2} - 4 \Delta r^2 T_{ij}^{n+1/2} + 2 \Delta r^2 T_{ij+1}^{n+1/2} \}$$

Pour des points intérieurs au maillage la résolution se fait de la manière suivante:

** Résolution suivant la direction radiale*

Pour chaque secteur angulaire (k) tel que $1 \leq k \leq p$ et où p est le nombre total de secteur angulaire, nous devons résoudre le système tridiagonal suivant:

$$\begin{aligned} \text{(Eq.3.52)} \quad & - r_i \Delta\theta^2 (2 + \Delta r) T_{i-1j}^{n+1} + \left(\frac{2}{B_i} + 4 r_i \Delta\theta^2 \right) T_{ij}^{n+1} \\ & - r_i \Delta\theta^2 (2 - \Delta r) T_{i+1j}^{n+1} = 2 \Delta r^2 T_{ij-1}^n + \left(\frac{2}{B_i} - 4 \Delta r^2 \right) T_{ij}^n + 2 \Delta r^2 T_{ij+1}^n \\ & \text{avec } 1 \leq i \leq m-1 \end{aligned}$$

* Résolution suivant la direction orthoradiale

Il faut compléter le système précédent par la résolution de p autres systèmes tridiagonaux tels que pour chaque (k) avec $1 \leq k \leq p$ nous avons l'équation (Eq.3.53)

$$\begin{aligned}
 \text{(Eq.3.53)} \quad & -2 \cdot \Delta r^2 \cdot T_{ij}^{n+1} + \left(\frac{2}{B_i} + 4 \cdot \Delta r^2 \right) \cdot T_{ij}^{n+1} - 2 \cdot \Delta r^2 \cdot T_{ij}^{n+1} = \\
 & = r_i \cdot \Delta \theta^2 \cdot (2 - \Delta r) \cdot T_{i,j}^{n+1} + \left(\frac{2}{B_i} - 4 \cdot r_i \cdot \Delta \theta^2 \right) \cdot T_{ij}^n + r_i \cdot \Delta \theta^2 \cdot (2 + \Delta r) \cdot T_{i-1,j}^{n+1} \\
 & \text{avec } 1 \leq j \leq m-1
 \end{aligned}$$

La résolution de ces $(m-1)^2$ équations pour un secteur angulaire (k) avec $1 \leq k \leq p$ doit se faire aussi bien pour le toit que pour le mur.

IV.3.3 RECHERCHE DES TEMPÉRATURES FRONTIÈRES

a) GENERALITES

Dans les problèmes de transfert de chaleur [28] les équations de conditions aux limites sont du type:

$$\begin{aligned}
 \phi &= f_1(\bar{x}) \text{ sur } S_1 \text{ (condition de Dirichlet)} \\
 \frac{\partial \phi}{\partial n} &= f_2(\bar{x}) \text{ sur } S_2 \text{ (condition de Newmann)} \\
 a(\bar{x}) + b(\bar{x}) \frac{\partial \phi}{\partial n} &= f_3(\bar{x}) \text{ sur } S_3 \text{ (condition aux limites mixtes)}
 \end{aligned}$$

où S_1, S_2, S_3 sont trois zones séparées sur la surface frontière S (figure.3.15) et \bar{x} un vecteur de coordonnées (x,y,z) dans un repère cartésien, $\frac{\partial}{\partial n}$ désigne la dérivée suivant la direction normale à la frontière, f_1, f_2, f_3 a, b sont des fonctions arbitraires.

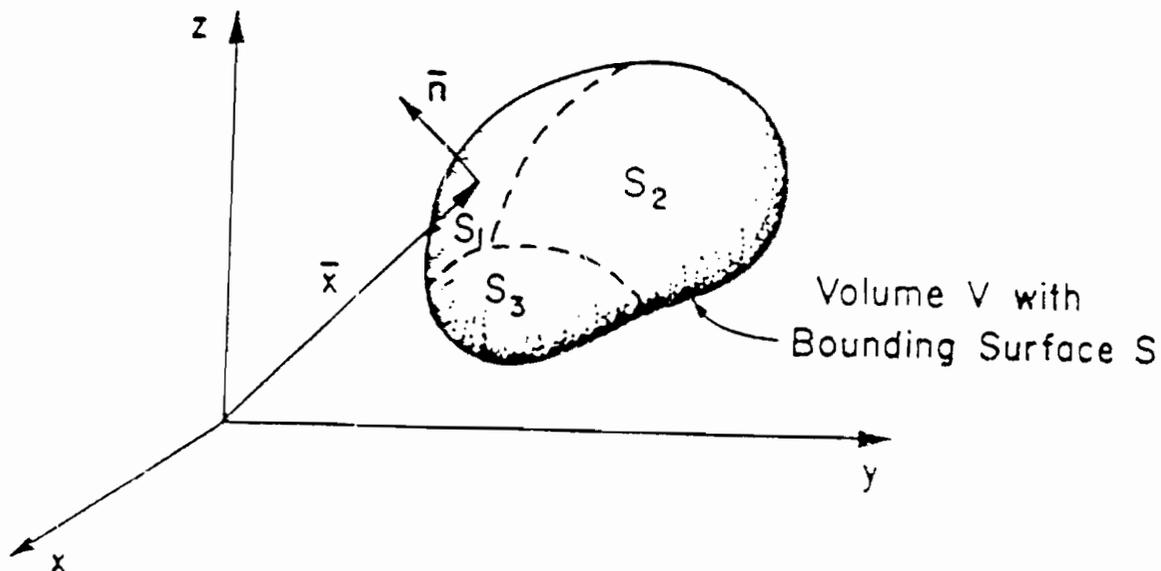


FIGURE.3. 15 : Schématisation des différentes surfaces sur lesquelles les conditions aux limites peuvent exister.

Dans les problèmes de transfert de chaleur{28} les conditions de Dirichlet ou de Newmann se posent dans les équations de condition aux limites si respectivement les températures ou les flux sont donnés à la frontière. Ces conditions sont posées à la frontière extérieure de la zone conductrice ou entre la frontière du solide et le fluide environnant.

Les conditions mixtes interviennent surtout dans le cas où la conduction est couplée avec les échanges de convection par exemple à la surface.

Etant donné que le couplage de transfert de chaleur entre deux secteurs angulaires (k) et (k_1) ou (k) et (k_2) est supposé se faire essentiellement par conduction orthoradiale au sein du matériau, il nous est difficile de nous mettre dans

l'une quelconque des conditions ci-dessus; ainsi, nous allons utiliser la méthode de la variation de l'énergie interne d'un élément de volume.

b) METHODE DE LA VARIATION DE L'ENERGIE INTERNE

La méthode de la variation de l'énergie interne d'un élément de volume est une méthode entièrement physique à la différence de la méthode des différences finies qui est une méthode mathématique.

Cette méthode consiste à appliquer à un élément de volume sans source interne de chaleur et centré en un noeud (i,j) interne au maillage l'équation (Eq.3.54) conformément à la figure.3.16.

$$(Eq.3.54) \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta r \Delta \theta} T d\theta dr = \left(\int_{r_1}^{r_2} \frac{\partial T}{\partial r} d\theta - \int_{r_2}^{r_1} \frac{\partial T}{\partial r} d\theta \right) + \left(\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\partial T}{\partial \theta} dr - \int_{\theta_2}^{\theta_1} \frac{\partial T}{\partial \theta} dr \right)$$

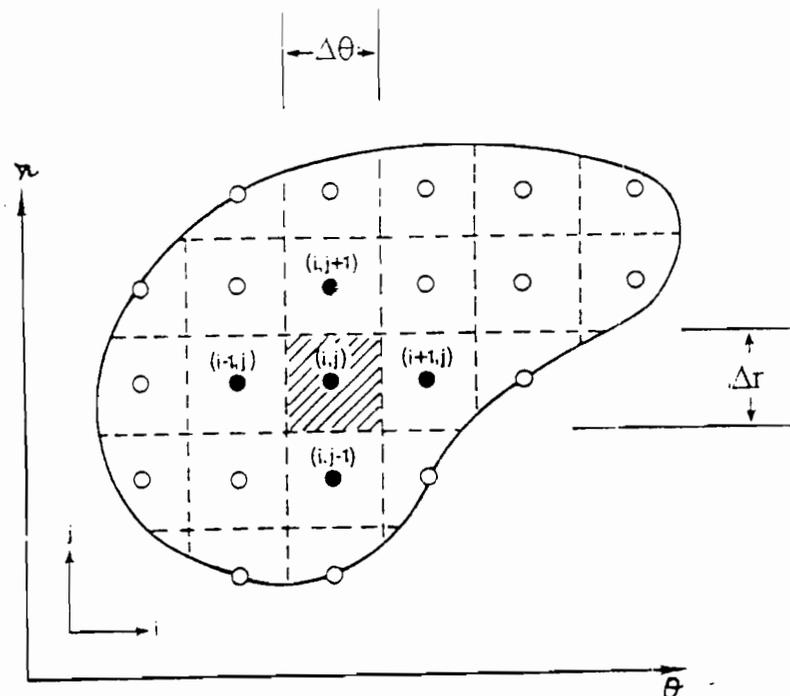


FIGURE.316: représentation d'un élément de volume interne au maillage{28}

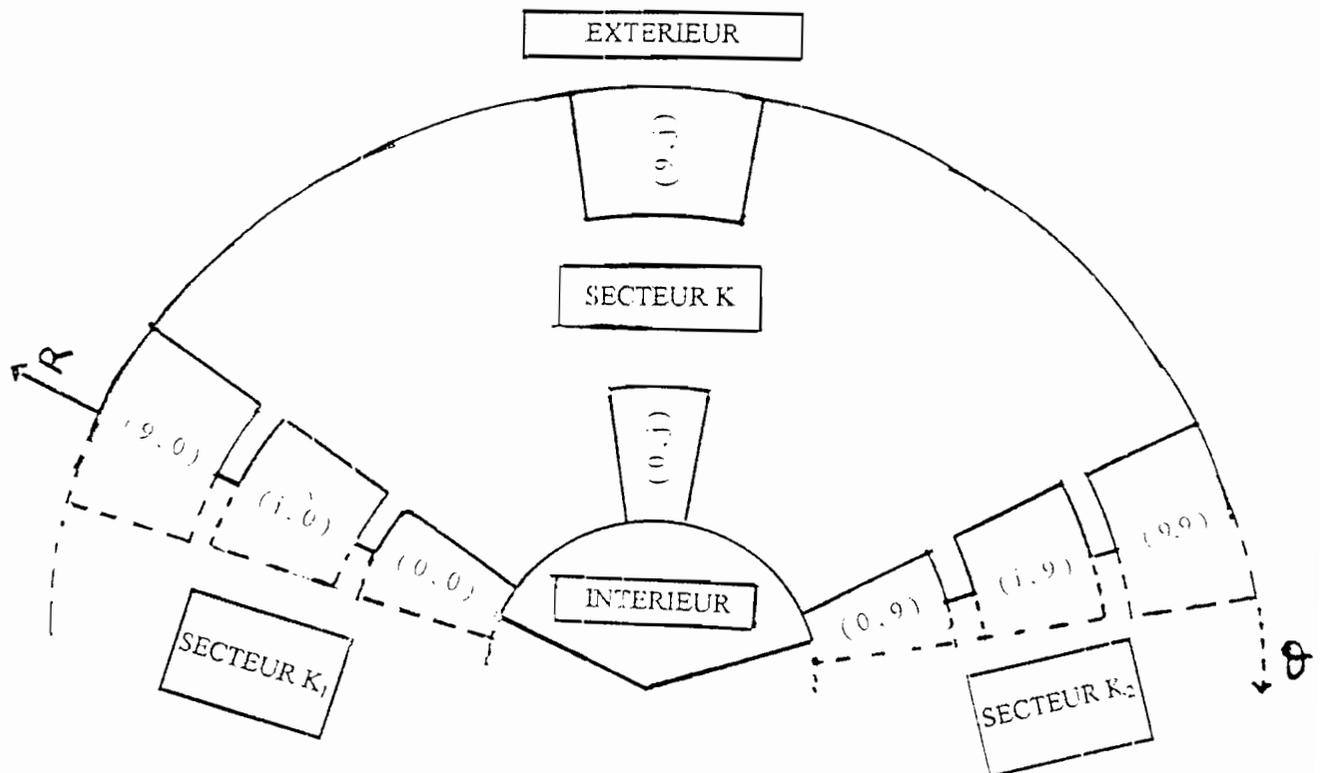


FIGURE.3.17: Schématisation des différents éléments de volume à la frontière du maillage

Pour une profondeur unité dans la direction $(0,z)$, les intégrales sont évaluées sur un volume $\Delta r.\Delta\theta.(1)$ et sur des surfaces $\Delta r.(1)$ et $\Delta\theta.(1)$ du volume de contrôle.

Les différents éléments de volume utilisés sont donnés par la figure.3.17.

Ces différents éléments sont centrés aux noeuds du maillage de telle sorte que pour une épaisseur unité suivant la direction (o,Z) le volume élémentaire s'écrit: $\Delta r. \Delta \theta$.

L'indice i est suivant la direction radiale et l'indice j suivant la direction orthoradiale de manière à ce que les différentes frontières soient définies par le tableau.3.3

TABLEAU.3.3 : Identification des frontières d'un secteur angulaire par les indices

Indice	Correspondance
$i=0$	frontière intérieure du secteur k
$i=9$	frontière extérieure du secteur k
$j=0$	frontière commune aux secteurs k et k_1
$j=9$	frontière commune aux secteurs k et k_2

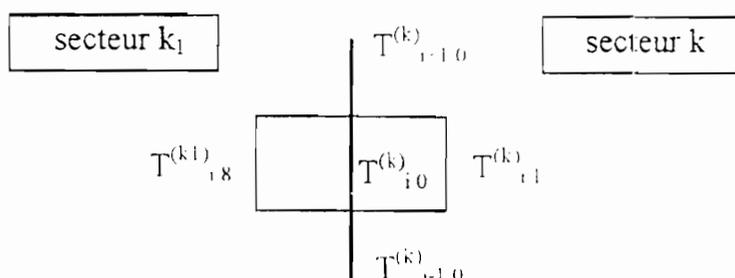
C) EQUATIONS DE CONDITION AUX LIMITES

C-1 ÉQUATION DE CONDITION AUX LIMITES POUR UN NOEUD DE L'AXE (o,r)

C-1.1 Noeud commun aux secteurs k_1 et k : $j = 0$ et $1 \leq i \leq 8$

Si nous appelons k le secteur angulaire étudié, n l'instant considéré, (i,j) le noeud choisi, la température en ce noeud sera désignée par $T_{ij}^{(k)n}$.

L'application de l'équation (Eq.3.54) au noeud $(i,0)$ donne l'équation (Eq.3.55) permettant l'obtention de la température $T_{i0}^{(k)n+1}$ à l'instant $(n+1)$ connaissant cette température à l'instant (n) .



(Eq.3.55)

$$a \frac{\Delta t}{\Delta \theta \Delta r} \left\{ \frac{\Delta r}{\Delta \theta} (T_{i1}^{(k)n} + T_{i8}^{(k1)m}) + \frac{\Delta \theta}{\Delta r} (T_{i+10}^{(k)m} + T_{i-10}^{(k)m}) - 2 \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta r} + \frac{\Delta r}{\Delta \theta} \right) T_{i0}^{(k)m} \right\} = T_{i0}^{(k)m+1} - T_{i0}^{(k)m}$$

En procédant de la même manière nous obtenons les équations qui régissent l'évolution temporelle des températures des différents noeuds à la frontière du maillage.

C-1.2 Noeud commun aux secteurs k et k₂: j = 9 et 1 ≤ i ≤ 8

(Eq.3.56)

$$a \frac{\Delta t}{\Delta \theta \Delta r} \left\{ \frac{\Delta r}{\Delta \theta} (T_{i8}^{(k)n} + T_{i1}^{(k2)m}) + \frac{\Delta \theta}{\Delta r} (T_{i+10}^{(k)m} + T_{i+19}^{(k)m}) - 2 \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta r} + \frac{\Delta r}{\Delta \theta} \right) T_{i9}^{(k)m} \right\} = T_{i9}^{(k)m+1} - T_{i9}^{(k)m}$$

C-2 ÉQUATION DE CONDITION AUX LIMITES POUR UN NOEUD DE L'AXE(0, θ)

C-2.1 Noeud de la frontière intérieure: i = 0 et 1 ≤ j ≤ 8

(Eq.3.57)

$$2a \frac{\Delta t}{\Delta \theta \Delta r} \left\{ -\frac{\Delta \theta \phi_i^{(k)n}}{\lambda} + \frac{\Delta \theta}{\Delta r} (T_{1j}^{(k)n} - T_{0j}^{(k)m}) + \frac{\Delta r}{2\Delta \theta} (T_{0j-1}^{(k)m} + T_{0j+1}^{(k)m}) - \frac{\Delta r}{\Delta \theta} T_{0j}^{(k)m} \right\} = T_{0j}^{(k)m+1} - T_{0j}^{(k)m}$$

C-2.2 Noeud de la frontière extérieure: i = 9 et 1 ≤ j ≤ 8

(Eq.3.58)

$$-a \frac{\Delta r}{\Delta \theta \Delta r} \left\{ \frac{\Delta \theta \phi_i^{(k)m}}{\lambda} + \frac{\Delta \theta}{\Delta r} (T_{8j}^{(k)m} - T_{0j}^{(k)m}) + \frac{\Delta r}{2\Delta \theta} (T_{0j-1}^{(k)m} + T_{0j+1}^{(k)m}) - \frac{\Delta r}{\Delta \theta} T_{0j}^{(k)m} \right\} = T_{0j}^{(k)m+1} - T_{0j}^{(k)m}$$

C-3 ÉQUATION DE CONDITION AUX LIMITES POUR LE NOEUD (0,0)

(Eq.3.59)

$$2\alpha \frac{\Delta r}{\Delta\theta\Delta r} \left\{ -\frac{\Delta\theta(\phi_i^{(k1)m} - \phi_i^{(k)m})}{2\lambda} + \frac{\Delta\theta}{\Delta r}(T_{10}^{(k)m} - T_{00}^{(k)n}) - \frac{\Delta r}{2\Delta\theta}(T_{08}^{(k1)n} + T_{01}^{(k)n}) - \frac{\Delta r}{\Delta\theta}T_{00}^{(k)n} \right\} = T_{00}^{(k)m+1} - T_{00}^{(k)m}$$

C-4 ÉQUATION DE CONDITION AUX LIMITES POUR LE NOEUD (9,0)

(Eq.3.60)

$$2\alpha \frac{\Delta r}{\Delta\theta\Delta r} \left\{ \frac{\Delta\theta(\phi_e^{(k1)m} + \phi_e^{(k)m})}{2\lambda} - \frac{\Delta\theta}{\Delta r}(T_{80}^{(k)m} - T_{90}^{(k)m}) - \frac{\Delta r}{2\Delta\theta}(T_{91}^{(k)m} - T_{98}^{(k1)m}) - \frac{\Delta r}{\Delta\theta}T_{90}^{(k)m} \right\} = T_{90}^{(k)m-1} - T_{90}^{(k)m}$$

C-5 ÉQUATION DE CONDITION AUX LIMITES POUR LE NOEUD (0,9)

(Eq.3.61)

$$2\alpha \frac{\Delta r}{\Delta\theta\Delta r} \left\{ -\frac{\Delta\theta(\phi_i^{(k2)m} - \phi_i^{(k)m})}{2\lambda} - \frac{\Delta\theta}{\Delta r}(T_{90}^{(k)m} - T_{09}^{(k)n}) - \frac{\Delta r}{2\Delta\theta}(T_{08}^{(k)m} + T_{01}^{(k2)m}) - \frac{\Delta r}{\Delta\theta}T_{09}^{(k)n} \right\} = T_{09}^{(k)m+1} - T_{09}^{(k)m}$$

C-6 ÉQUATION DE CONDITION AUX LIMITES POUR LE NOEUD (9,9)

(Eq.3.62)

$$2\alpha \frac{\Delta r}{\Delta\theta\Delta r} \left\{ \frac{\Delta\theta(\phi_e^{(k2)m} + \phi_e^{(k)m})}{2\lambda} + \frac{\Delta\theta}{\Delta r}(T_{89}^{(k)n} - T_{99}^{(k)n}) + \frac{\Delta r}{2\Delta\theta}(T_{98}^{(k)n} + T_{91}^{(k2)n}) - \frac{\Delta r}{\Delta\theta}T_{99}^{(k)n} \right\} = T_{99}^{(k)n+1} - T_{99}^{(k)n}$$

Dans ces équations les flux $\phi_i^{(k)n}$ et $\phi_e^{(k)n}$ représentent la somme de tous les échanges s'effectuant sur la face interne et externe du secteur angulaire k au temps n.

V CONCLUSION

Le but d'un modèle prévisionnel est de pouvoir traduire la réponse de l'expérience mais aussi d'apporter des améliorations aux réponses expérimentales tout en évitant les contraintes d'une nouvelle mesure en site réel.

C'est pourquoi, après la modélisation de la case en géobéton, nous allons consacrer le dernier chapitre à la validation et à l'exploitation du modèle numérique mis en place.

I INTRODUCTION

La validation est une étape importante, essentielle dans le processus d'élaboration d'un code de calcul. Cette remarque prend d'autant plus d'importance que le code est basé sur des hypothèses simplificatrices{63}.

La procédure de validation de notre modèle de simulation est la comparaison expérimentale c'est à dire que les prédictions du modèle sont comparées aux résultats expérimentaux provenant des mesures réalisées sur l'habitat en ambiance réelle..

Une fois le modèle validé, nous nous en servons pour essayer de résoudre ou amoindrir l'inconfort thermique dû à la nature du matériau de la toiture et à l'insuffisance de la ventilation naturelle dans l'habitat expérimental.

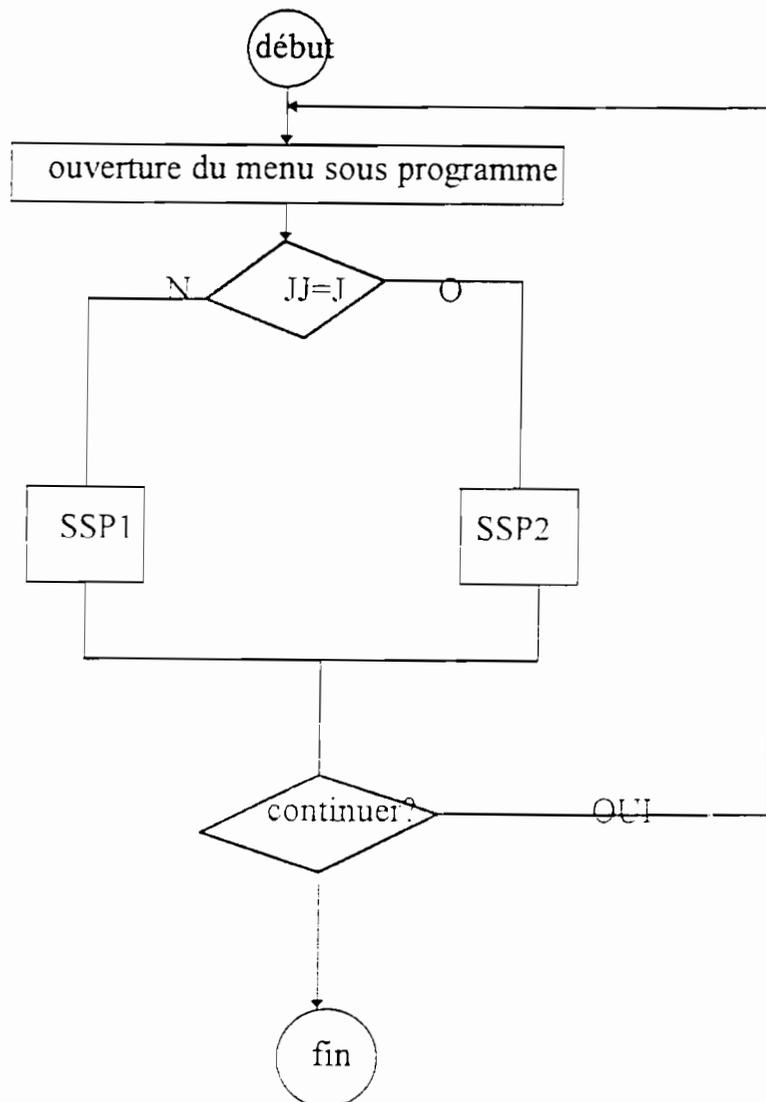
II VALIDATION

La validation nécessite les étapes suivantes{36}: la détermination des températures théoriques, l'obtention des courbes théoriques et la validation.

II.1 DETERMINATION DES TEMPERATURES THEORIQUES

II.1.1 CAS DU MODELE UNIDIMENSIONNEL

Pour l'obtention des températures théoriques à partir du modèle unidimensionnel, nous avons utilisé un programme dont l'organigramme se présente de la manière suivante:

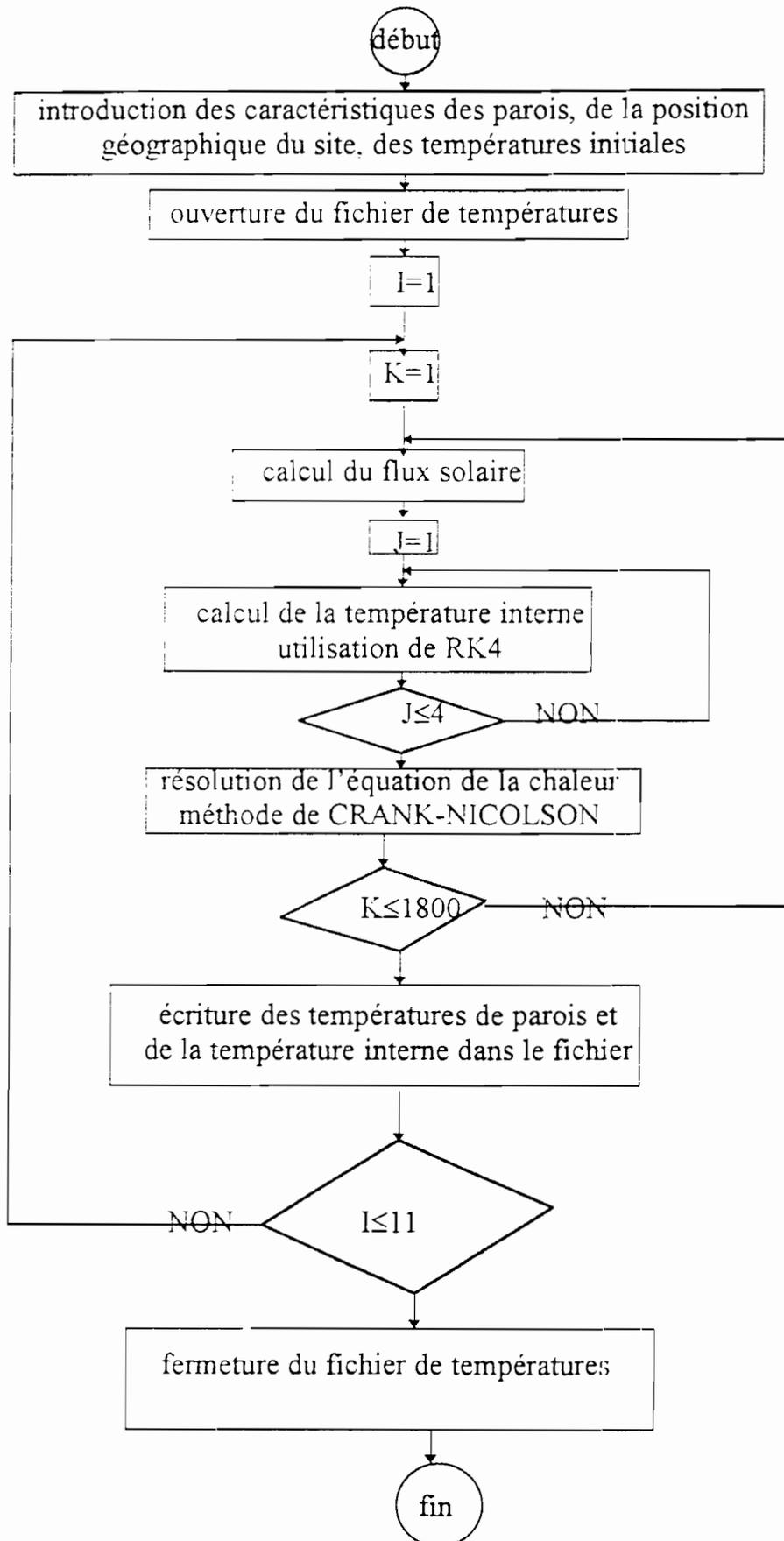


La variable JJ permet de faire un choix entre le traitement diurne désigné par la lettre J et le traitement nocturne désigné par une lettre différente de J.

Le dernier test de l'organigramme permet le traitement de plusieurs journées de mesures.

Les sous programmes SSP1 et SSP2 désignent respectivement les sous programmes de traitement nocturne et diurne.

Le sous programme SSP2 permettant l'obtention des températures théoriques diurnes est basé sur l'organigramme ci-dessous.



La variable I désigne le pas horaire d'incrémentation du temps: elle varie de un (1) à onze (11) pour une journée allant de 7^h à 18^h.

La variable J désigne le pas d'exécution de la méthode RK4; la variable K est l'incrémentation du temps correspondant à une durée de deux secondes (2s); cette variable permet l'obtention des températures théoriques horaires.

L'obtention des températures théoriques se fait par exécution des différentes itérations des équations discrétisées.

Pour exécuter les différentes itérations des équations discrétisées, nous prenons des pas de temps très petits afin de tenir compte des phénomènes physiques. Ainsi l'obtention des valeurs approchées des températures expérimentales nécessite mille huit cents (1800) itérations pour des pas d'exécution de deux secondes (2s).

Pour l'exécution du logiciel mis en place, nous avons utilisé le système RISC/600 du Centre d'Informatique Régional de Côte d'Ivoire (C.I.R.C.I.).

Il y a lieu de souligner le gain énorme de temps dû à un système aussi performant. Car pour une exécution de pas itératifs de cinq secondes (5s) un micro-ordinateur type 386 mettra quinze minutes (15 mn) alors que le système RISC/600 met environ trois secondes (3s).

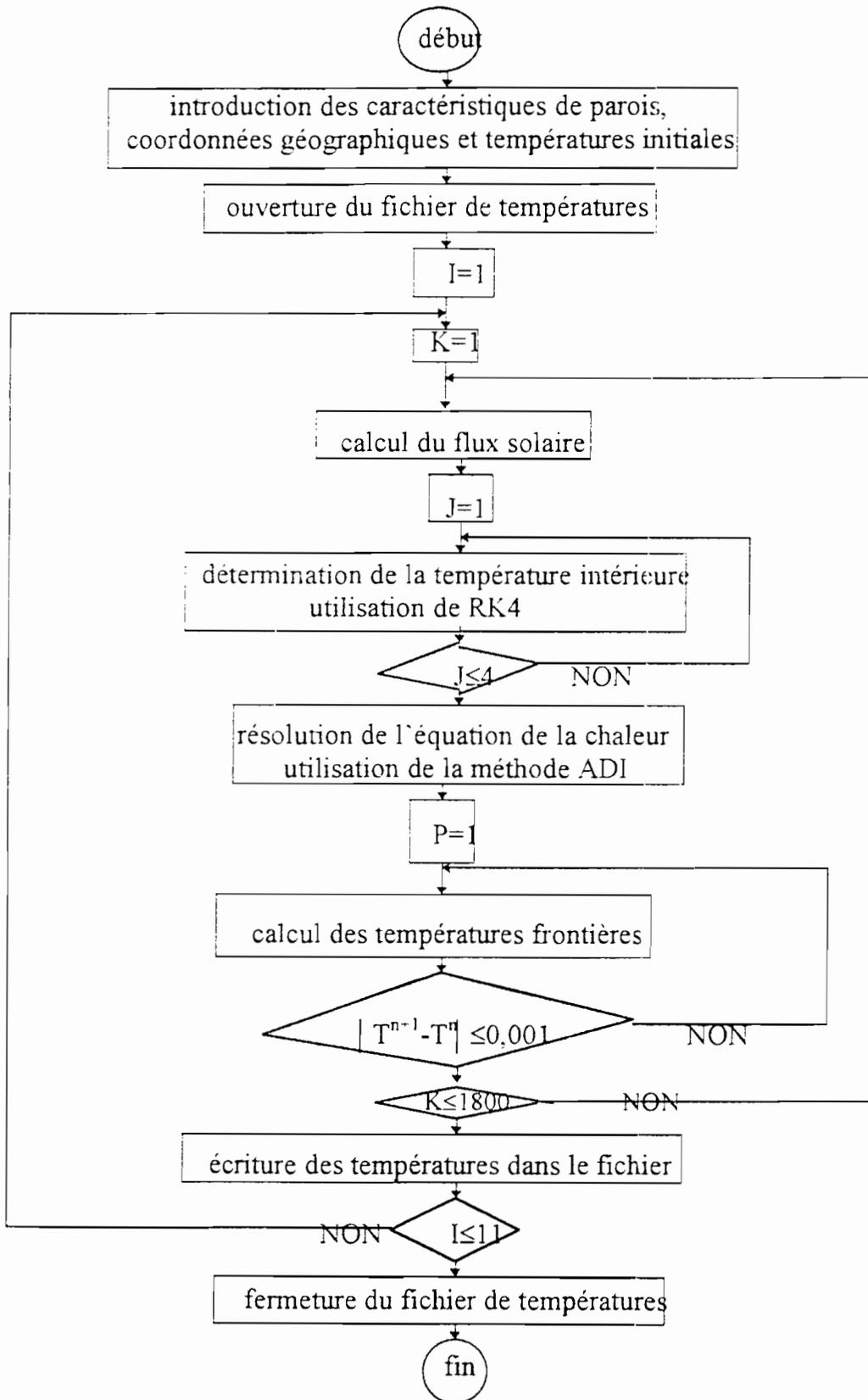
Ce gain énorme de temps a permis la mise en route du logiciel bidimensionnel de simulation dans des proportions de temps inespérées.

Dans le paragraphe suivant nous donnons la méthode utilisée pour l'obtention des températures théoriques bidimensionnelles.

II.1.2 CAS DU MODELE BIDIMENSIONNEL

Un programme de simulation conçu à partir des équations de modélisation numérique bidimensionnelle permettra la détermination des températures théoriques.

L'organigramme du sous programme de traitement diurne est le suivant:



La variable I désigne le pas horaire d'incrémentation du temps. Elle varie de un (1) à onze (11) pour une journée allant de 7^h à 18^h.

La variable J désigne le pas d'exécution de la méthode RK4; la variable K est l'incrémentation du temps correspondant à une durée de deux secondes (2s); cette variable permet l'obtention des températures théoriques horaires.

La variable P donne le nombre d'itération au bout duquel la méthode explicite converge pour une précision de 10^{-3} .

Le temps d'exécution du programme sur le système RISC/6000 est de deux minutes (2 mn) pour un pas itératif de deux secondes (2s). Un micro-ordinateur type 386 mettra environ trente minutes (30 mn) pour un même pas itératif.

II.2 COURBES THEORIQUES

De façon générale les résultats d'un programme de simulation sont traduits par des courbes qui permettent de mieux exprimer les différentes variations et les tendances des données obtenues.

Les figures.4.1.a-c et les figures.4.2.a-c donnent l'évolution temporelle de la température théorique interne de l'habitat respectivement pour les modèles unidimensionnel et bidimensionnel.

L'analyse de ces courbes montre un fort taux d'inconfort thermique de l'habitat à cause des valeurs élevées des températures.

Il ressort aussi de ces courbes, la grande inertie de l'enveloppe; en effet la persistance de la température élevée à la tombée du jour montre la lenteur d'évacuation de la chaleur par les parois.

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

Simulation unidimensionnelle

Variation de la température interne théorique

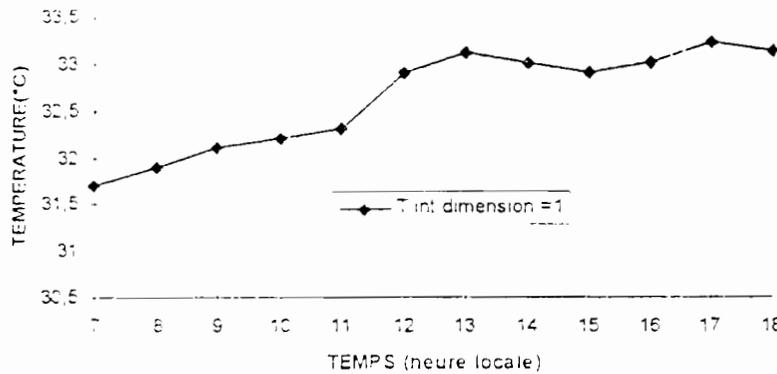


FIGURE.4.1.a: Evolution temporelle de la température interne

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

Simulation unidimensionnelle

Variation de la température interne théorique

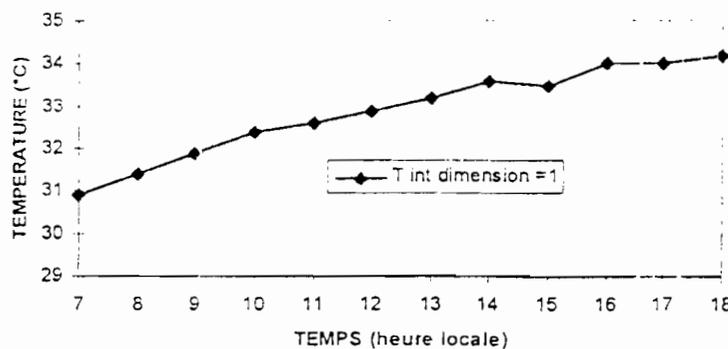


FIGURE.4.1.b: Evolution temporelle de la température interne

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

Simulation unidimensionnelle

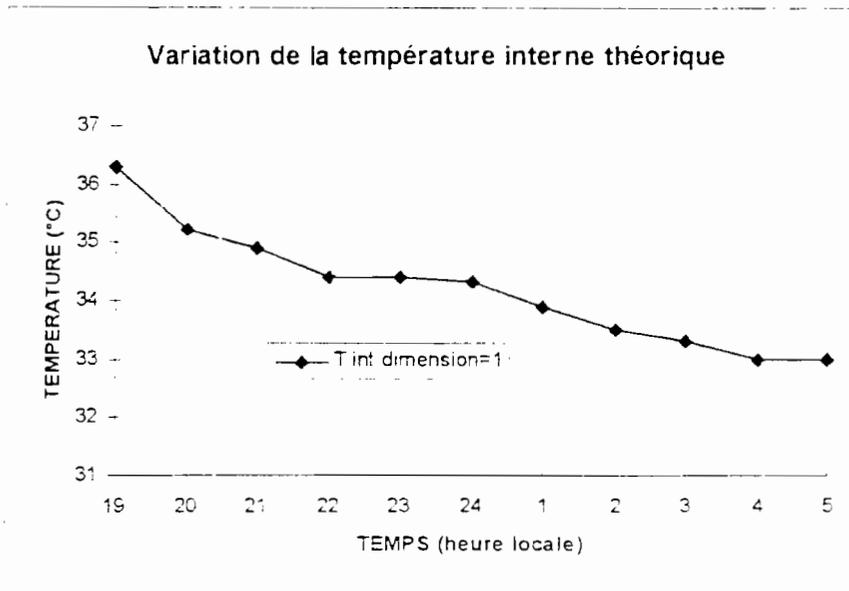


FIGURE.4.1.c: Evolution temporelle de la température interne

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

Simulation bidimensionnelle

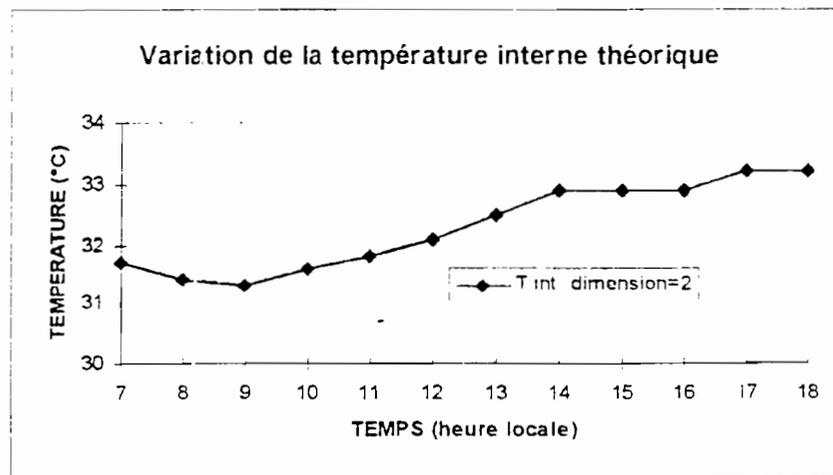


FIGURE.4.2.a: Evolution temporelle de la température interne

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

Simulation bidimensionnelle

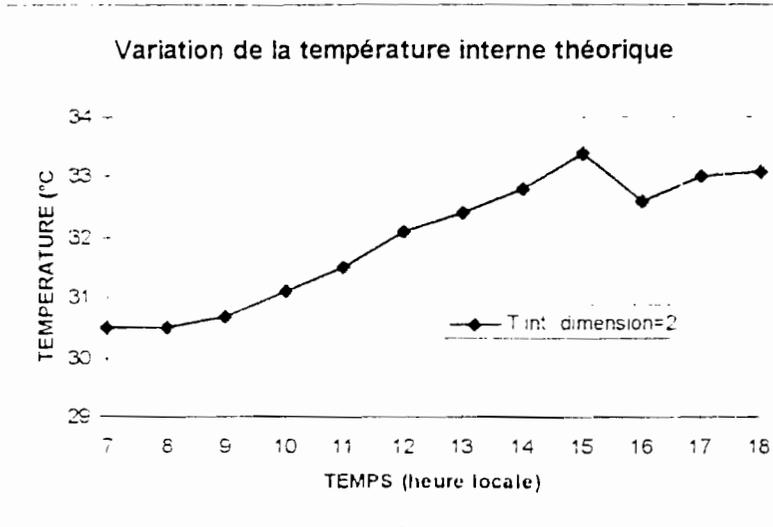


FIGURE.4.2.b: Evolution temporelle de la température interne

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

Simulation bidimensionnelle

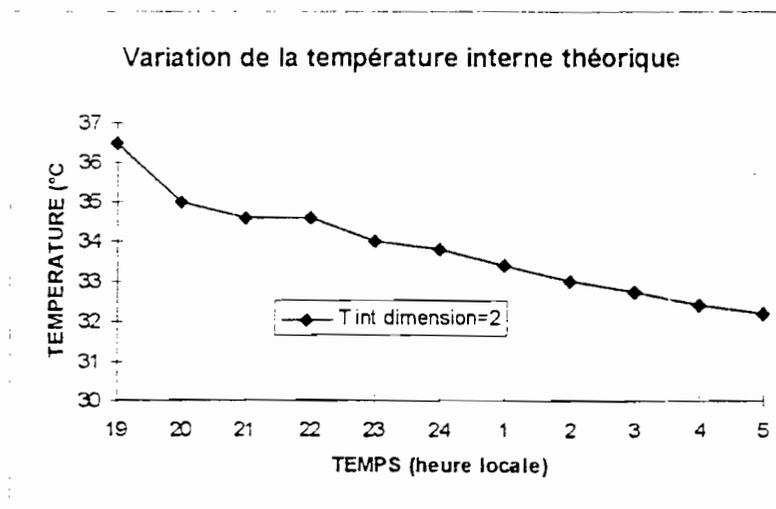


FIGURE.4.2.c: Evolution temporelle de la température interne

II.3 VALIDATION

II.3.1 CAS DU MODELE UNIDIMENSIONNEL

L'analyse des courbes de la figure.4.3 montre une bonne concordance entre la théorie et l'expérience; les plus grands écarts sont observés sur le côté Sud-Ouest de l'habitat.

Sur la figure.4.3.a-1, entre 9^h et 11^h, nous observons un écart notable entre la théorie et l'expérience.

Nous observons sur les figures.4.3.a-2 et 4.3.a-7 un déphasage entre les réponses théoriques et expérimentales.

On s'aperçoit aussi que la compatibilité théorie/expérience est meilleure à l'extérieur qu'à l'intérieur des faces des parois.

Les écarts maximums enregistrés pour les températures des parois de l'enveloppe sont les suivants:

- ◆ 6% pour la journée du 23/09/88 (figure.4.3.a-3 à 10^h),
- ◆ 5,7% pour la journée du 26/09/88 (figure.4.3.b-5 à 16^h),
- ◆ 8% pour la nuit du 8-9/10/88(figure.4.3.c-3 à 5^h).

L'évolution de la température interne de l'habitat montre une bonne concordance entre la théorie et l'expérience.

Les écarts maximums enregistrés sont les suivants:

- ◆ 2,1% pour la journée du 23/09/88 (figure.4.3.a-8 à 10^h),
- ◆ 5% pour la journée du 26/09/88 (figure.4.3.b-8 à 18^h),
- ◆ 2,8% pour la nuit du 8-9/10/88(figure.4.3.c-8 à 22^h).

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

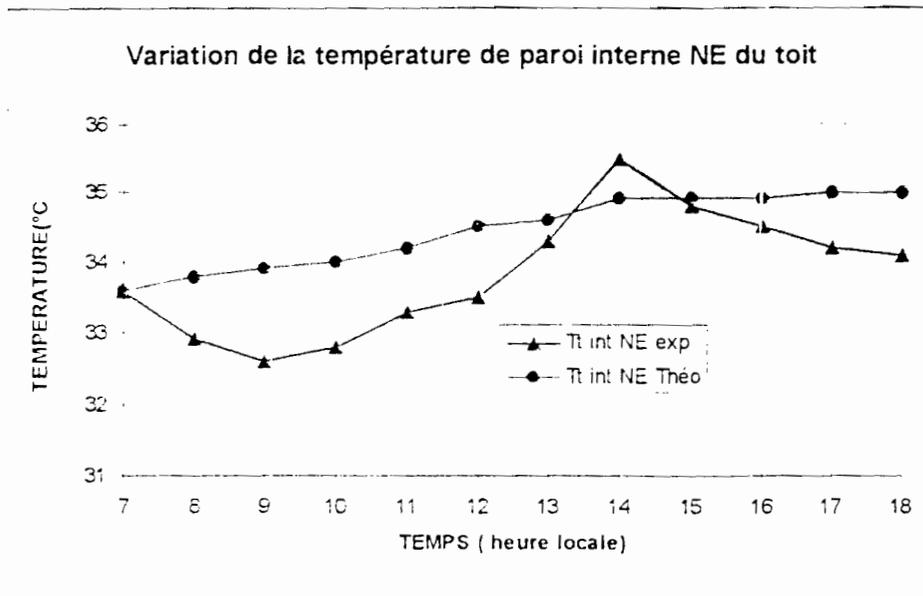


FIGURE.4.3.a-1: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

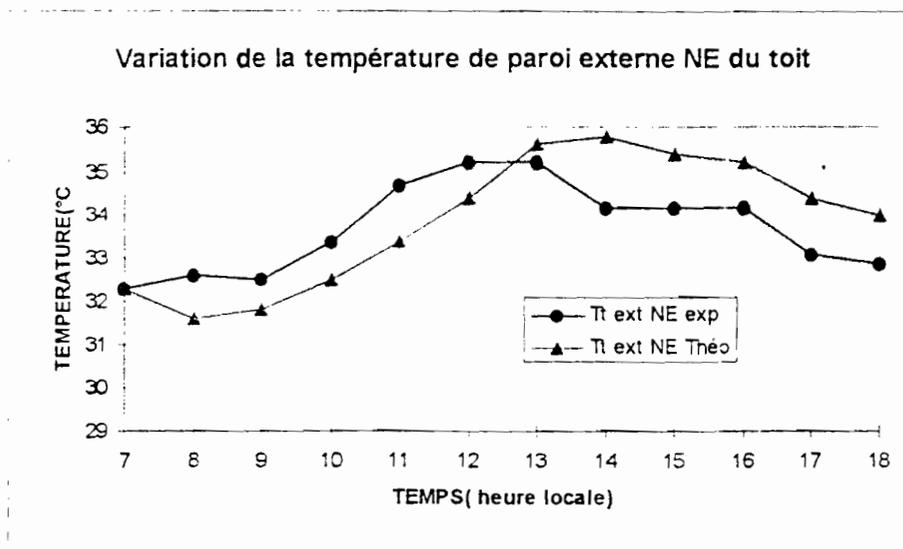


FIGURE.4.3.a-2: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

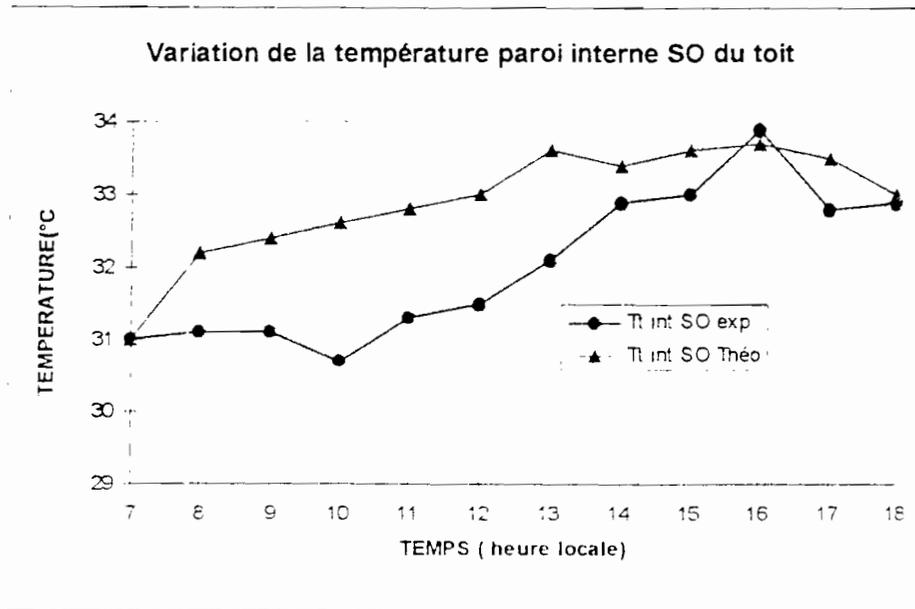


FIGURE.4.3.a-3: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

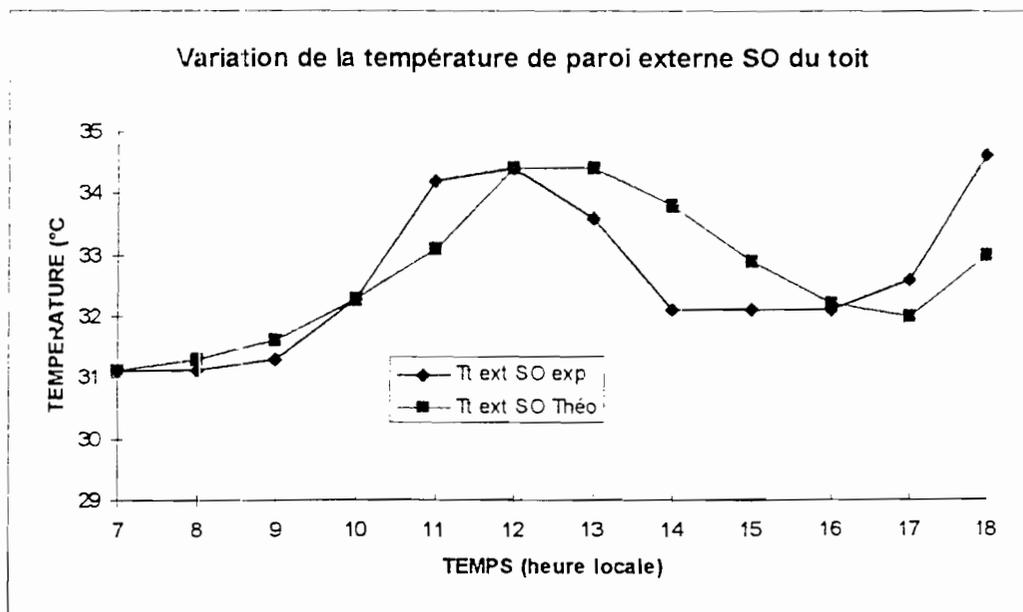


FIGURE.4.3.a-4: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

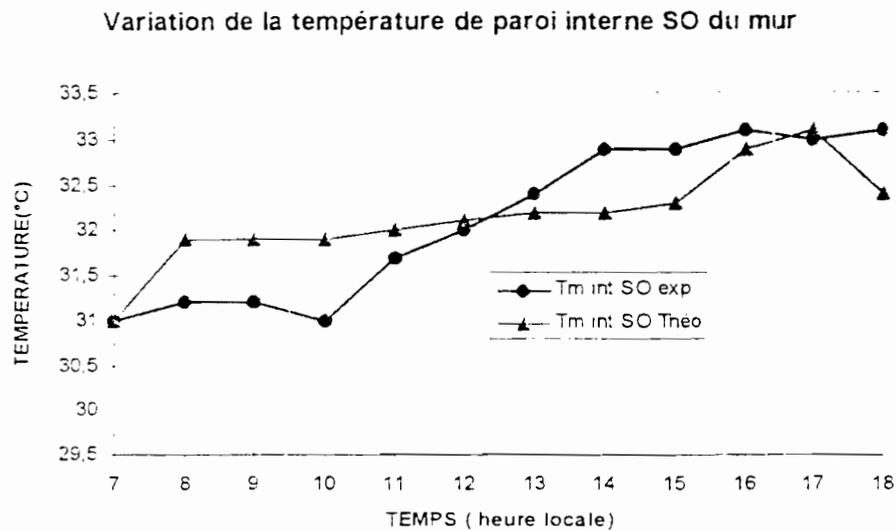


FIGURE.4.3.a-5: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

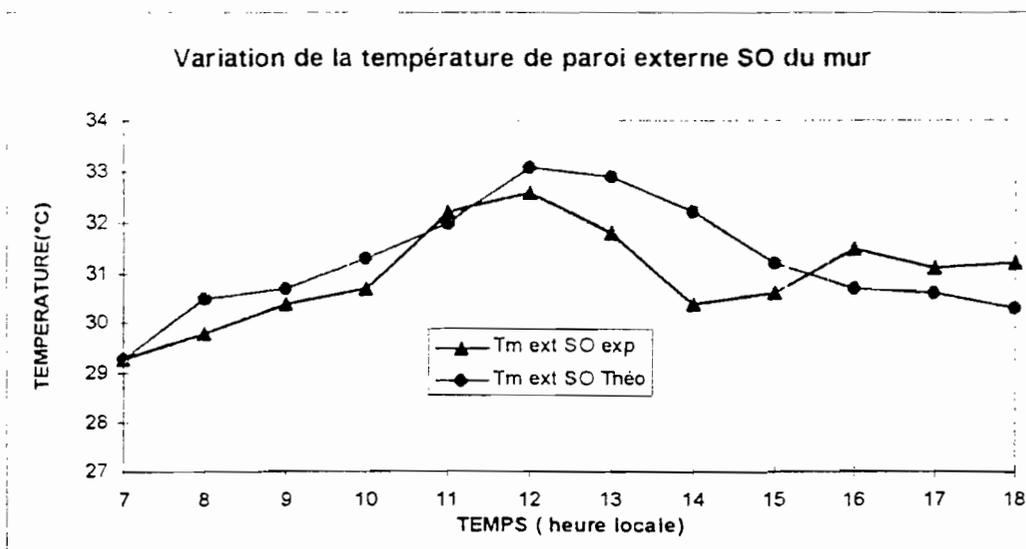


FIGURE.4.3.a-6: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

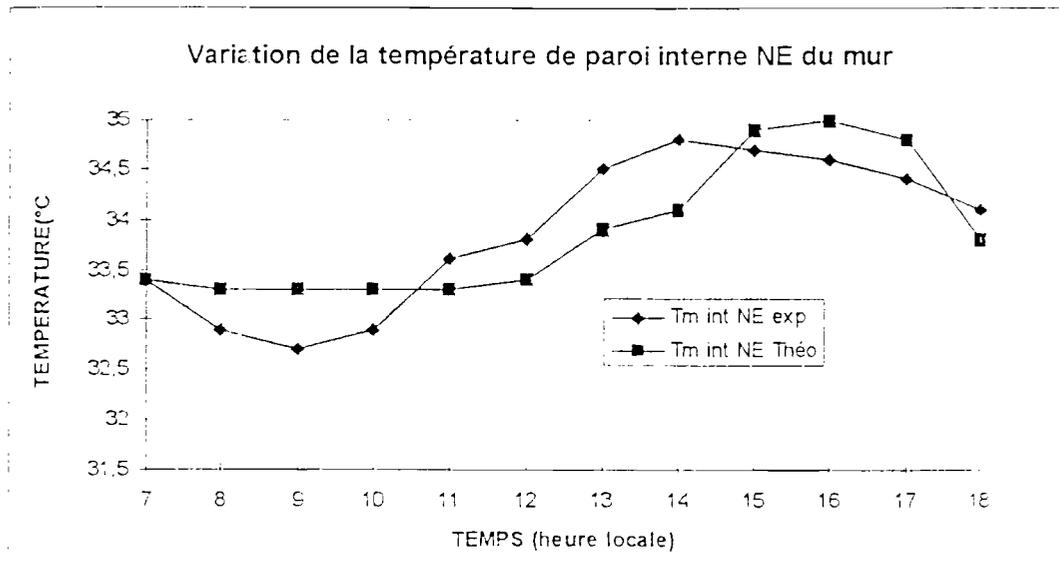


FIGURE.4.3.a-7: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

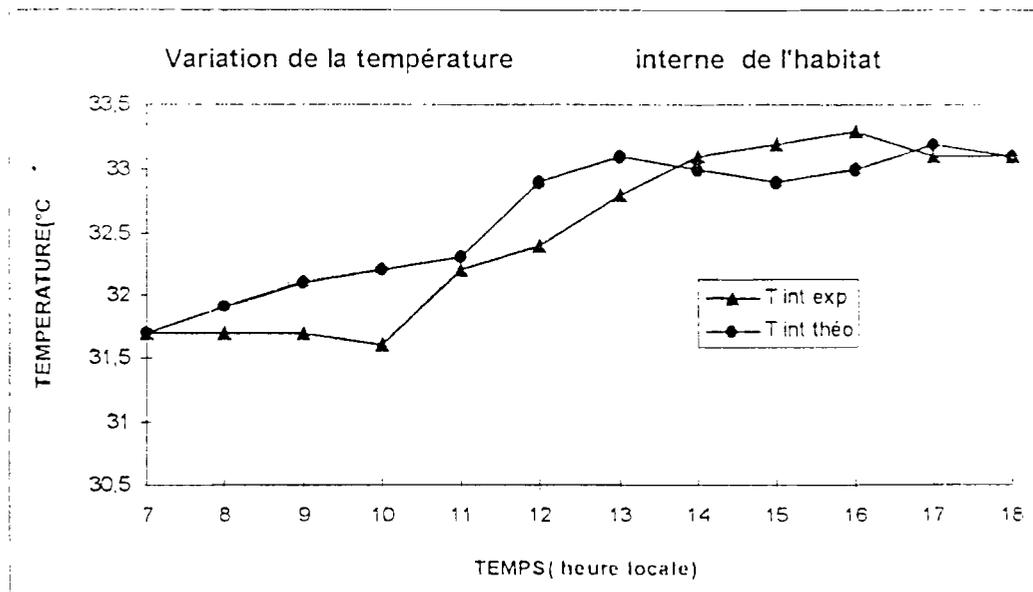


FIGURE.4.3.a-8: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

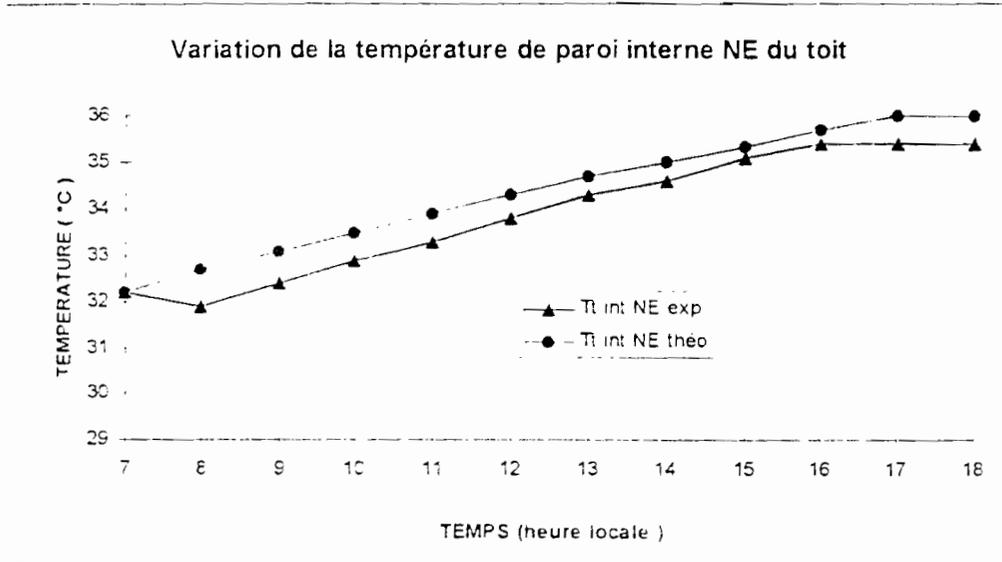


FIGURE.4.3.b-1: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

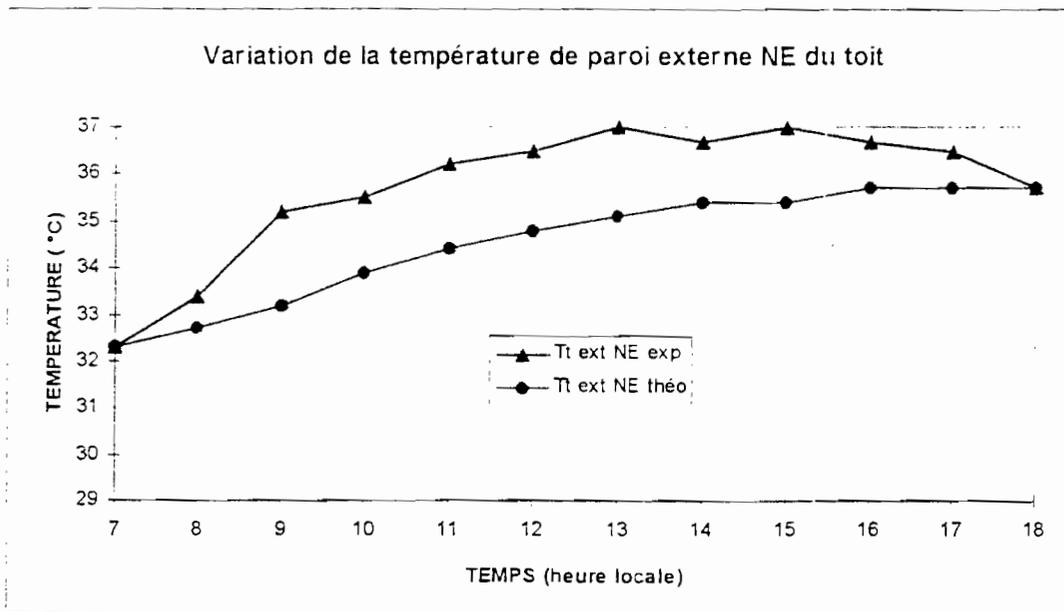


FIGURE.4.3.b-2: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

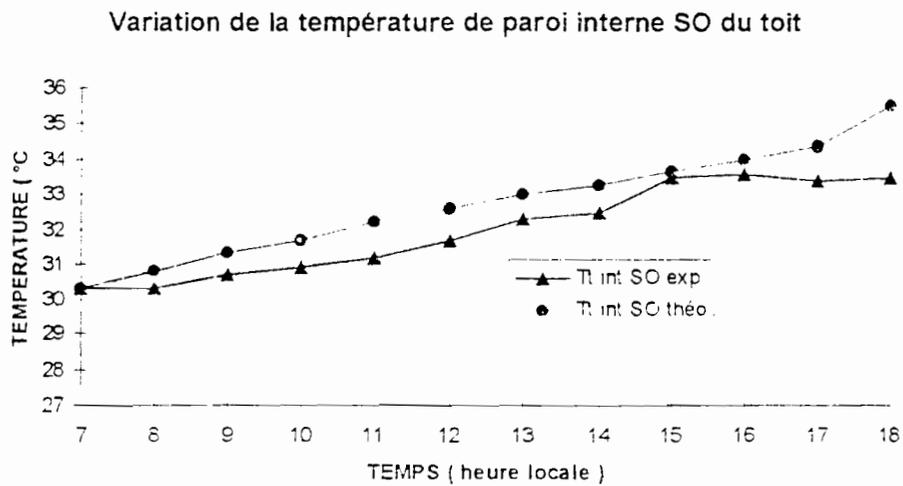


FIGURE.4.3.b-3: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

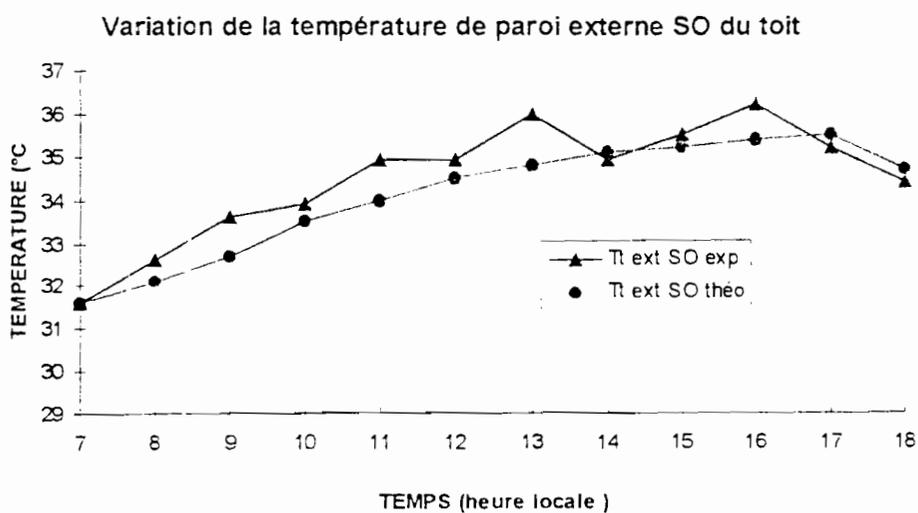


FIGURE.4.3.b-4: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

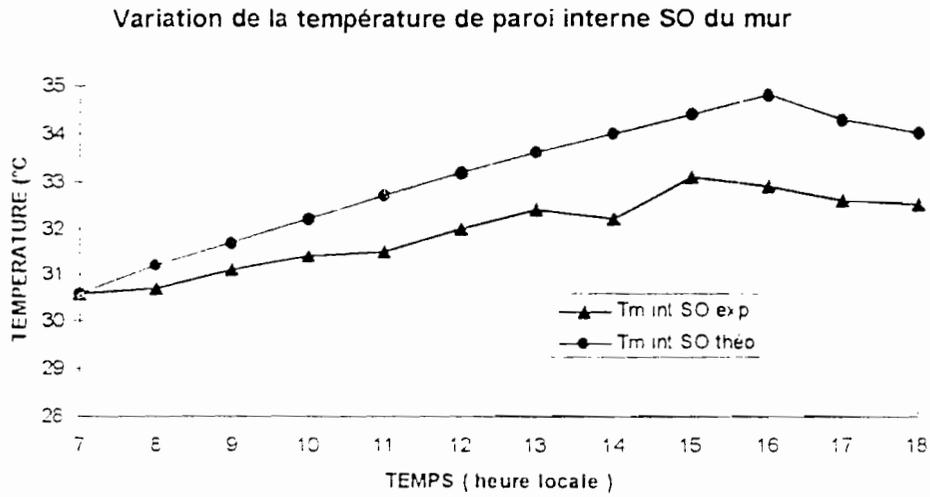


FIGURE.4.3.b-5: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

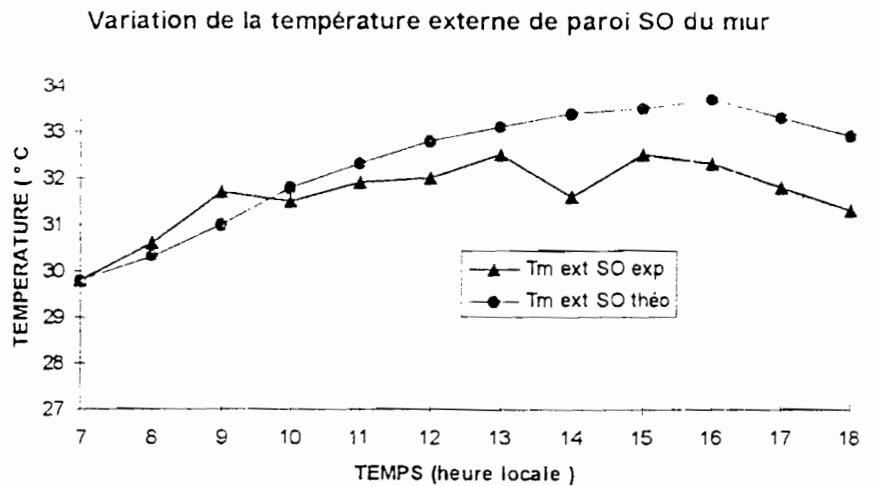


FIGURE.4.3.b-6: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

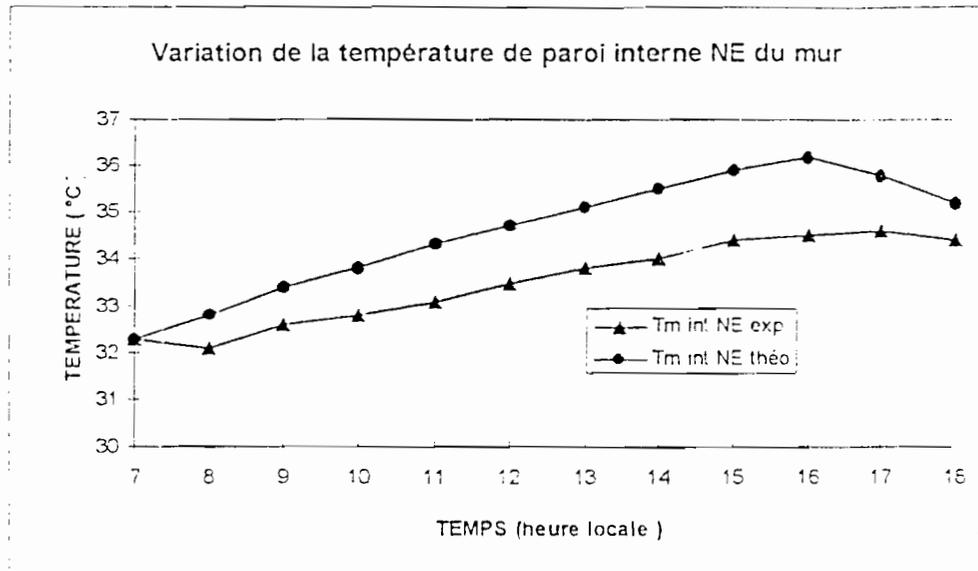


FIGURE.4.3.b-7: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

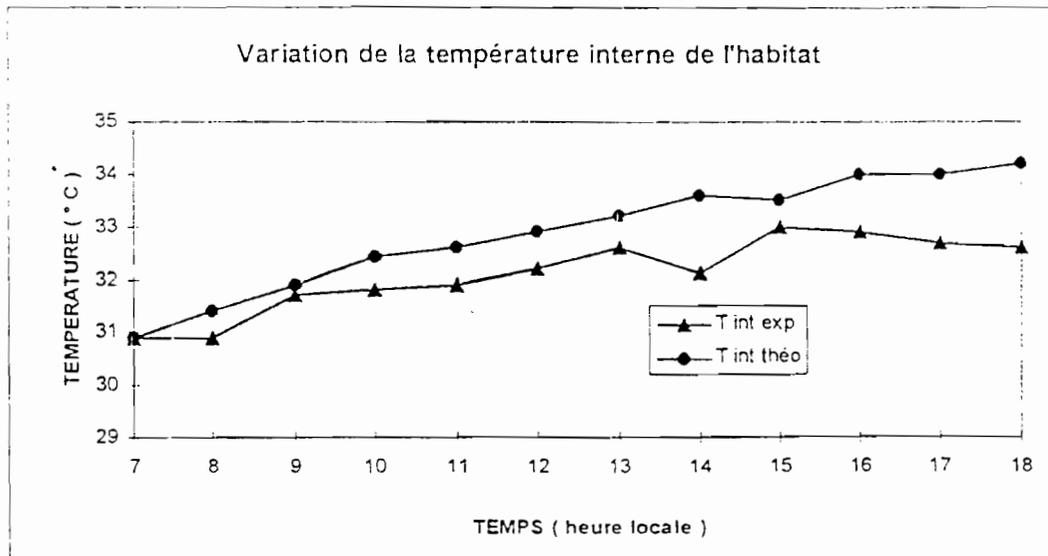


FIGURE.4.3.b-8: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

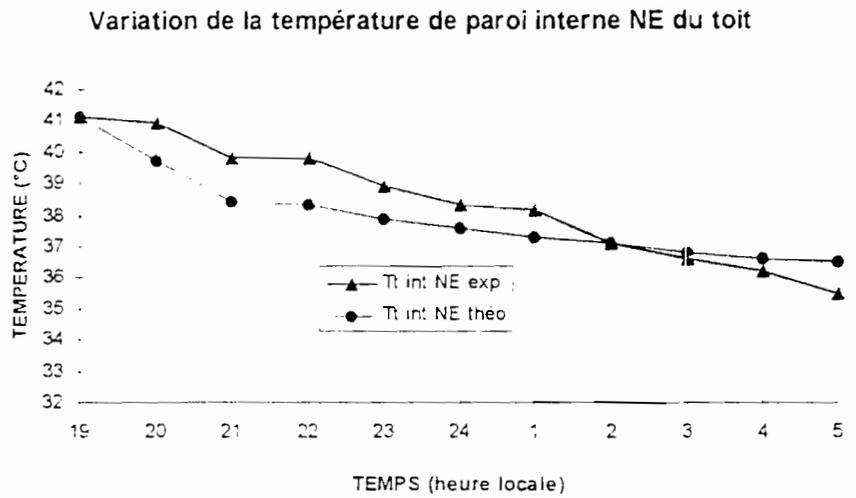


FIGURE.4.3.c-1: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

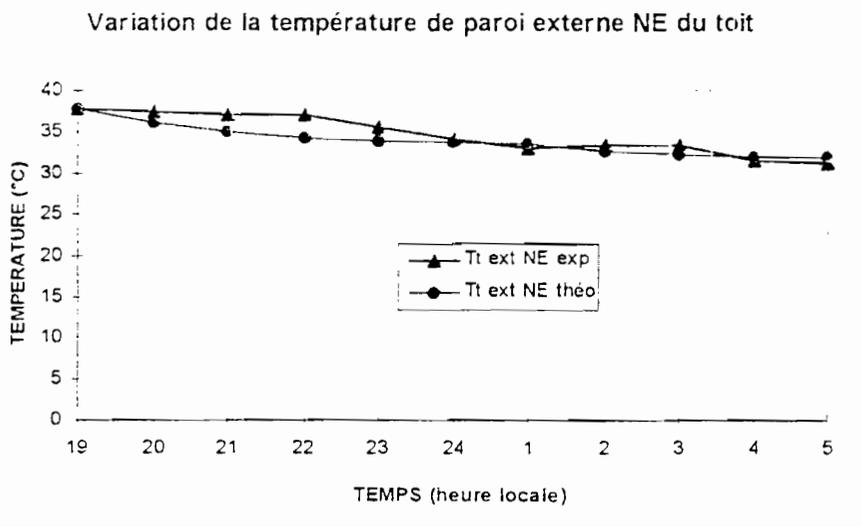


FIGURE.4.3.c-2: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

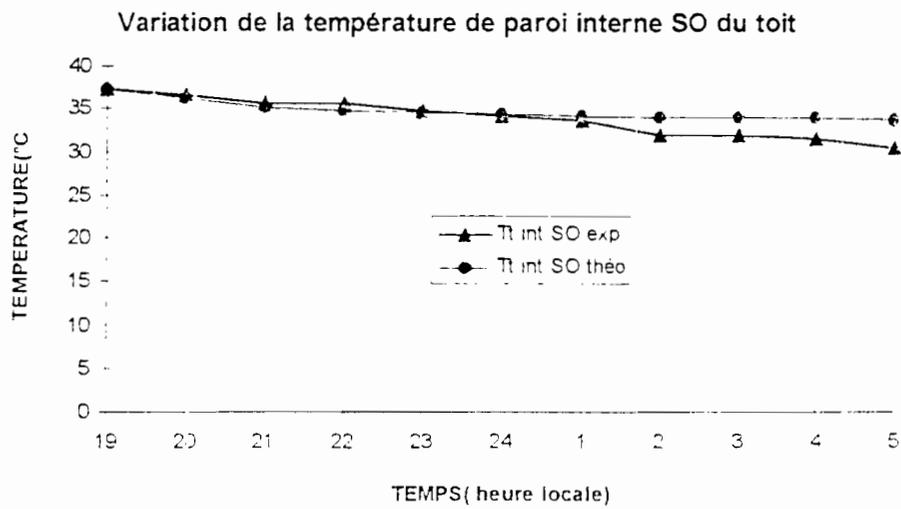


FIGURE.4.3.c-3: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

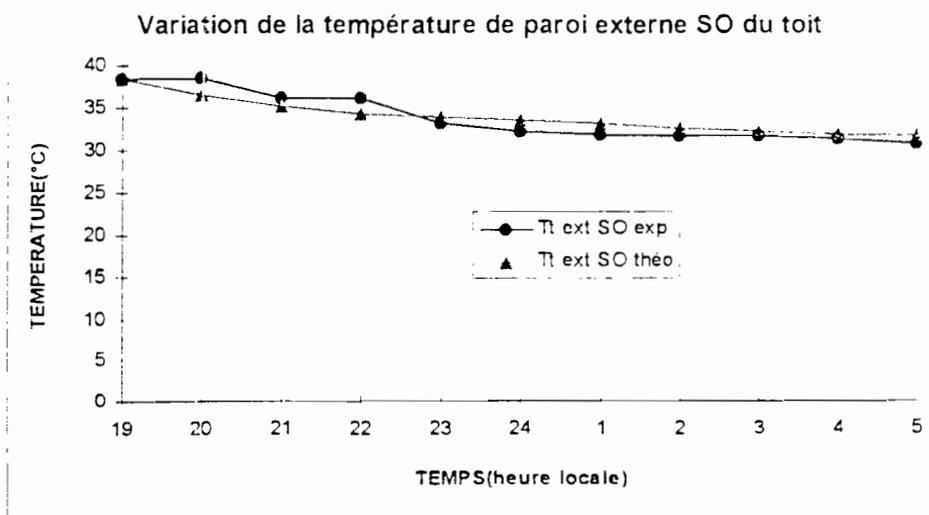


FIGURE.4.3.c-4: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

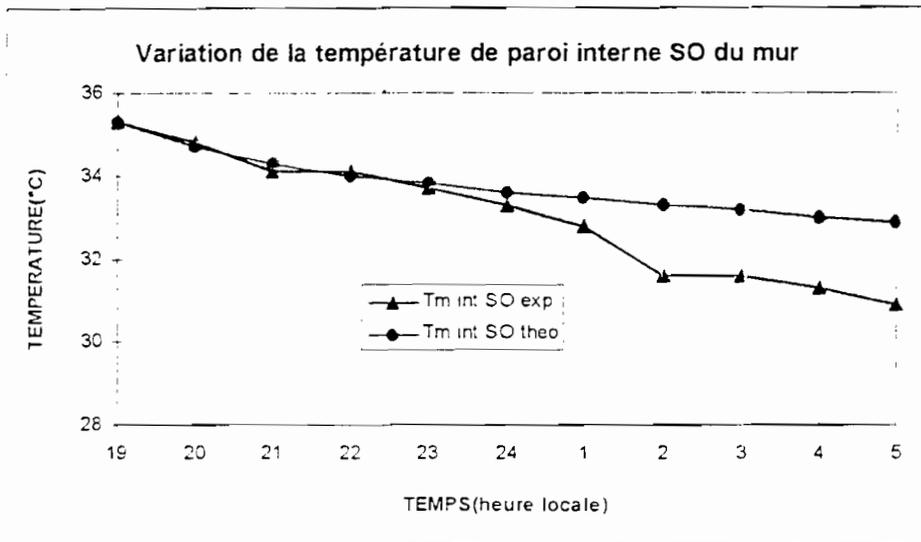


FIGURE.4.3.c-5: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

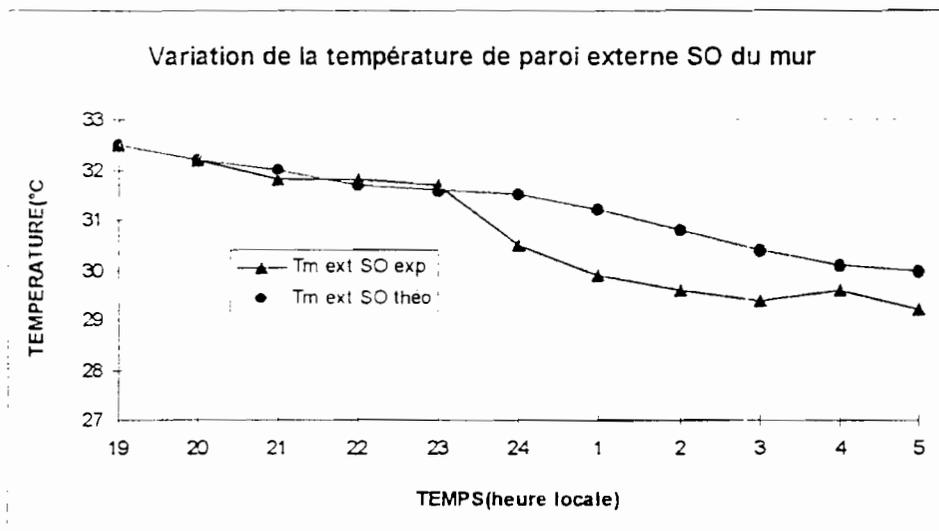


FIGURE.4.3.c-6: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

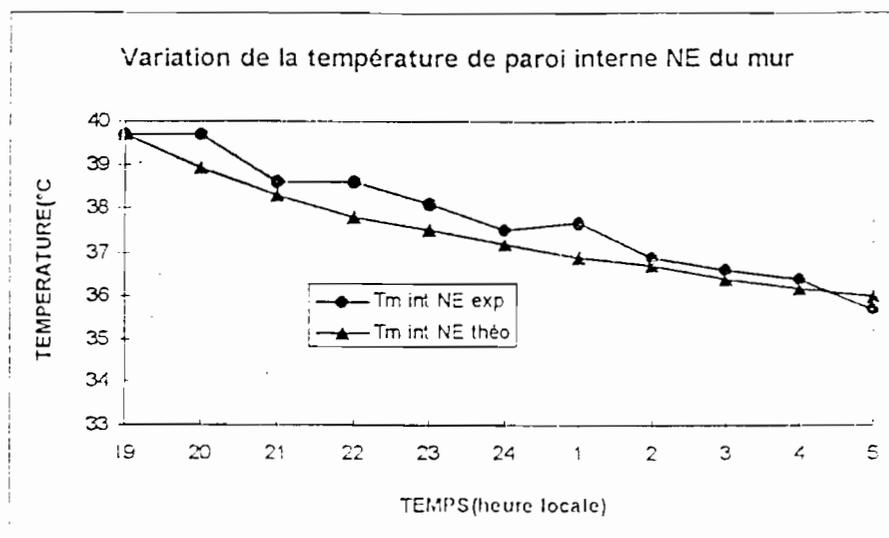


FIGURE.4.3.c-7: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

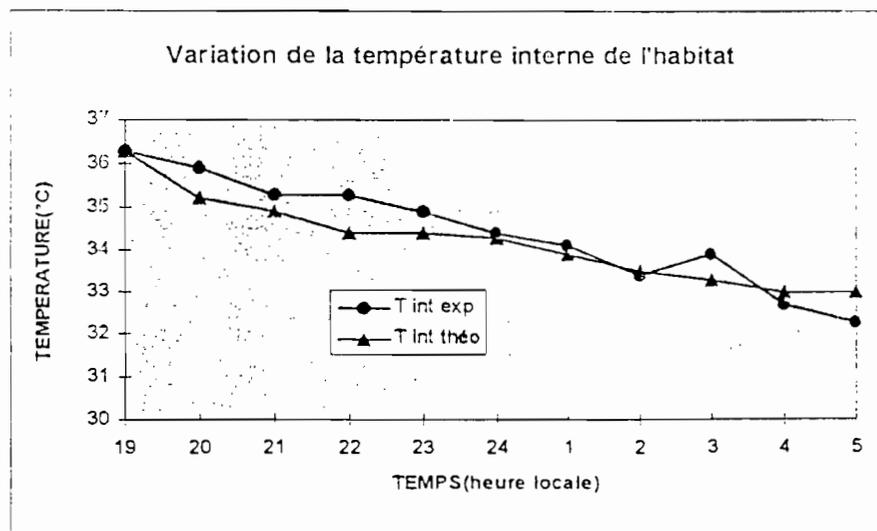


FIGURE.4.3.c-8: Comparaison courbes théorique et expérimentale

II.3.2 CAS DU MODELE BIDIMENSIONNEL

L'évolution générale des courbes de la figure.4.4 montre une très bonne concordance entre la théorie et l'expérience.

La concordance théorie/expérience est meilleure à l'extérieur qu'à l'intérieur de l'habitat.

Comme dans le cas du modèle unidimensionnel, les plus grands écarts sont observés sur le côté Sud-Ouest de l'habitat; par contre entre 9^h et 11^h, sur la figure.4.4.a-3, nous observons un faible écart entre la théorie et l'expérience.

Nous observons sur les figures.4.4.a-4 et 4.4.a-7 un déphasage entre les réponses théoriques et expérimentales.

Les écarts maximums pour les températures de parois sont les suivants:

- ◆ 5,7% pour la journée du 23/09/88 (figure.4.4.a-2 à 18^h),
- ◆ 5,3% pour la journée du 26/09/88 (figure.4.4.b-6 à 12^h),
- ◆ 13% pour la nuit du 8-9/10/88(figure.4.4.c-2 à 20^h) et à 5h 2%.

Pour la température interne, nous avons une très bonne réponse du modèle avec des écarts maximums suivants:

- ◆ 2,1% pour la journée du 23/09/88 (figure.4.4.a-8 à 16^h),
- ◆ 1,5% pour la journée du 26/09/88 (figure.4.4.b-8 à 18^h),
- ◆ 3.5% pour la nuit du 8-9/10/88 (figure.4.4.c-8 à 3^h).

Pour la température du plancher, nous avons une très bonne réponse du modèle avec les écarts suivants:

- ◆ 5,9% pour la journée du 23/09/88 (figure.4.4.a-9 à 17^h),
- ◆ 3,6% pour la journée du 26/09/88 (figure.4.4.b-9 à 14^h),
- ◆ 3% pour la nuit du 8-9/10/88 (figure.4.4.c-9 à 4^h).

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

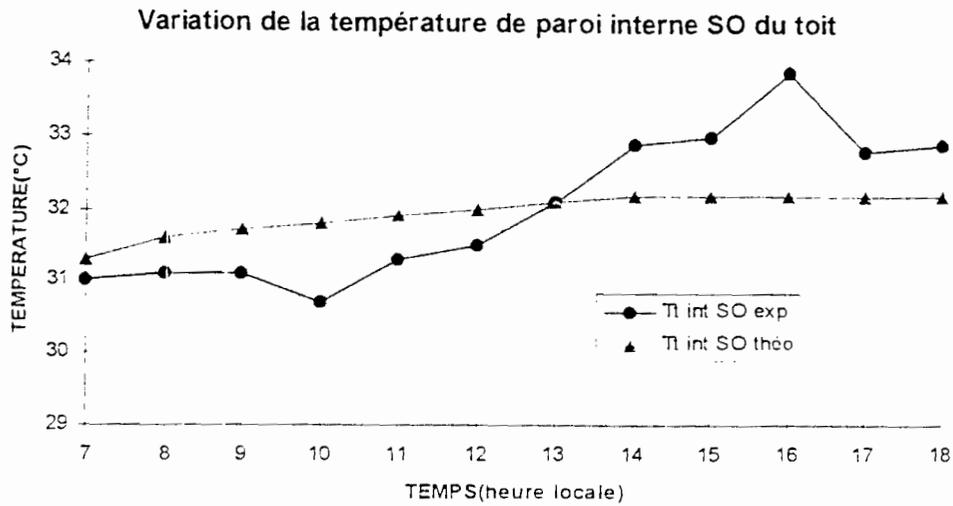


FIGURE.4.4.a-1: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

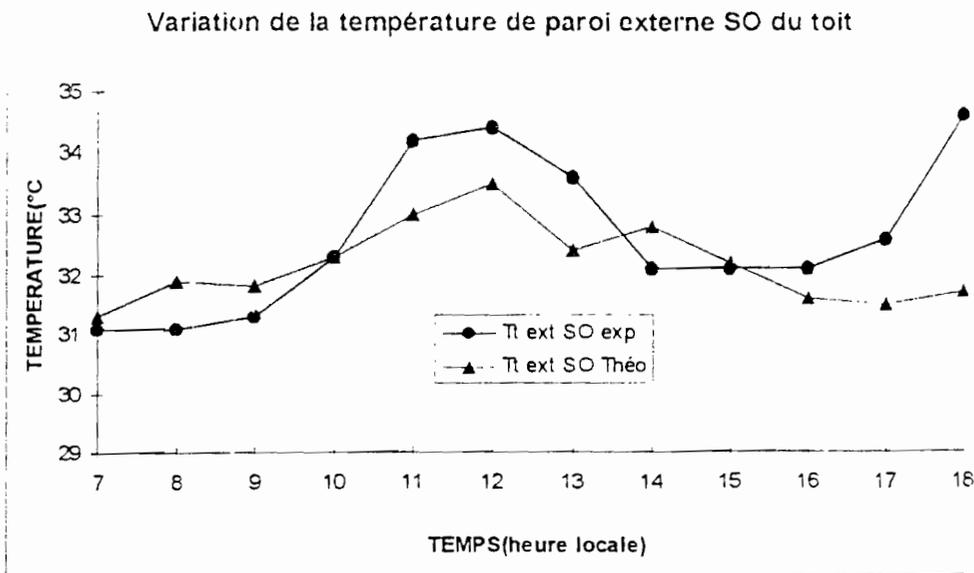


FIGURE.4.4.a-2: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

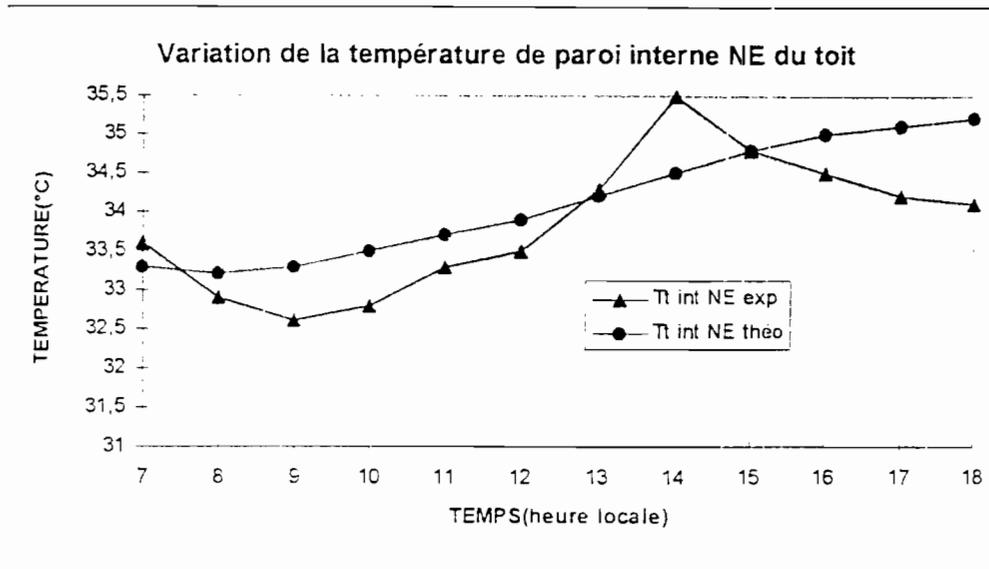


FIGURE.4.4.a-3: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

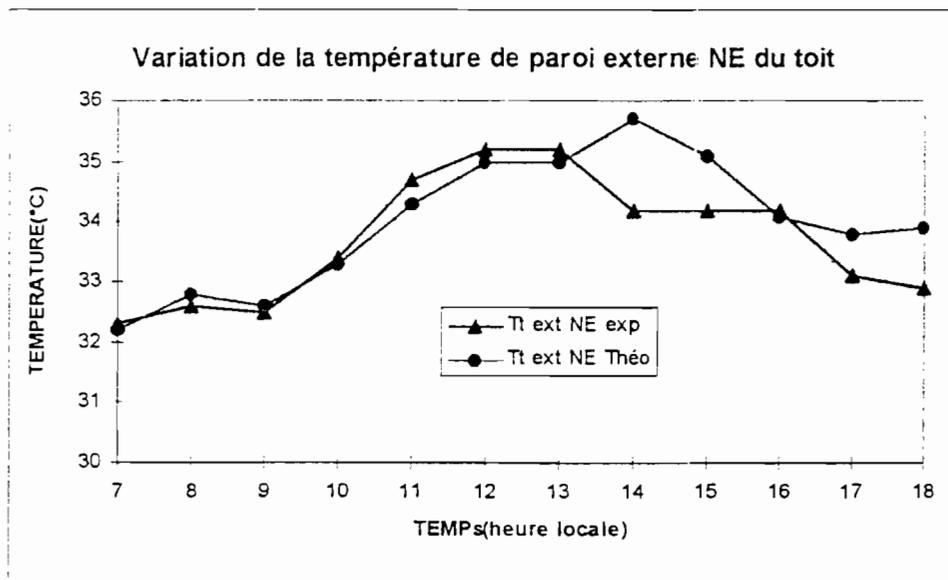


FIGURE.4.4.a-4: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

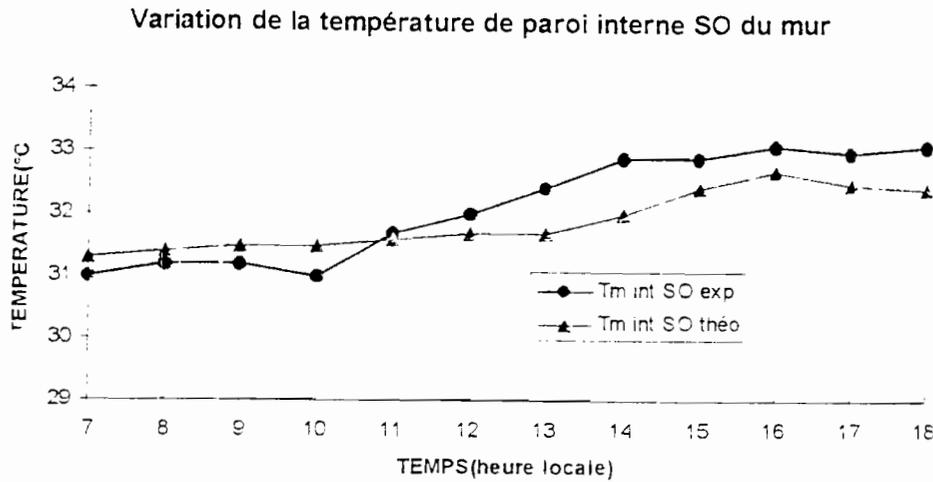


FIGURE.4.4.a-5: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

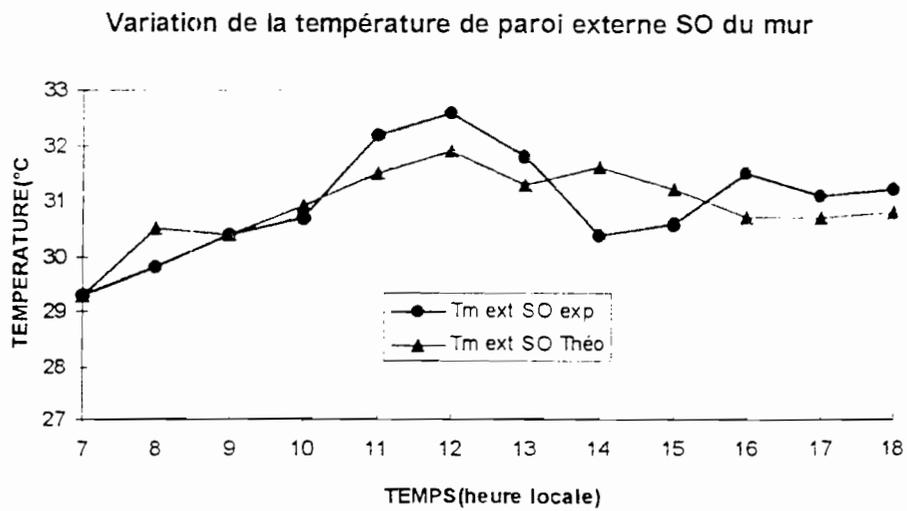


FIGURE.4.4.a-6: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

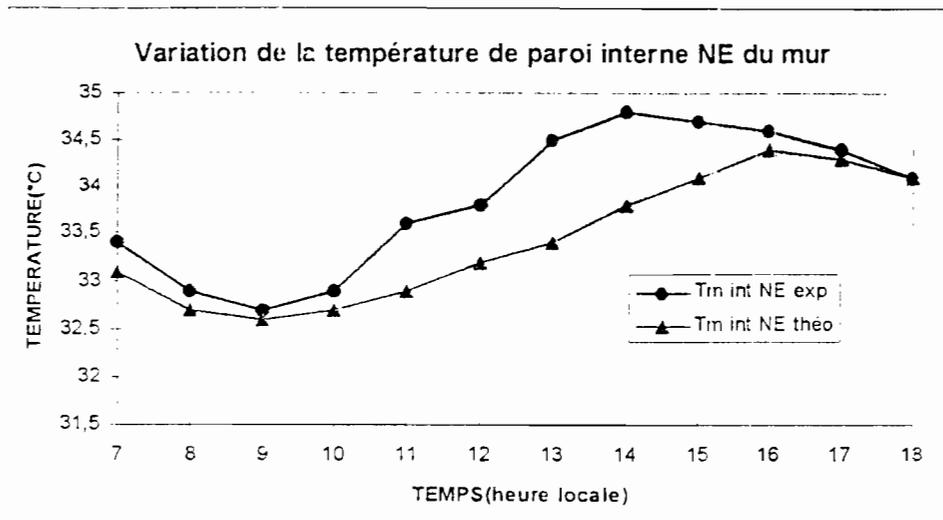


FIGURE.4.4.a-7: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

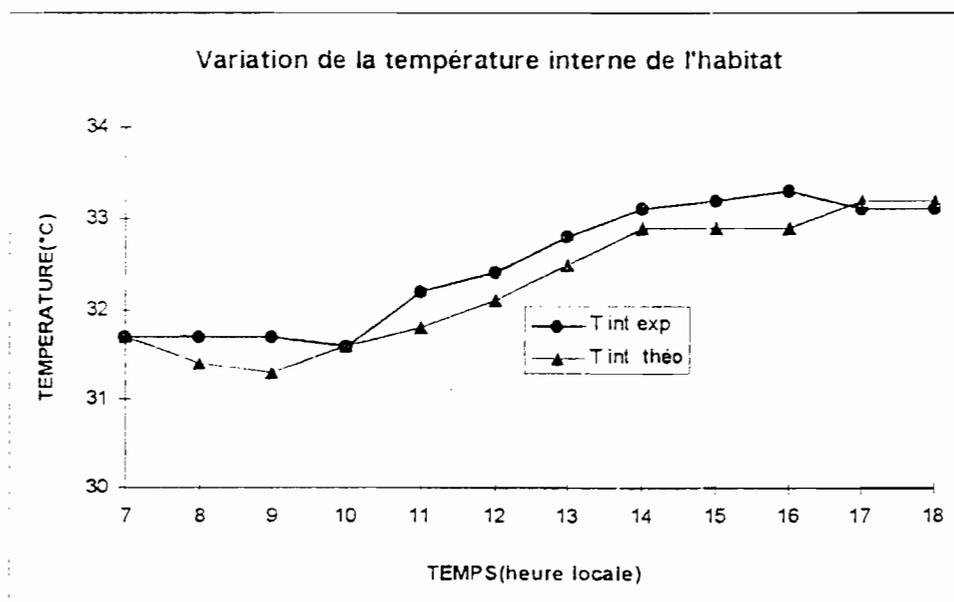


FIGURE.4.4.a-8: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

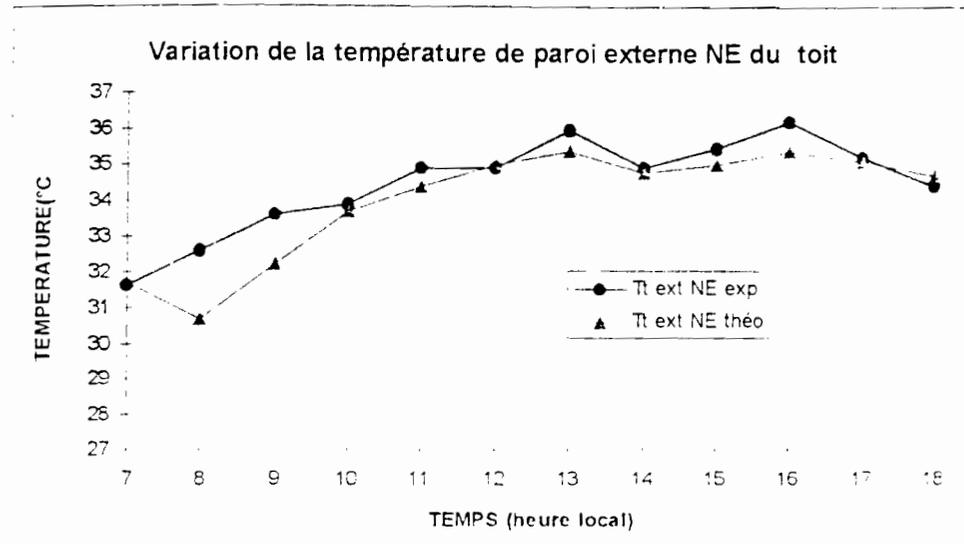


FIGURE.4.4.b-4: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

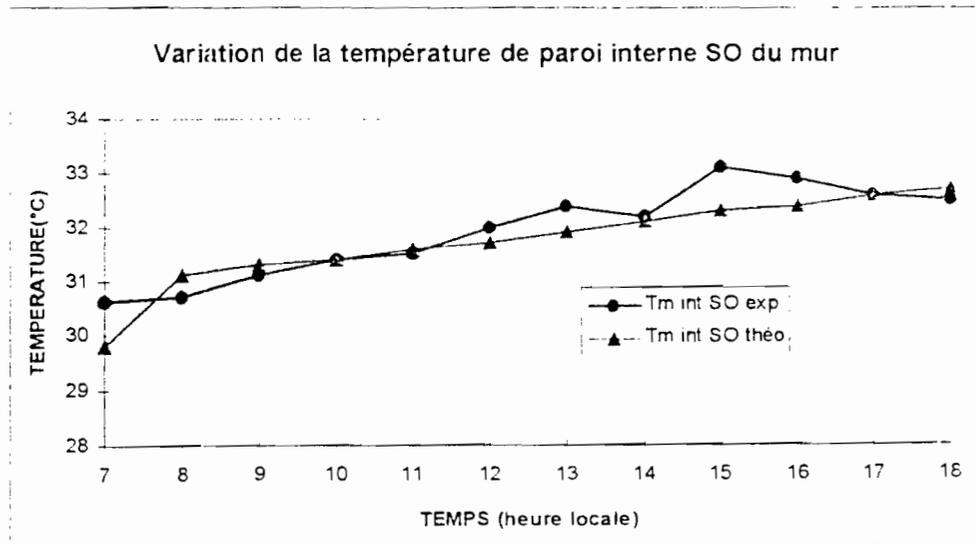


FIGURE.4.4.b-5: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

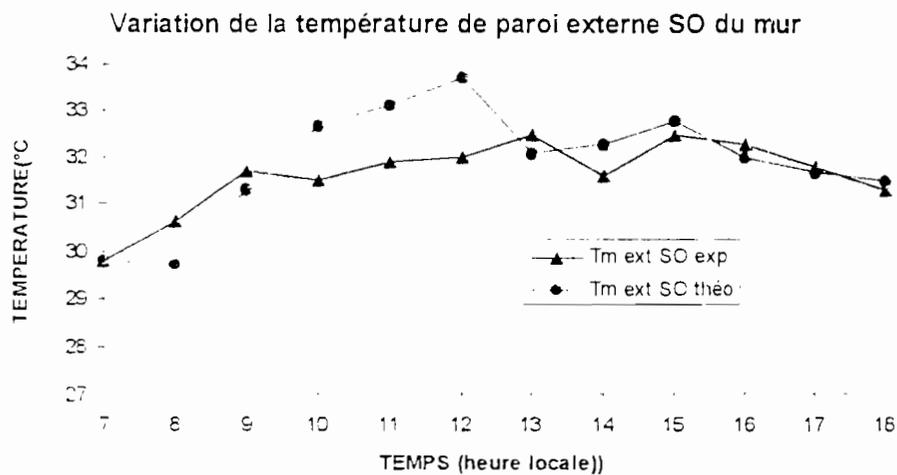


FIGURE.4.4.b-6: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

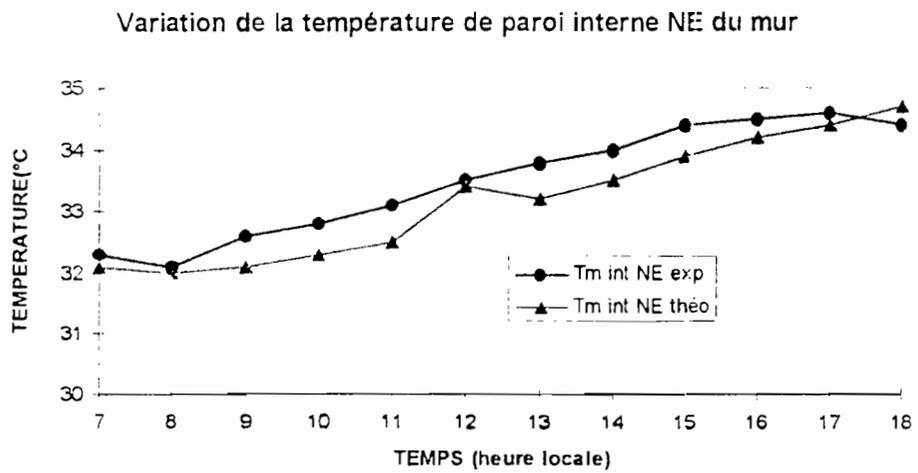


FIGURE.4.4.b-7: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

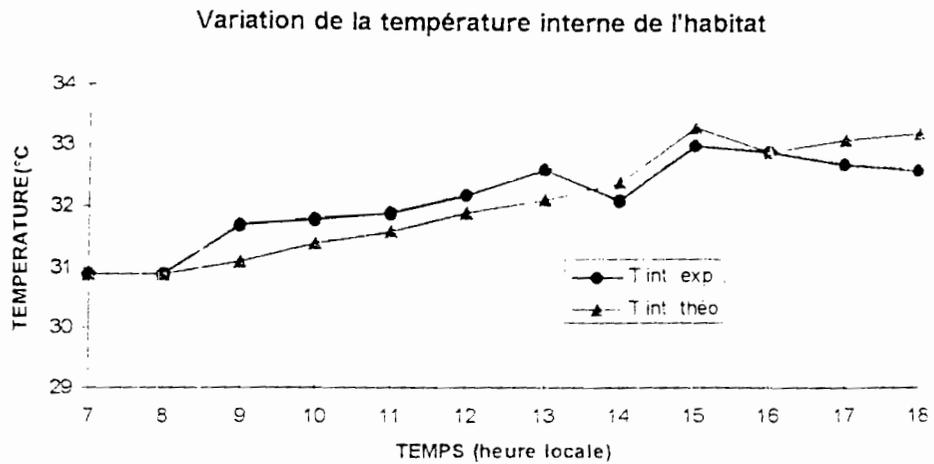


FIGURE.4.4.b-8: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

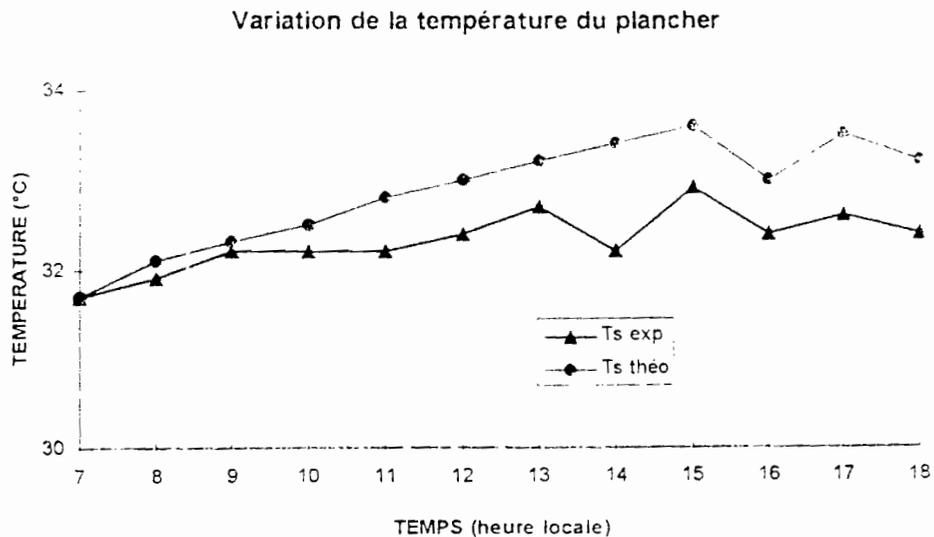


FIGURE.4.4.b-9: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

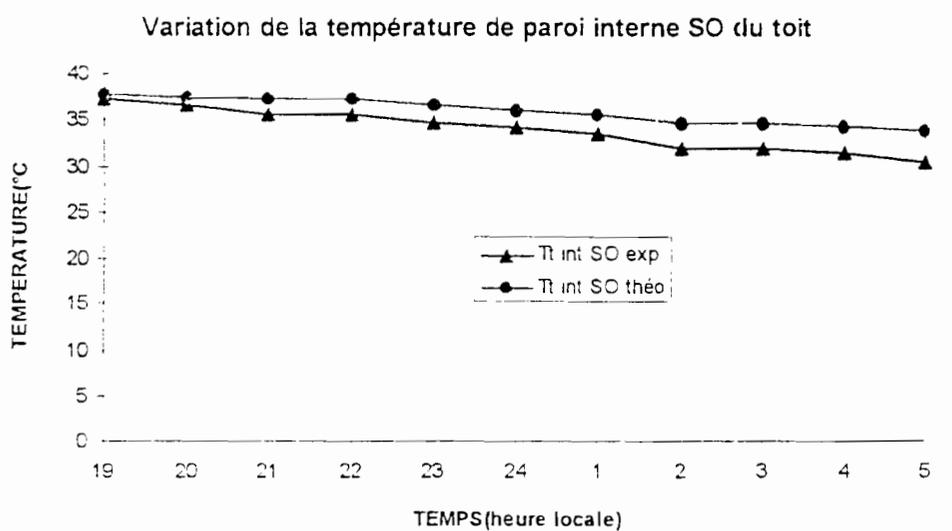


FIGURE.4.4.c-1: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

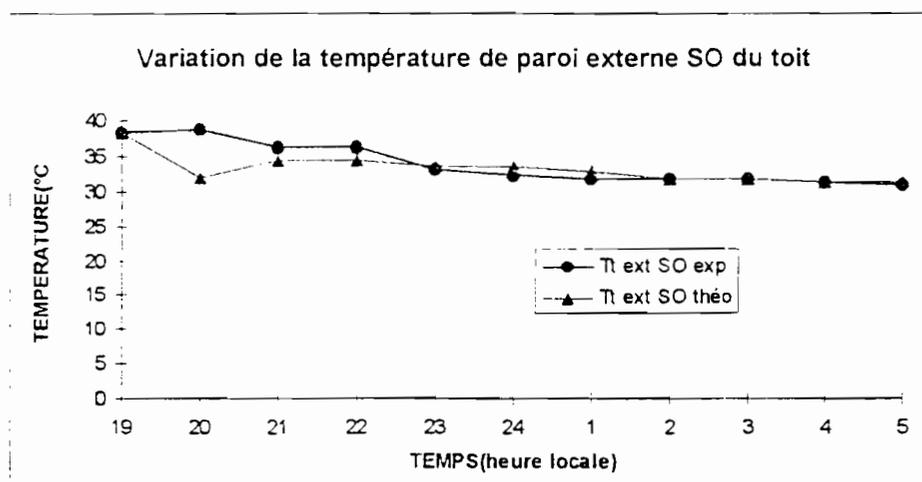


FIGURE.4.4.c-2: Comparaison courbes théorique et expérimentale

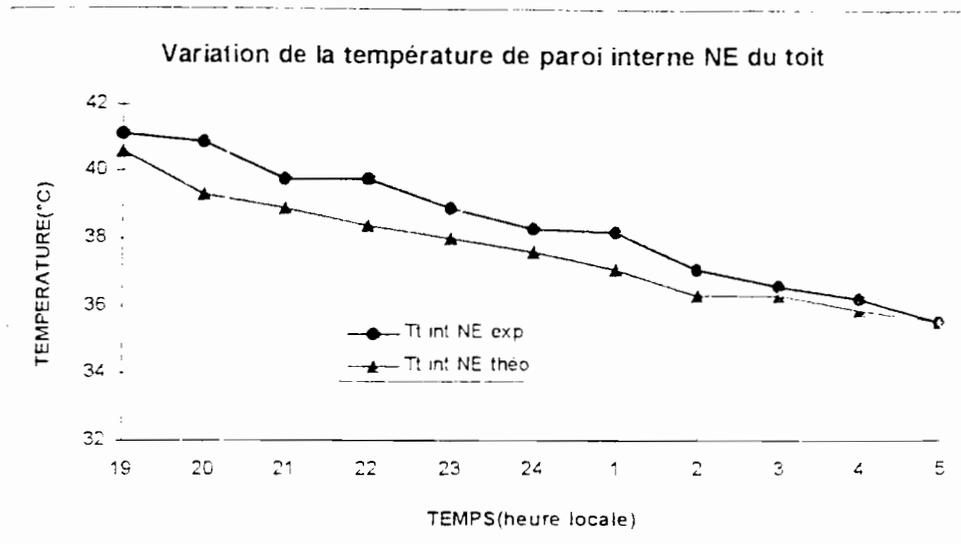


FIGURE.4.4.c-3: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMÉE (NUIT DU 8-9/10/88)

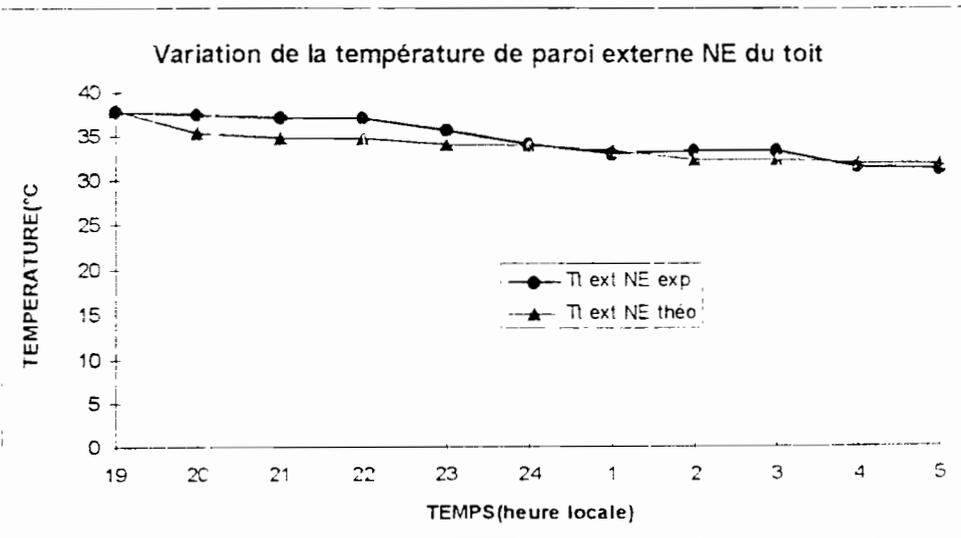


FIGURE.4.4.c-4: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

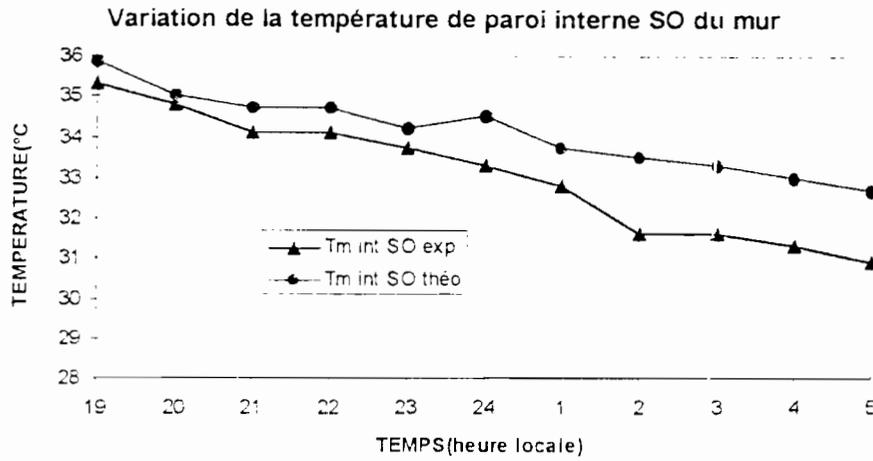


FIGURE.4.4.c-5: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

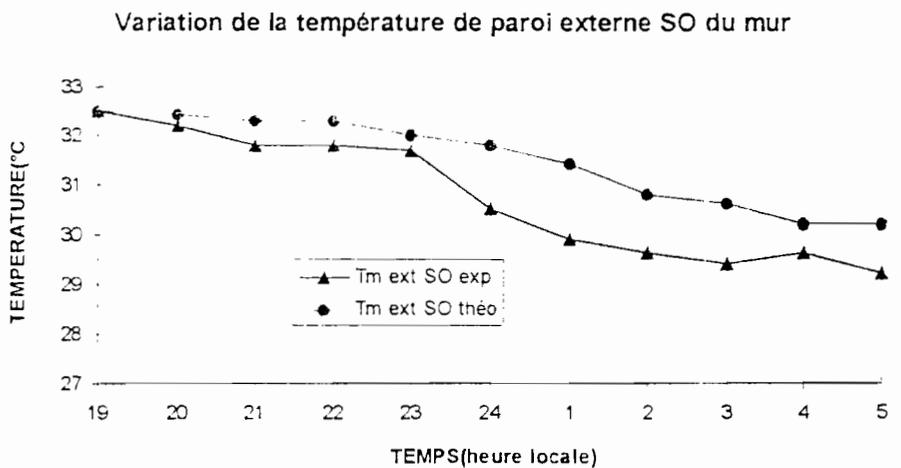


FIGURE.4.4.c-6: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMÉE (NUIT DU 8-9/10/88)

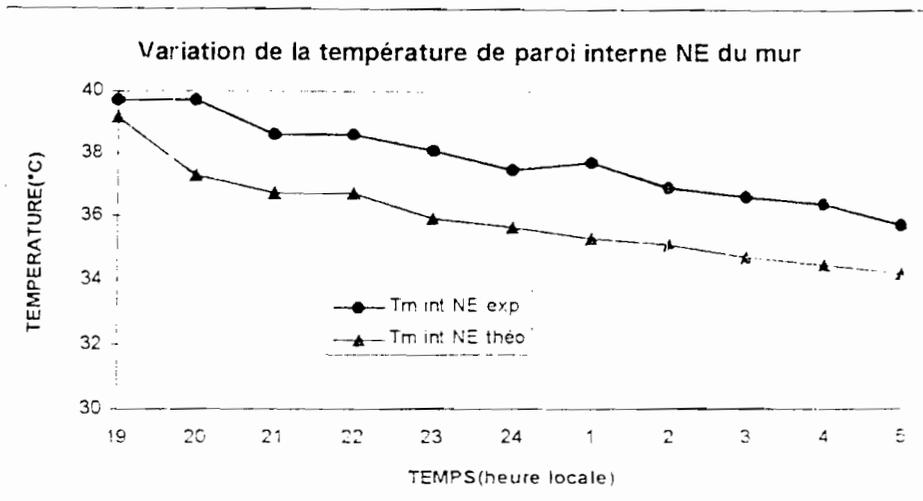


FIGURE.4.4.c-7: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMÉE (NUIT DU 8-9/10/88)

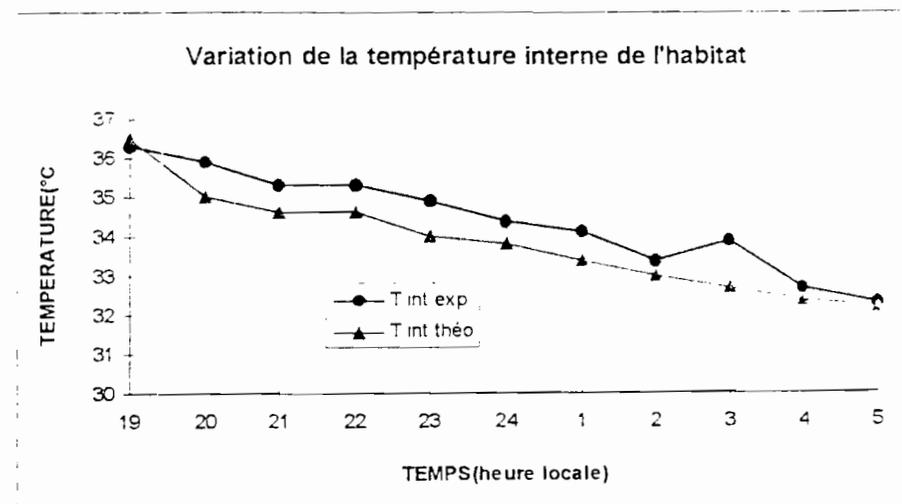


FIGURE.4.4.c-8: Comparaison courbes théorique et expérimentale

CASE FERMÉE (NUIT DU 8-9/10/88)

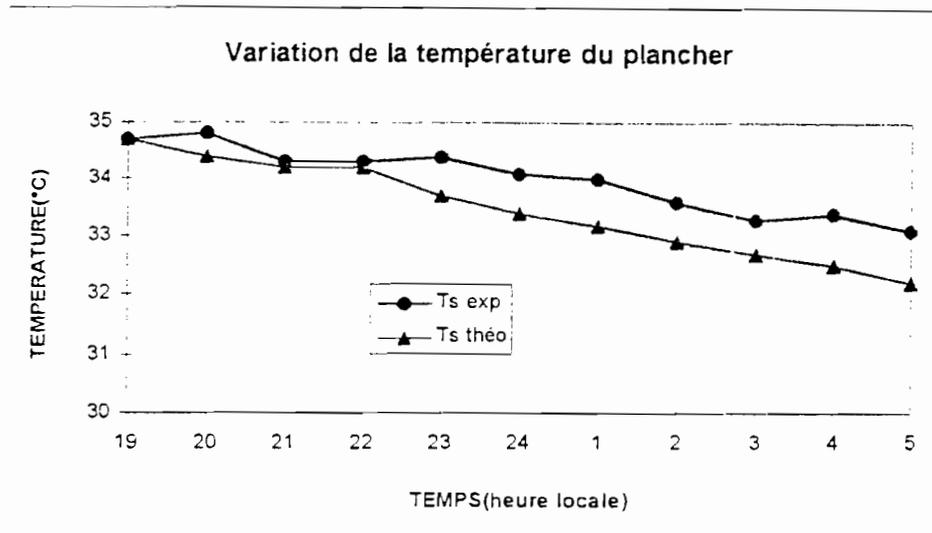


FIGURE.4.4.c-9: Comparaison courbes théorique et expérimentale

II.3.3 CONCLUSION

Nous pensons que les écarts des modèles par rapport à l'expérience sont dus:

1. aux hypothèses simplificatrices utilisées dans les équations;
2. aux appareils de mesures utilisés;
3. aux approximations faites sur les caractéristiques des matériaux (conductivité thermique, coefficients de réflexion, d'absorption, de transmission).

Les écarts observés entre les modèles et l'expérience pour la réponse des parois internes peuvent s'expliquer par la contribution des échanges grande longueur d'onde entre l'expérimentateur et les faces internes des parois.

Ces écarts peuvent aussi s'expliquer par la perturbation des mesures délivrées par le thermocouple; ceci en raison des échanges grande longueur d'onde entre celui-ci et l'ambient intérieur.

Les écarts observés sur la figure.4.3.a-1 du modèle unidimensionnel peuvent être attribués à l'impact de la conduction orthoradiale; car sur la figure .4.4.a-3 du modèle bidimensionnel nous observons une réduction de ces écarts.

Les grands écarts observés sur le côté SO de l'habitat sont dus à l'influence de l'arbre situé sur le côté SO de l'habitat. Cette influence est d'autant plus importante que la nuit. l'arbre contribue à un grand refroidissement des parois SO de l'enveloppe. à partir de 24^h. Comme les modèles ne prennent pas en compte cette déperdition, les températures des modèles sont donc supérieures à celles de l'expérience.

Le déphasage entre les courbes théoriques et expérimentales des figures.4.3.a-2...4.3.a-7, 4.4.a-4 et 4.4.a-7 peut s'expliquer par le fait que les courbes théoriques atteignent leur maximum en même temps que les courbes expérimentales des parois internes SO de l'habitat. En effet sur la figure.2.5.a, nous observons un déphasage entre les courbes expérimentales des parois internes NE et SO de l'habitat; il en découle alors un déphasage entre les courbes des figures.4.3.a-2, 4.3.a-7, 4.4.a-4, 4.4.a-7.

Après la validation des modèles numériques, nous allons faire une étude comparative entre le modèle unidimensionnel et le modèle bidimensionnel. Cette étude comparative aura pour but, la détermination du modèle de simulation de l'habitat.

II.4 COMPARAISON MODELES UNIDIMENSIONNEL ET BIDIMENSIONNEL

L'analyse des courbes de la figure.4.5 montre la meilleure réponse du modèle bidimensionnel.

Cette meilleure réponse du modèle bidimensionnel ressort également de l'analyse des valeurs des écarts maximums donnés par les deux modèles(confère paragraphe précédent).

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

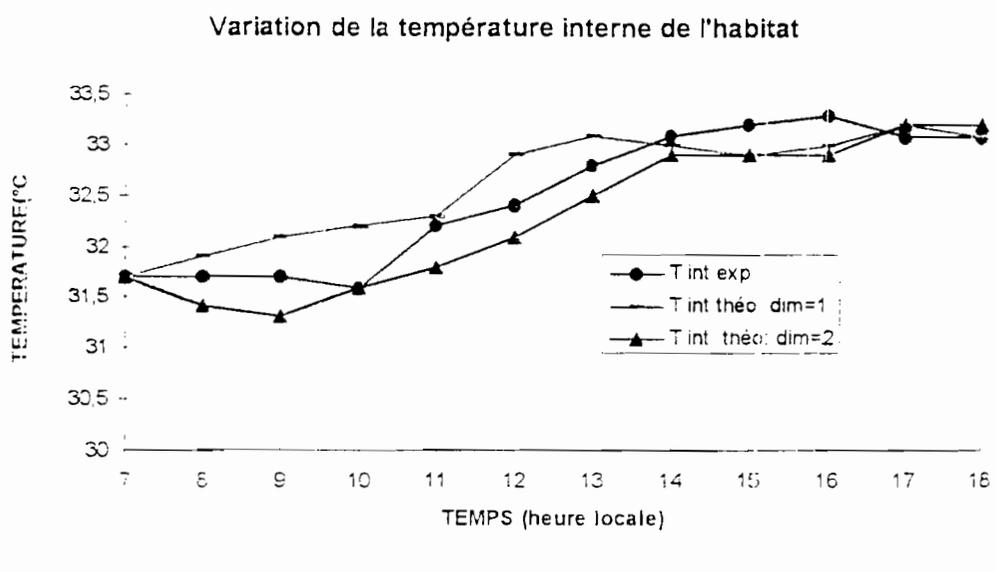


FIGURE.4.5.a: Comparaison température unidimensionnelle et bidimensionnelle

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

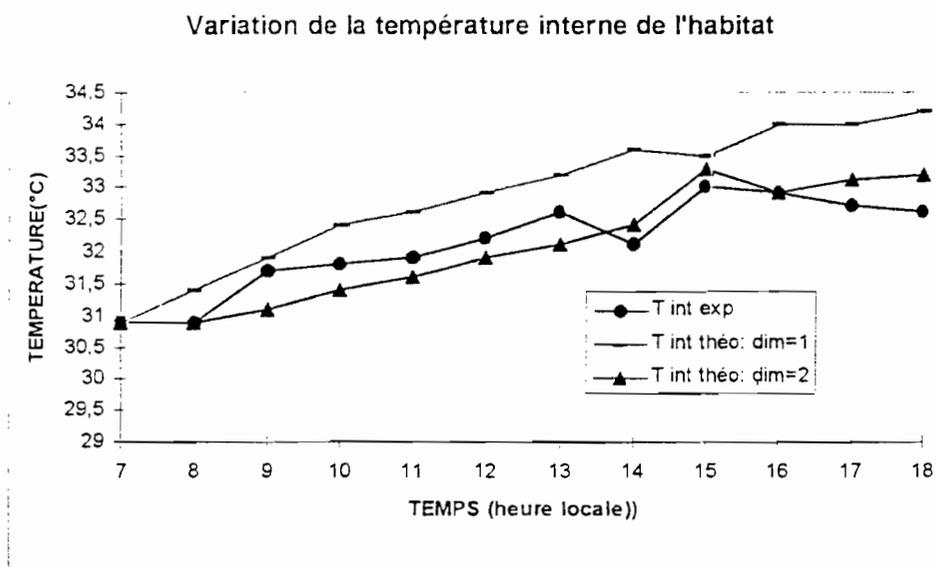


FIGURE.4.5.b: Comparaison température unidimensionnelle et bidimensionnelle

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

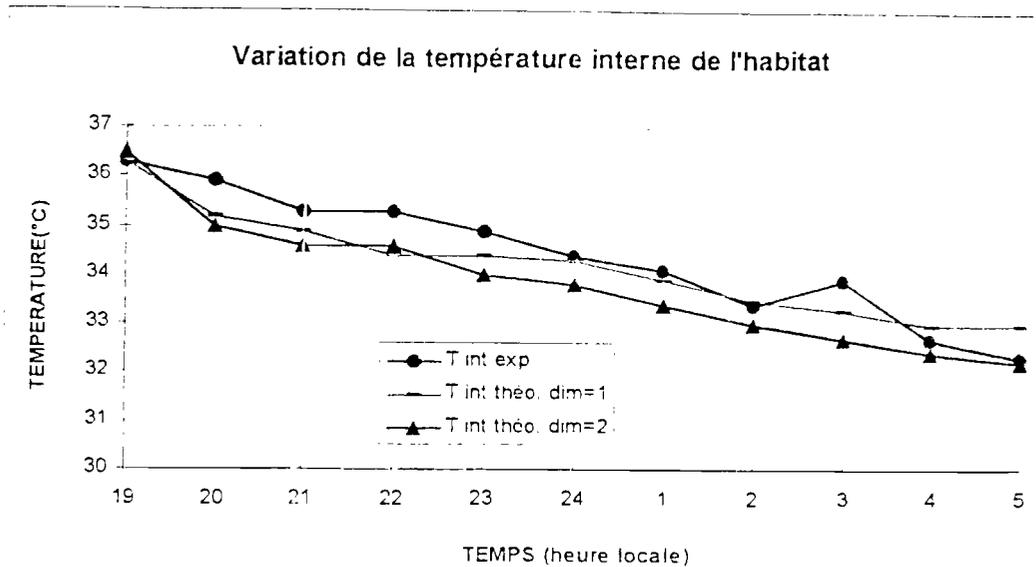


FIGURE.4.5.c: Comparaison température unidimensionnelle et bidimensionnelle

II.5 CONCLUSION

La comparaison des deux modèles a mis en exergue l'importance de la conduction suivant la direction orthoradiale.

Du fait de sa meilleure réponse, le modèle bidimensionnel sera utilisé comme modèle de simulation de l'habitat.

Compte tenu du faible écart entre les réponses des deux modèles, on pourrait à défaut utiliser le modèle unidimensionnel.

Pour résoudre le problème de l'inconfort thermique de l'habitat expérimental, nous allons utiliser le modèle de simulation pour analyser la contribution de l'enveloppe de l'habitat dans le confort et la contribution d'un orifice au sommet du toit sur la ventilation naturelle de l'enceinte.

III EXPLOITATION DU LOGICIEL

L'analyse des résultats expérimentaux(confère chapitre 2) a montré le fort taux d'inconfort thermique de l'habitat.

Il apparaît donc nécessaire de rechercher les sources principales d'inconfort et de trouver les voies et moyens pour améliorer le confort de l'habitat. Pour ce faire, nous mènerons premièrement, une étude énergétique visant à localiser les sources d'inconfort; elle consistera à l'analyse des flux radiatif, conductif, convectif.

Deuxièmement, nous proposerons des solutions visant à résoudre et/ou amoindrir l'inconfort de l'habitat.

Troisièmement, nous utiliserons le logiciel de simulation pour vérifier la justesse des solutions de l'étude énergétique.

III.1 ETUDE ENERGETIQUE

Le but de cette étude est de rechercher les flux responsables de la mauvaise réponse de la case ronde; aussi, nous avons, sur la figure.4.6 donné l'évolution temporelle des différents flux sur la face interne des parois de l'enveloppe. Ces différents flux sont obtenus en supposant qu'il y'ait égalité entre le flux conductif radial et la somme des flux convectif et radiatif.

$$\text{Soit: } \phi_{cond} = \phi_{conv} + \phi_{rad} \text{ où } \phi_{cond} = \frac{e}{\lambda} S(T_e - T_i) \text{ et } \phi_{conv} = H_{ci} S(T_i - T_{ai})$$

Le flux radiatif se détermine par la formule suivante:

$$\phi_{rad} = \phi_{cond} - \phi_{conv}$$

Dans cette équation ϕ_{cond} désigne le flux conductif, ϕ_{conv} le flux convectif et ϕ_{rad} le flux radiatif.

L'analyse des courbes de la figure.4.6 montre qu'aux heures de sensation d'inconfort (11^h-17^h) prédomine l'émission radiative (flux radiatif positif) par rapport à la convection.

Cette émission s'observe aux heures suivantes:

- Sur le côté SO du toit entre 7^h et 14^h (figure.4.6.a),

- Sur le côté NE du toit entre 10^h30mn et 12^h50mn (figure.4.6.b).
- Sur le côté SO du mur entre 10^h10mn et 12^h30mn (figure.4.6.c).
- Sur le côté NE du toit entre 13^h et 14^h30mn et 16^h30mn et 17^h (figure.4.6.d).

De cette figure ressort également la faible convection naturelle et surtout la quasi-inexistence de la perte par convection de l'enveloppe de l'enceinte.

De ces observations, nous pouvons dire que l'inconfort thermique de la case ronde est dû à la forte émission radiative et à la faible ventilation naturelle des locaux.

Analysons à présent, la contribution des différentes parois au niveau de l'inconfort thermique dû aux échanges radiatifs.

L'analyse de la figure.4.7 montre que:

- ♦ l'inconfort thermique de l'habitat entre 7^h et 14^h est principalement dû à l'émission radiative au niveau de la toiture (figure.4.7 .b)
- ♦ l'inconfort thermique entre 13^h et 14^h est dû à l'émission radiative au niveau du côté NE du mur (figure.4.7.a)

Étudions à présent, la contribution des différentes parois au niveau de l'inconfort thermique dû aux échanges convectifs.

L'analyse de la figure.4.8 montre que l'inconfort thermique est dû au réchauffement de l'enceinte par convection entre les parois internes NE de l'habitat et l'air intérieur.

Après avoir localisé les principales sources d'inconfort thermique, envisageons à présent les propositions de solutions.

La variation similaire des flux conductif et radiatif (figure.4.6) montre qu'une réduction sensible du flux conductif aura une incidence non négligeable sur l'émission radiative.

Pour réduire le flux conductif, nous proposons des avancées de toit pour atténuer l'effet du rayonnement direct sur le mur et des effets de masques pour une isolation de l'habitat.

Il y a lieu de souligner que l'habitat dispose d'un couvert végétal qui a contribué à l'amélioration de la réponse thermique de l'habitat; en effet le sol recouvert d'herbes a

Chapitre 4

eu pour effet de réduire l'impact du rayonnement diffus sur l'habitat et la végétation a fait bénéficier l'habitat d'effet de masque.

Nous pensons que la décroissance de l'émission radiative SO du toit de la figure.4.7 pourrait être attribué à l'ombre portée de l'arbre sur le côté SO.

L'analyse des résultats expérimentaux a montré l'impact de la vitesse de convection naturelle sur le confort thermique. Aussi, nous pensons que l'on pourrait envisager comme solution, d'appoint un orifice au toit pour évacuer l'air chaud par effet de cheminée.

Comme les caractéristiques thermophysiques du matériau (conductivité, émissivité etc ..) ont une grande influence sur la réponse thermique d'un habitat, on peut envisager comme autre solution d'appoint l'emploi d'autres matériaux à la place du géobéton. Ces matériaux de par leur émissivité et leur inertie amoindriront non seulement le flux conductif mais aussi le flux radiatif évitant ainsi le réchauffement de l'enceinte intérieure.

L'étude énergétique nous a amené à proposer comme solution de réduction de l'inconfort thermique:

- ◇ les avancées de toit et les effets de masque;
- ◇ l'emploi de matériaux autre que le géobéton;
- ◇ l'effet de cheminée par ouverture au niveau du toit.

Nous allons, grâce au modèle prévisionnel, examiner la réponse de l'habitat pour les solutions de l'étude énergétique.

CASE FERMEE(JOURNEE DU 23/09/88)

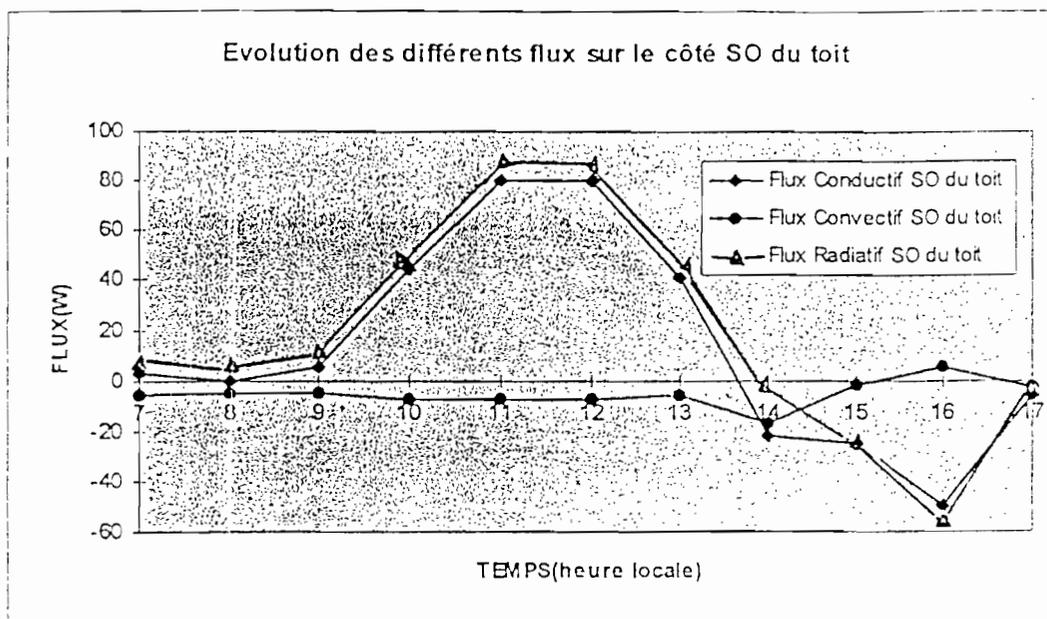


FIGURE.4.6.a :Etude comparative des différents flux sur le côté SO du toit

CASE FERMEE(JOURNEE DU 23/09/88)

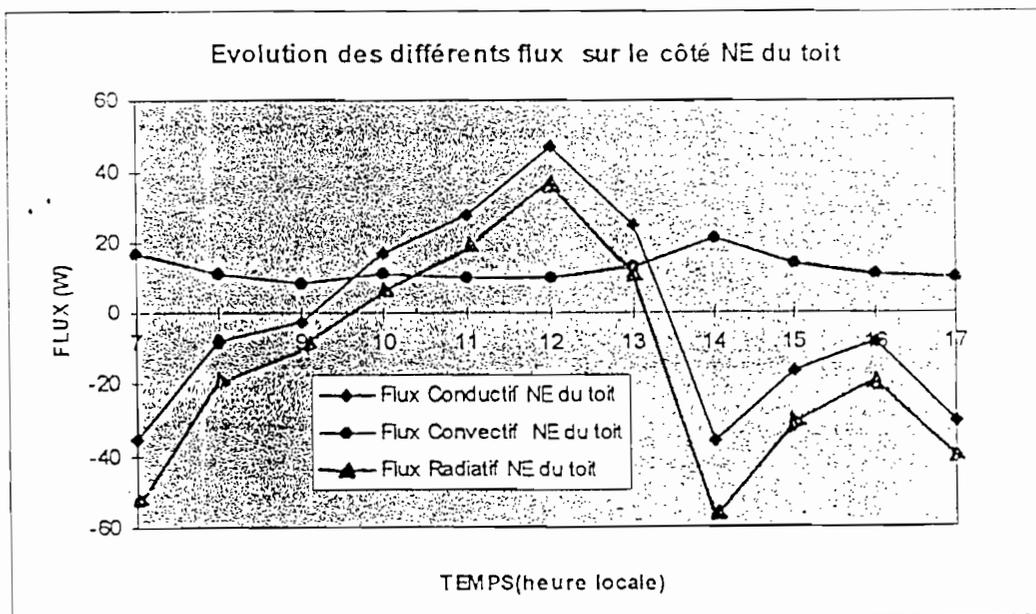


FIGURE.4.6.b:Etude comparative des différents flux sur le côté NE du toit

CASE FERMEE(JOURNEE DU 23/09/88)

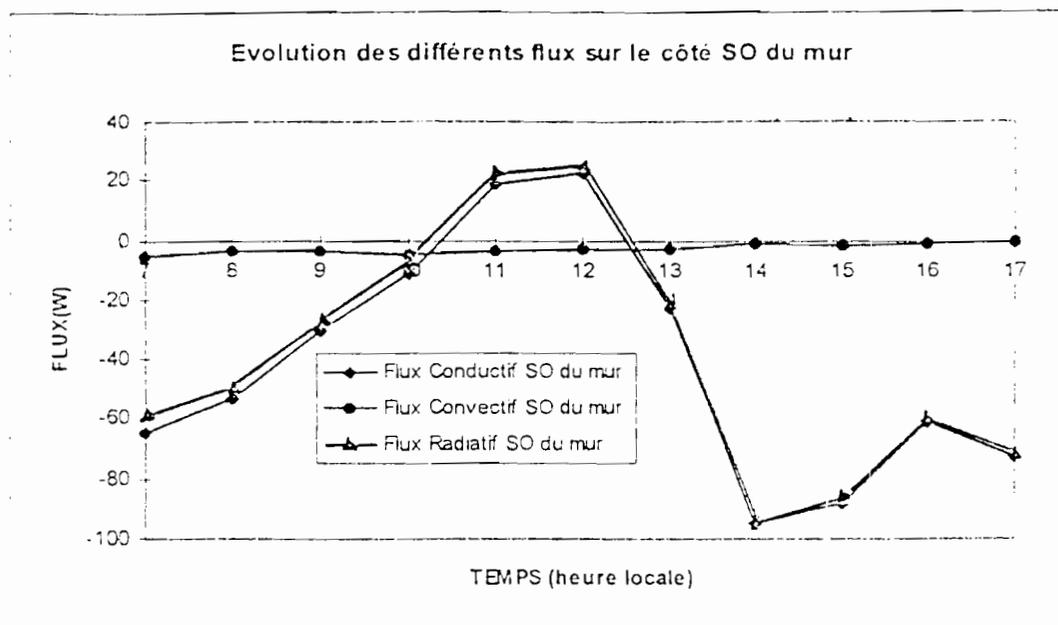


FIGURE.4.6.c:Etude comparative des différents flux sur le côté SO du mur

CASE FERMEE(JOURNEE DU 23/09/88)

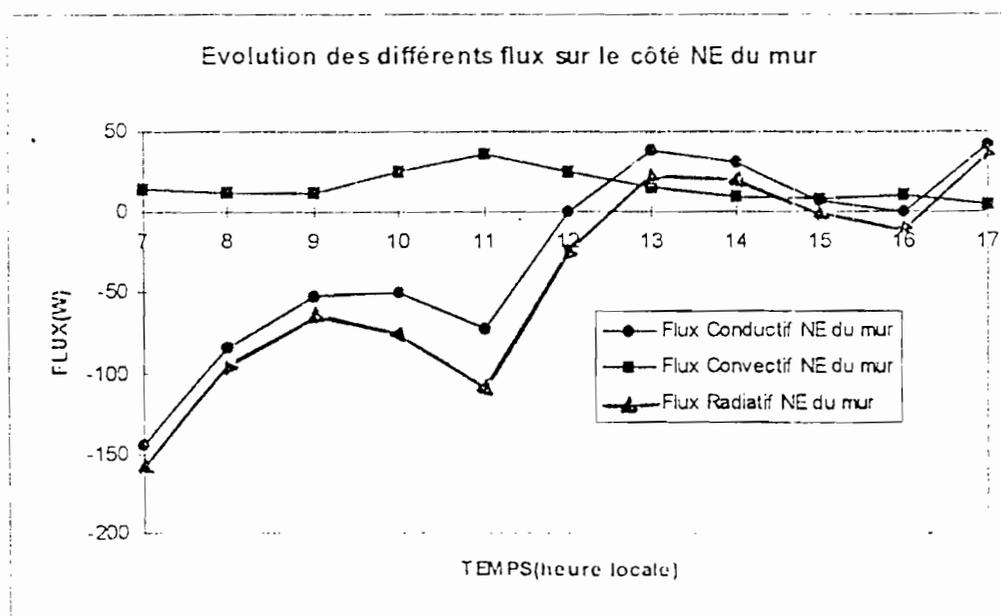


FIGURE.4.6.d:Etude comparative des différents flux sur le côté NE du mur

CASE FERMEE(JOURNEE DU 23/09/88)

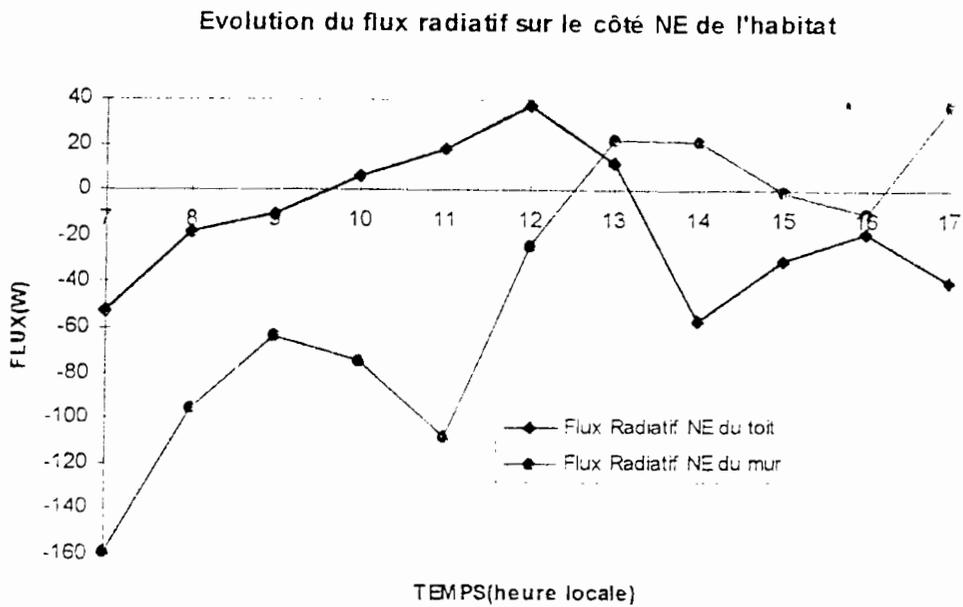


FIGURE.4.7.a:Etude comparative des radiatifs sur le côté NE de l'habitat

CASE FERMEE(JOURNEE DU 23/09/88)

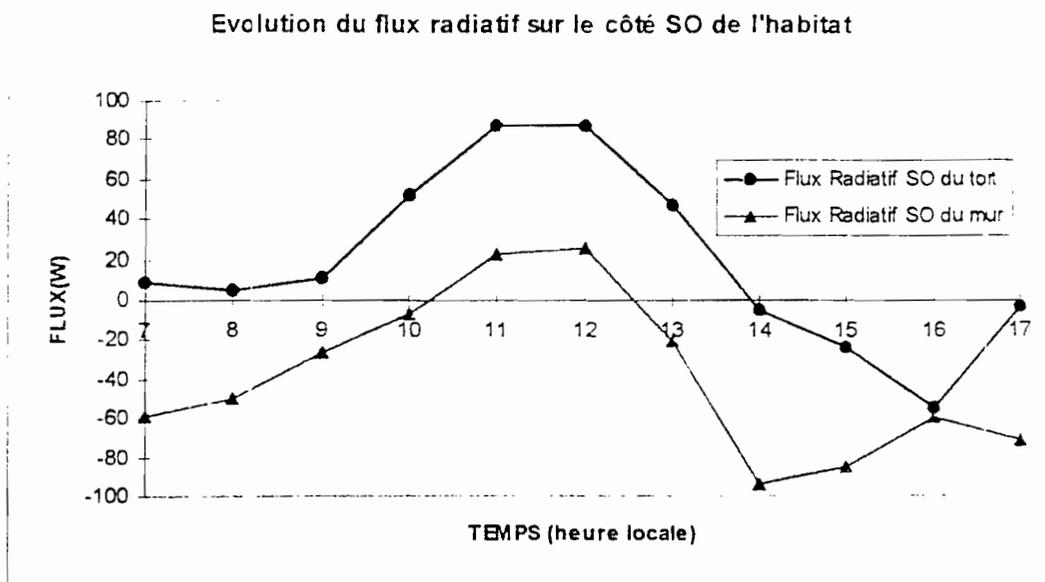


FIGURE.4.7.b:Etude comparative des radiatifs sur le côté SO de l'habitat

CASE FERMEE(JOURNEE DU 23/09/88)

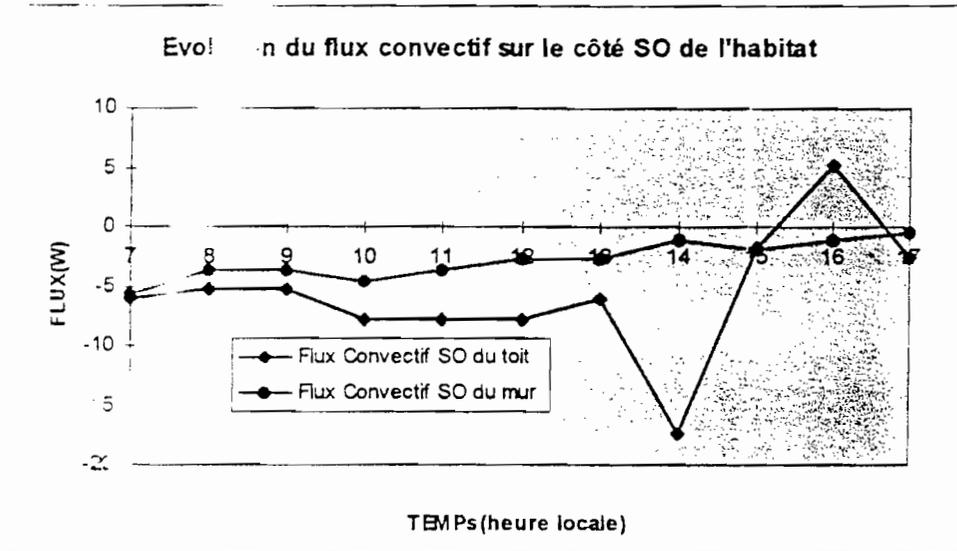


FIGURE.4.8.a:Etude comparative des flux convectifs sur le côté SO de l'habitat

CASE FERMEE(JOURNEE DU 23/09/88)

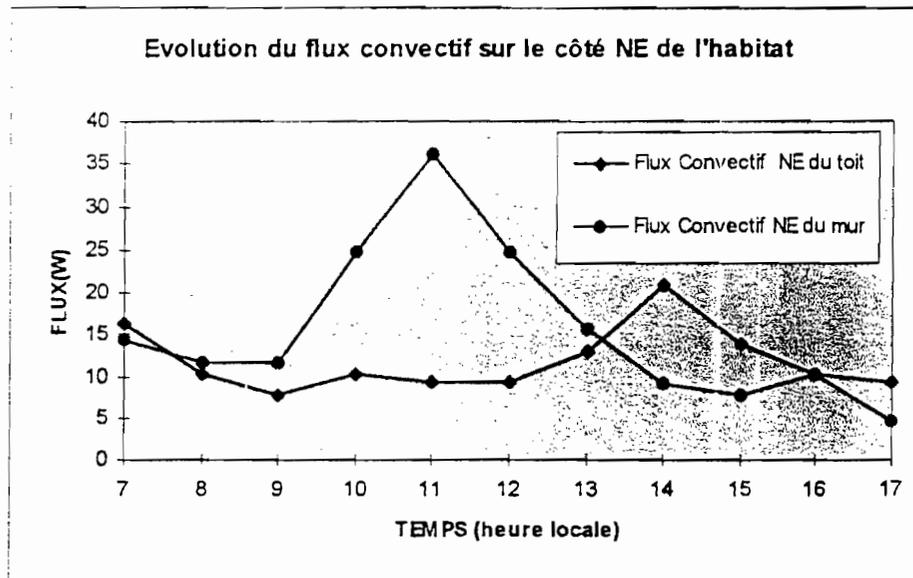


FIGURE.4.8.b:Etude comparative des flux convectifs sur le côté NE de l'habitat

III.2 EFFET D'UN ORIFICE AU NIVEAU DU TOIT

La figure.4.9.c montre que la température est une fonction décroissante du rayon de l'ouverture.

Cette situation s'observe également sur les figure.4.9.a et 4.9.b en dehors d'un point invariant. Ce point se situe à 12^h 30 mn sur la figure.4.9.a et 12^h sur la figure.4.9.b.

L'apparition de ce point peut s'expliquer par la position zénithale du soleil entre 12^h et 13^h; ainsi, le confort augmente avec l'ouverture.

La décroissance de la température de l'habitat en fonction du rayon de l'ouverture montre l'effet de la ventilation naturelle sur le confort thermique. En effet, plus la vitesse de la convection augmente plus il y a confort dans l'habitat (figure.4.10). Toutefois il y a un seuil à ne pas dépasser car le tableau.4.1 {64} montre qu'à partir d'une vitesse d'air de 1m/s. la ventilation induit une sensation de courant d'air gênante, et qu'au delà de 1.5 m/s elle devient néfaste pour la santé.

CASE FERMÉE (JOURNÉE DU 23/09/88)

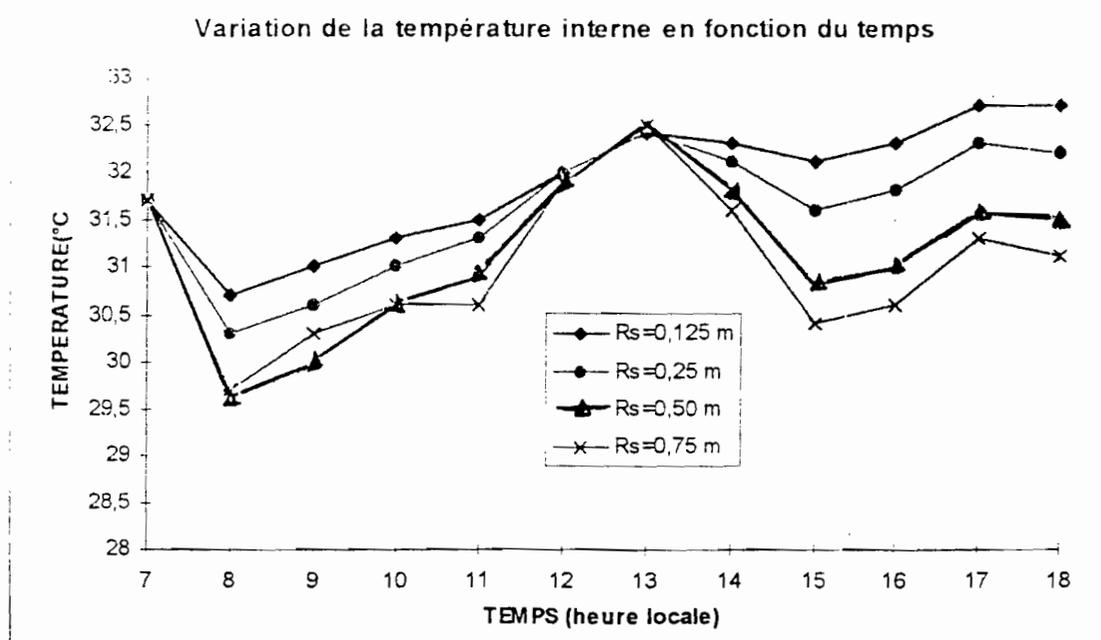


FIGURE.4.9.a Evolution de la température interne en fonction de l'ouverture

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

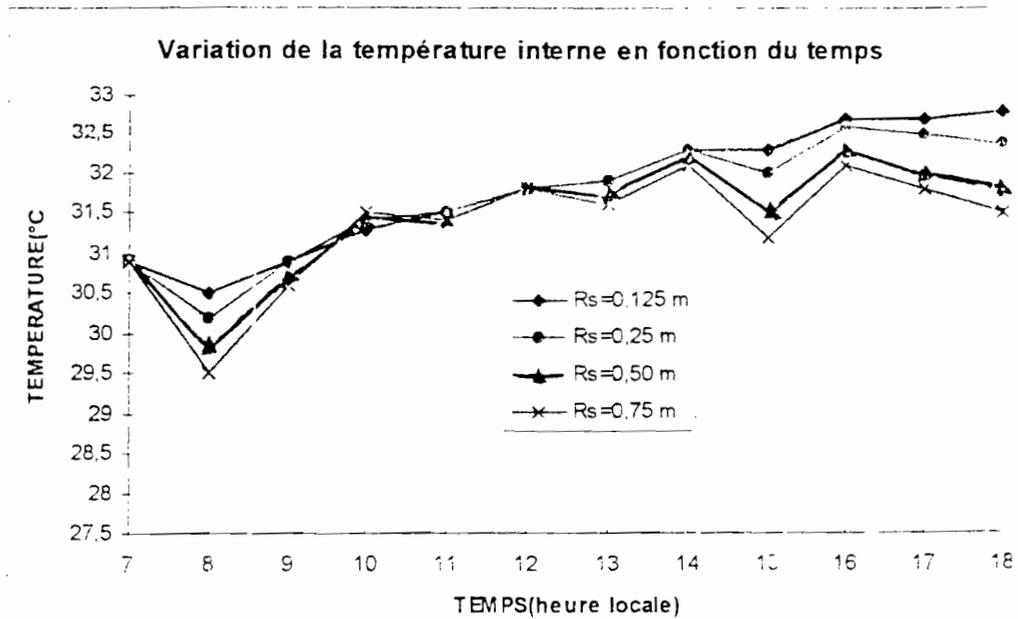


FIGURE.4.9.b Evolution de la température interne en fonction de l'ouverture

CASE FERMÉE (NUIT DU 8-9/10/88)

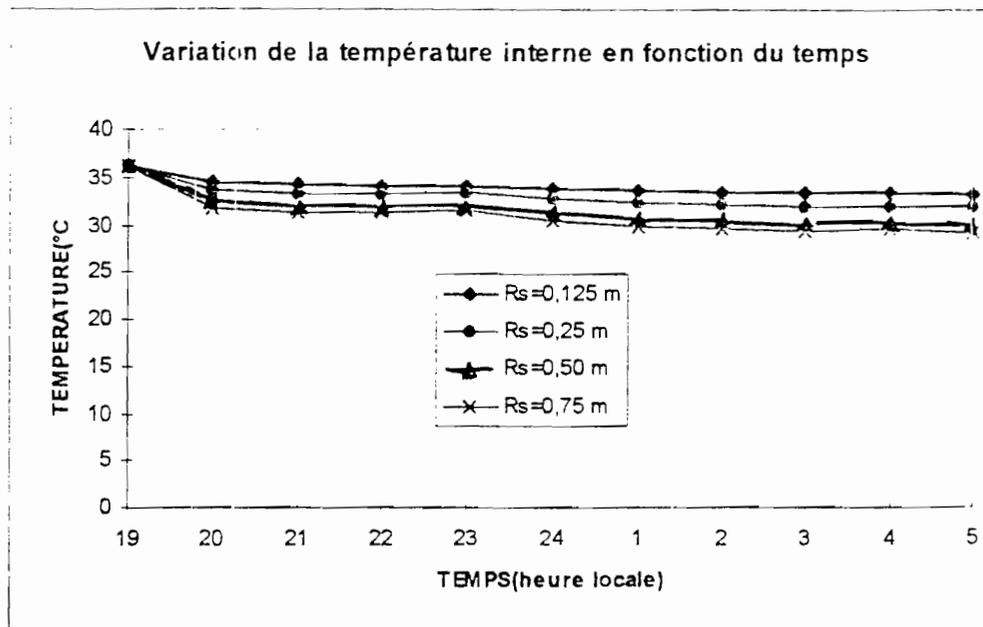


FIGURE.4.9.c Evolution de la température interne en fonction de l'ouverture

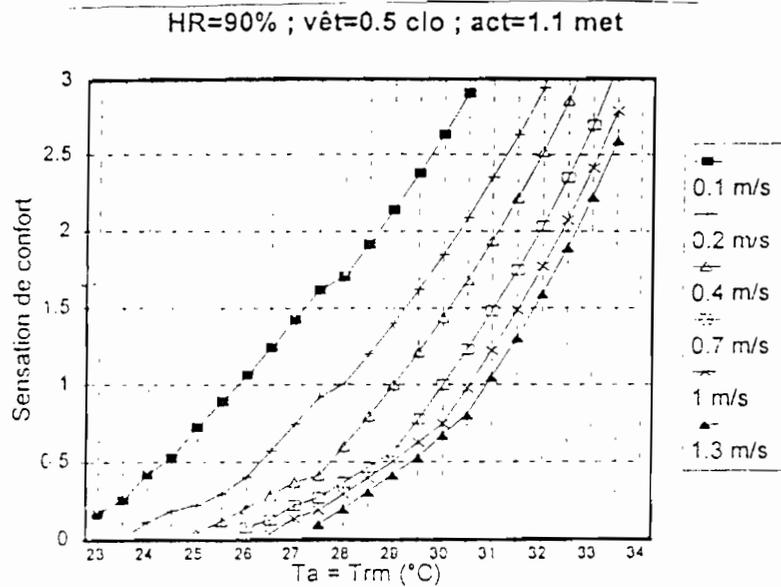


FIGURE.4.10: Effet des vitesses d'air sur la sensation de confort [5]

TABLEAU.4.1: Effets de la vitesse d'air sur le confort

Vitesse (m/s)		Effet probable
0	0,25	imperceptible
0,25	0,5	agréable
0,5	1	on a constamment conscience du mouvement d'air
1	1,5	sensation de courant d'air, gênante
plus de	1,5	inconfort du point de vue de la santé

Après avoir indiqué les solutions de l'inconfort thermique par amélioration de la vitesse de convection naturelle, nous allons nous intéresser à la contribution de l'enveloppe sur le comportement thermique de l'habitat.

La figure.4.11 de la première simulation(cf. tableau.4.2) montre la qualité thermique du géobéton par rapport aux matériaux dits modernes. La mauvaise réponse thermique de l'habitat expérimental ne saurait donc être résolue par l'emploi des matériaux dits modernes. Ainsi, la recherche de confort doit être orientée vers les matériaux locaux.

La figure.4.12 de la même simulation montre une étude comparative entre les matériaux locaux.

Sur cette figure l'intervalle d'inconfort se situe entre 9^h et 14^h avec des matériaux comme la tuile et la paille comprimée.

L'avantage des matériaux comme la tuile et la paille comprimée est la réduction de la température aux heures de sensation d'inconfort qui s'étaient de 15^h à 18^h avec le géobéton. Cette réduction de la température pour ces deux types de matériaux est due aux faibles coefficients d'absorption et d'émission et à la faible valeur de la capacité calorifique.

Les courbes nocturnes avec la tuile et la paille comprimée montrent une réduction très sensible de la température qui peut atteindre 3°C; ce qui est un avantage considérable pour le confort thermique.

Il ressort alors de ces analyses, la qualité thermique de la paille comprimée et de la tuile en tant que matériaux constitutifs de la toiture.

Pour l'amélioration du confort thermique, il serait donc bon de s'orienter vers ces deux matériaux; toutefois, nous préconisons l'emploi de la tuile à la place de la paille comprimée pour des raisons de sécurité (risque d'incendie par exemple) et de la durabilité du matériau (problème de réfection quotidienne dû à l'usure).

La figure.4.12 montre que pour des périodes se situant entre 9^h et 14^h la paille comprimée et la tuile augmentent la température de l'enceinte.

L'élévation de la température interne due au caractère d'isolant thermique de ces matériaux peut s'expliquer par le fait que le logiciel ne prend pas en compte la discontinuité entre le toit et le mur. Cette discontinuité vient du fait que ces matériaux ne posent pas sur le mur lorsqu'ils constituent la toiture.

Elle serait un facteur important d'évacuation de la chaleur par ventilation horizontale; cette situation explique le meilleur confort des habitats traditionnels aux heures indiquées.

Comme la ventilation par effet de cheminée est un phénomène général et indépendant du matériau de la toiture, une ouverture au niveau du toit sera un appoint à la ventilation horizontale. Nous aurons alors un refroidissement par double ventilation: horizontale et verticale.

Au terme de cette étude il ressort que :

- le choix du matériau de la toiture est un facteur déterminant dans la réponse thermique de l'habitat;
- même si le géobéton est un matériau inadapté à la toiture de l'habitat, les matériaux importés le sont encore plus;
- les matériaux locaux sont les matériaux les mieux adaptés à la toiture des habitats dans les régions à climat tropical humide.

Nous avons ainsi un argument scientifique pour soutenir la politique d'utilisation des matériaux locaux dans les habitats en construction.

Après l'analyse de la contribution des matériaux de la toiture, nous allons nous intéresser à l'apport des matériaux du mur sur la réponse thermique de l'habitat.

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

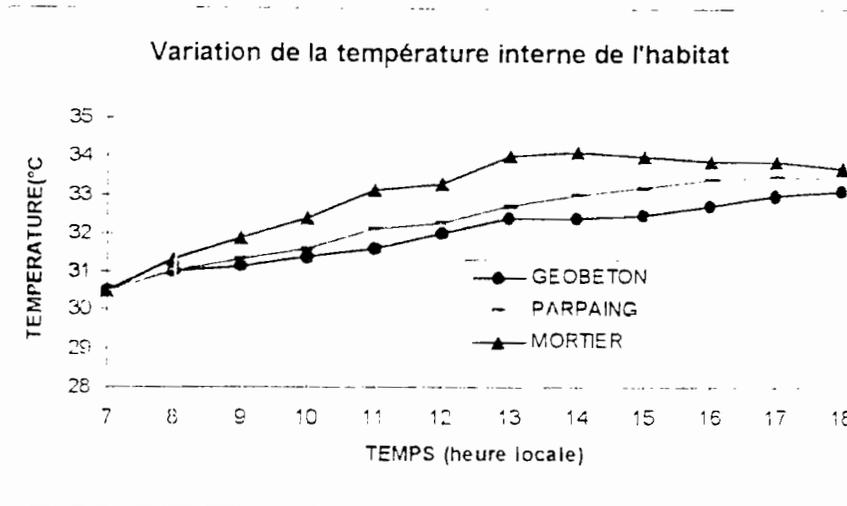


FIGURE.4.11.a Evolution de la température interne en fonction des matériaux (géobéton et matériaux modernes)

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

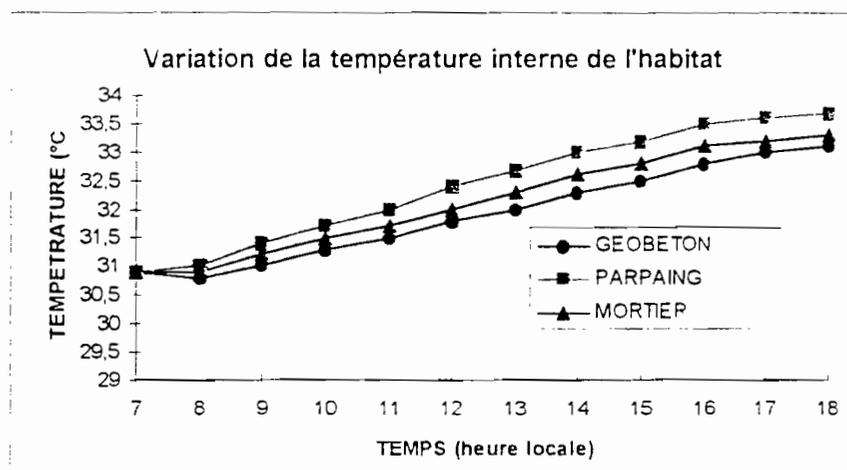


FIGURE.4.11.b Evolution de la température interne en fonction des matériaux (géobéton et matériaux modernes)

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

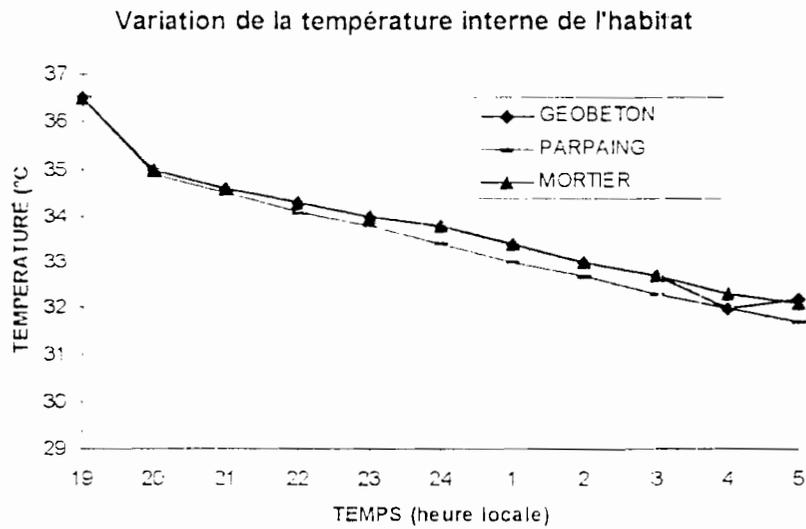


FIGURE.4.11.c Evolution de la température interne en fonction des matériaux (géobéton et matériaux modernes)

CASE FERMEE (JOURNEE DU 23/09/88)

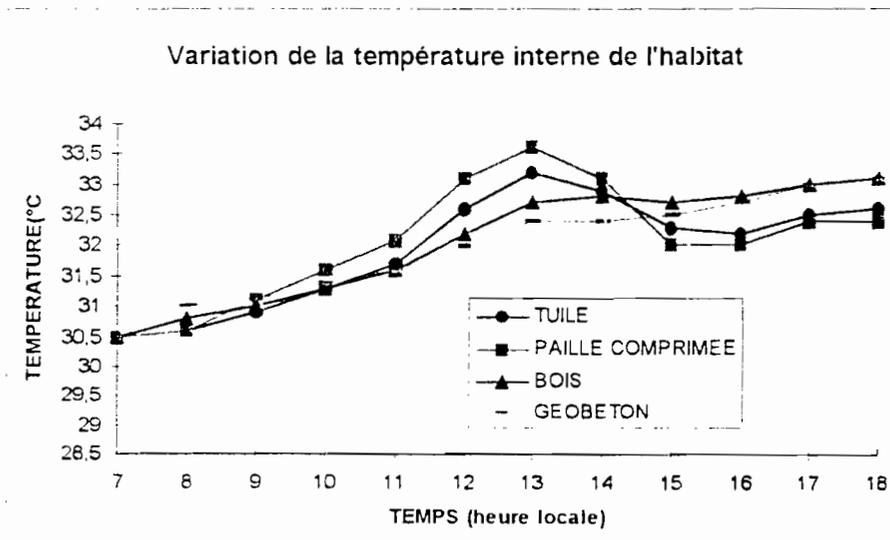


FIGURE.4.12.a Evolution de la température interne en fonction des matériaux locaux

CASE OUVERTE (JOURNEE DU 26/09/88)

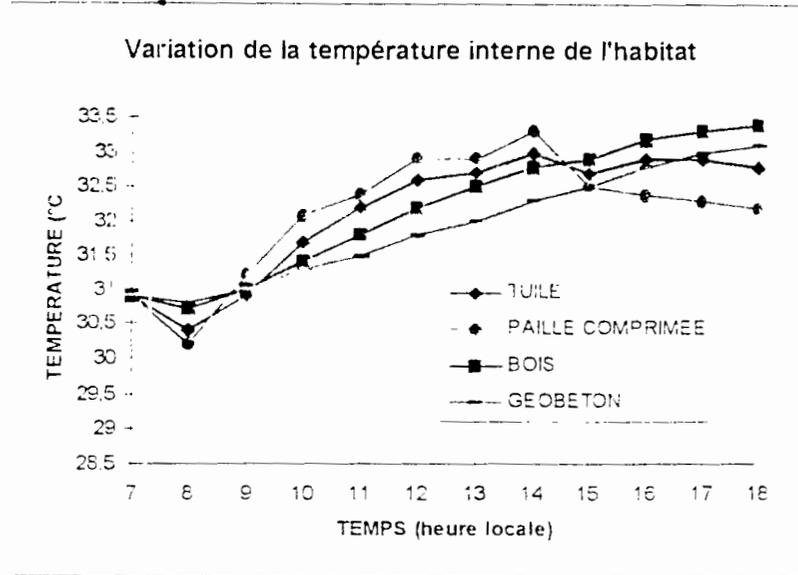


FIGURE.4.12.b Evolution de la température interne en fonction des matériaux locaux

CASE FERMEE (NUIT DU 8-9/10/88)

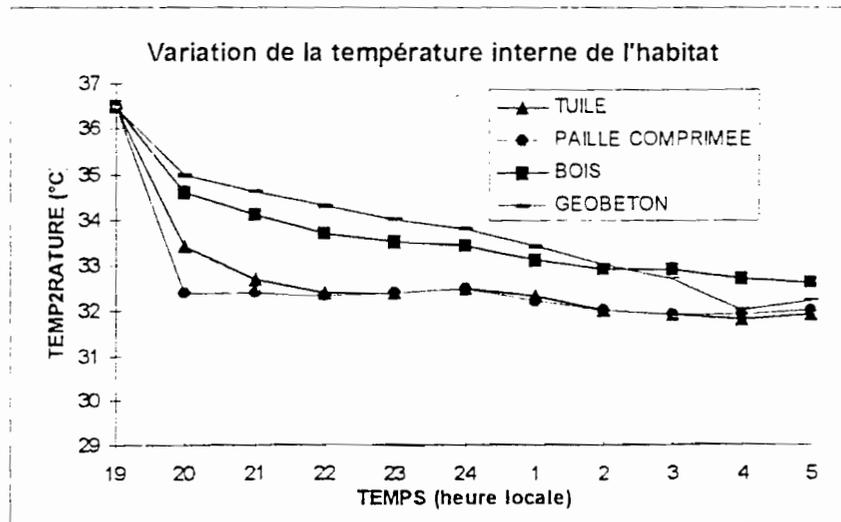


FIGURE.4.11.c Evolution de la température interne en fonction des matériaux locaux

III.3.2 EFFET DE LA NATURE DU MATERIAU DU MUR

La typologie des maisons traditionnelles laisse entrevoir que le géobéton en tant que constituant de l'enveloppe du mur n'est pas un matériau inadapté. Toutefois dans le souci de l'amélioration du confort de l'habitat et face à l'utilisation des matériaux importés, il paraît nécessaire de s'intéresser au fait de savoir quel sera le matériau qui, constituant l'enveloppe du mur engendrerait le meilleur confort dans la case ronde.

Pour cela nous avons représenté l'évolution de la température interne de l'habitat en fonction de la nature du matériau du mur (figure.4.13).

Il ressort de l'analyse de ces courbes de la figure.4.13 que le géobéton est le matériau qui permet d'avoir un meilleur confort dans l'habitat étudié.

Il est d'autant meilleur que l'écart entre sa réponse et celle des autres qui était d'au moins $0,6^{\circ}\text{C}$ s'accroît au moment où les courbes passent par leur maximum: soit 1°C .

Le résultat de la figure précédente montre que le géobéton est un matériau inadapté pour la toiture, mais il serait désastreux de le remplacer par les matériaux dits modernes.

Nous pouvons donc suggérer l'emploi des matériaux locaux dans la construction des habitats si nous voulons avoir un bon confort thermique à moindre coût.

III.3.3 CONCLUSION

Les réponses thermiques du toit et du mur des études précédentes permettent de dresser un prototype d'habitat bioclimatique qui serait un habitat fait entièrement en matériaux locaux.

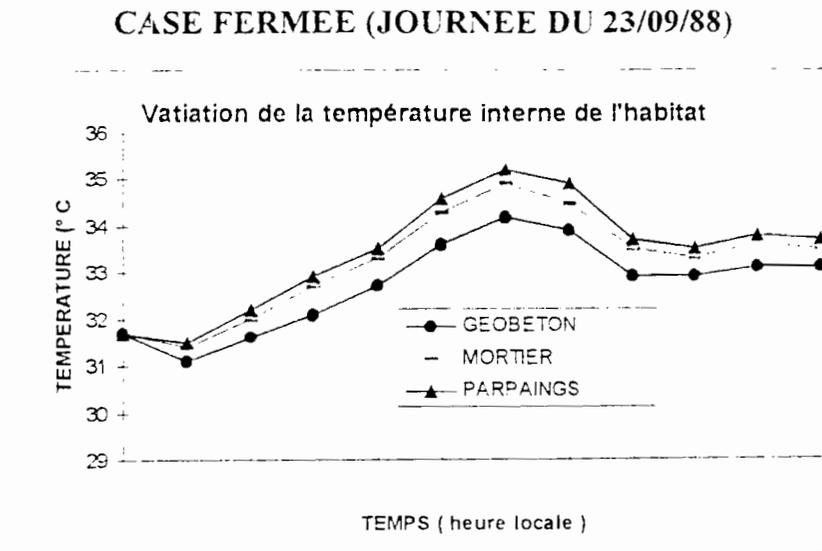


FIGURE.4.13: Evolution de la température interne en fonction du matériau du mur

IV CONCLUSION PARTIELLE

Il apparaît donc que le modèle prévisionnel permet de suivre le comportement thermique de l'habitat.

La qualité du modèle bidimensionnel montre qu'il est important d'utiliser un code de calcul qui tient compte des conductions radiale et orthoradiale.

L'étude énergétique a permis de déceler les sources d'inconfort thermique et de proposer des solutions de confort (effet de cheminée, utilisation de divers types de matériaux, isolation thermique de l'habitat).

Les solutions proposées par cette étude ont été confirmées par l'exploitation du modèle prévisionnel.

L'exploitation du modèle a été de valider les solutions de l'étude énergétique mais aussi de montrer l'apport des matériaux locaux dans l'amélioration du confort thermique.

En effet, l'utilisation des matériaux tels que la tuile et la paille à la toiture de l'habitat a permis de réduire l'inconfort thermique de l'habitat sur un intervalle de quatre heures.

L'étude de la réponse thermique de l'habitat lorsque le mur est en géobéton et en parpaing de ciment a montré que le géobéton réduit la température interne d'environ 1°C aux heures de sensation d'inconfort.

La qualité thermique de ces matériaux incite à leur intégration dans les habitats contemporains.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

A. CONCLUSION GENERALE

L'étude bibliographique a permis de se rendre compte de la qualité thermique des maisons traditionnelles et surtout de l'inadaptation des maisons modernes au climat tropical humide.

Dans le but de permettre l'intégration des matériaux locaux dans la construction des habitats, l'étude expérimentale a été effectuée sur une case en géobéton située en zone tropicale humide. L'analyse des résultats expérimentaux a montré un fort taux d'inconfort thermique de la case ronde et le déséquilibre thermique entre le côté NE et le côté SO de l'habitat.

Notre contribution a été de localiser les sources principales d'inconfort et de proposer un habitat bioclimatique de meilleur confort thermique.

Pour cela, nous avons étudié successivement les différents modes de transmission de chaleur pour aboutir aux équations de modélisation de l'habitat. Une étude détaillée des échanges radiatifs a été effectuée pour une meilleure analyse des échanges thermiques entre l'habitat et son environnement.

Nous avons ensuite mis au point un logiciel de simulation unidimensionnelle de l'habitat. Dans ce logiciel, la détermination des températures des faces des parois se fait par la méthode de CRANK-NICOLSON et la température interne de l'enceinte s'obtient par la méthode de RUNGE-KUTTA d'ordre 4 (RK4).

Pour tenir compte du déséquilibre thermique entre les côtés NE et SO de l'habitat, nous avons mis au point un logiciel de simulation bidimensionnelle. Pour ce modèle, les températures internes des parois sont obtenues par la méthode de PEACEMAN-RACHFORD ou ADI, la température interne de l'habitat par la méthode de RUNGE-KUTTA d'ordre 4 et les températures des faces des parois par la méthode de la variation de l'énergie interne d'un élément de volume.

Une fois les modèles mis en place, nous les avons d'abord validés et ensuite effectué une étude comparative des deux modèles en vue de déterminer le modèle prévisionnel.

La validation a montré que les modèles théoriques traduisaient de façon satisfaisante la réponse thermique de l'habitat.

L'étude comparative a montré que le modèle bidimensionnel traduisait plus correctement la réponse thermique de l'habitat expérimental. Ceci met en exergue l'importance de la conduction orthoradiale.

Nous avons enfin procédé à une exploitation du modèle afin de déterminer le prototype d'habitat bioclimatique capable de procurer un niveau de confort appréciable.

Pour ce faire, d'abord une étude énergétique a été menée pour localiser les sources principales d'inconfort (ventilation naturelle insuffisante, grande inertie de la toiture) et proposer des solutions de confort (effet de cheminée, utilisation de matériaux à faible inertie au niveau de la toiture). Pour la recherche de matériaux adaptés à la toiture, une étude comparative a été menée entre le géobéton et les matériaux dits modernes (parpaing et mortier) et d'autre part entre le géobéton et les autres matériaux locaux (tuile, paille comprimée, bois). Cette étude appliquée à la tôle a montré que le modèle n'était pas applicable aux enveloppes minces.

Ensuite le modèle a servi à vérifier la justesse des solutions de l'étude énergétique.

Il est ressorti à l'issue de l'exploitation du logiciel que le prototype d'habitat d'ambiance confortable est le suivant:

- ◆ habitat de mur en géobéton, de forme cylindrique;
- ◆ habitat dont la toiture, faite en tuile, est munie d'un orifice au niveau du sommet;

Ce prototype d'habitat montre l'importance des matériaux locaux dans l'obtention d'un confort à moindre coût.

B. PERSPECTIVES

En tenant compte du fait que le modèle ne soit pas applicable aux enveloppes minces, nous suggérons une amélioration du modèle en vue d'intégrer les enveloppes minces. Cette intégration permettra la prise en compte de l'analyse de la réponse thermique de l'habitat lorsque la toiture est en tôle.

En tenant compte du fait que les températures obtenues par les différents moyens de résolution du problème de l'inconfort sont encore élevées, nous préconisons l'emploi d'une ventilation artificielle comme solution d'appoint. Ceci aura pour effet d'accentuer la convection interne.

L'alimentation de ce ventilateur se fera par des panneaux solaires pour une limitation des dépenses énergétiques.

Nous aboutirons alors à l'ère d'une nouvelle architecture dite "solaire" où le confort à moindre coût est assuré par la conjugaison de matériaux locaux et d'une ventilation naturelle couplée d'une ventilation artificielle assurée par des ventilateurs alimentés par des panneaux solaires.

BIBLIOGRAPHIE

{1} Casimir MUSERUKA

Etude thermique d'un habitat bioclimatique entièrement construit en géobéton
Diplôme d'Etude Approfondie (D.E.A.) option énergie solaire, Décembre 1991

{2} A. D. OCHOU et Al

Etude des précipitations par satellite en Côte d'Ivoire
Veille Climatique Satellitaire n°38 Juillet 1991

{3} M. TRAORE

Construire avec le climat tropical. Recommandation aux concepteurs et aux pouvoirs publics
Centre de Recherche Architecturales et Urbaines. Université d'Abidjan, juillet 1982

**{4} A. GRELAT, R. FAUCONNIER,
M. TITECAT**

Rapport final: Habitats climatiques. 1. du calcul à la conception
Aide à la conception thermique de l'habitat courant en Afrique Tropicale
30, Décembre 1983

{5} SANGKERTADI

Contribution à l'étude du comportement thermoaéranulique des bâtiments en climat tropical humide. Prise en compte de la ventilation naturelle dans l'évaluation du confort.
Thèse, soutenue le 23 décembre 1994 I.N.S.A, Lyon

{6} Roberto COSTA

Architecture in black Africa between development and tradition
Solar & Wind Technology vol 6, n°4 1989, pp 383-387

{7} H.P. GARG and R.L. SAWHNEY

A case study of passive solar houses built for three climatic conditions of India
Solar & Wind Technology vol 6, n°4, pp 401-418, 1989

{8} N. BORDA DIAZ, P.I. MOSCONI and J.A. VAZQUEZ

Passive cooling strategies for a building prototype design in a warm-humid tropic climate
Solar and Wind Technology vol 6, n°4 1989, pp 389-400

{9} **M.A. GULMA, S.L. LORENZO and J.O. FALAIYE**

Passive solar houses in Northern Nigeria: the West African Sub-Region
Solar and Wind Technology vol 6, n°4 1989, pp 427-431

{10} **C.N. AWANOU et P.F. KIENO et al**

Climatisation en pays chauds et secs par toiture diode
Revue Phys. Appl.22(1987) 413-423, juin 1987

{11} **A. GBANE**

Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'une cellule solaire équipée de deux capteurs cheminées Est et OUEST: Modélisation et validation des formules théoriques
Thèse 3^e cycle soutenue le 22 novembre 1996 à l'Université de Cocody-Abidjan.

{12} **G. L. OKA**

Analyse par la méthode de fluorescence X à dispersion énergétique: Application au dosage d'éléments majeurs, mineurs et traces dans des échantillons de géobéton.
Thèse 3^e cycle soutenue le 21/11/1991 à l'université d'Abidjan.

{13} **D.A. Mc. INTYRE**

Three approaches to thermal comfort
ASHRAE transactions 1978 vol 84 part 1, p.101-109

{14} **R. J. De DEAR., K.G. LEAW, A. AMUN**

Thermal comfort in the humid tropics-part 1: climate chamber experiments on temperature preferences Singapore
ASHRAE transactions, 1991, vol 97. p.880-886

{15} **MAS SANTOA**

Climatic factors and their influence on the design of buildings in hot humid country with special reference to Indonesia
Thesis of PhD University of Queensland. 1986 850p.

{16} **J.F. BUSH**

A tale of two populations; thermal comfort in air conditioned and naturally ventilated offices in Thailand
Energy and buildings, n°18, 1992. P.235-239

{17} J.C. DEVAL

Etude théorique et expérimentale du confort thermique en climat tempéré et en climat chaud

Thèse docteur ingénieur. Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Paris 1985. 234p.

{18} J. GANDEMER

Analyse du phénomène vent du milieu bâti.

Actes de colloque. Architecture climatique. Collioure: Plan construction.1979 p.239-244

{19} P.O. FANGER

Thermal comfort

Mac Graw Hill 1970 244P;

{20} C. CELESTINE

Ventilation naturelle et confort thermique dans l'habitat en climat tropical humide. Approche expérimentale en vraie grandeur de la ventilation naturelle sur un site de la Guadeloupe. Etude comparative en soufflerie.

Thèse de docteur ingénieur, INSA Lyon, 1985, 222p.

{21} M. MIRAMOND

Méthodologie de concept de bâtiment. Un système de conception assisté par ordinateur. Evaluation techniques et économiques d'avant projet.

Thèse docteur es-sciences, INSA Lyon, 1981.208p.

{22} D. DURAND

La systémique

Press universitaire de France, Paris 1987, 125p.

{23} B. WALLISER

Systèmes et modèles.

Edition du seuil, 1977. 248p.

{24} W.H. MAC ADAMS traduit par A. BEAUFILS

Transmission de la chaleur

Tome 1 deuxième édition Dunod, Paris 1964

{25} **A. BOUVENOT**

Transfert de chaleur
Collection Technologies , Masson, 1981

{26} **F. KREITH traduction et adaptation par Kodja BADR-EL-DINE**

Transmission de la chaleur et thermodynamique
Masson et compagnie éditeurs, 1967

{27} **CH BORY**

Energétique(tome1) les échanges de chaleur par convection(1^{ère} partie).
Bordas/mouton. Collection études supérieures 1968. pp.13-25

{28} **Yogesh JALURA. K.E. TORRANCE**

Computational Heat Transfert
A subsidiary of harper & row, publishers, Inc, 1986

{29} **B. PERRIN**

Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux poreux non saturés utilisés en génie civil.
Thèse de doctorat d'état, université Paul Sabatier de Toulouse, 31 Janvier 1985

{30} **FAUCONNIER**

Etude des transferts simultanés de chaleur et d'humidité dans les parois multicouches. Application à la modélisation du comportement hygrothermique des locaux en régime varié.
UTI Saint Remy lès chevreuse, Novembre 1982.

{31} **C.S.T.B.**

Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction
D.T.U., Février 1975

{32} **A. GRELAT, R. FAUCONNIER**

C.E.B.T.P Divisions thermique
Rapport de recherche,506107-1980

{33} **J.F. SACCADURA**

Initiation aux transferts thermiques
Technique et Documentation ,1980

{34} Pierre MILLAN

Analyse de la convection dans une maquette de cellule d'habitation à serre thermoconvective.

Thèse du diplôme de docteur de spécialité mécanique aérothermique
Université Paul SABATIER de Toulouse, 1983

{35} WARNER

Turbulent natural convection, advances in heat transfert

Vol 4, academics press 1967

{36} Faouzi BERRADA

Contribution à l'étude du comportement thermique des parois de locaux par la méthode des fonctions d'influence

Thèse de doctorat troisième cycle spécialité: génie civil Toulouse, 1984

{37} SPARROW et TIEN

forced convection heat transfert at an inclined square plate

Journal of heat transfert Vol 23, p 541-542

{38} Louis Bernard WIART

Etude des mouvements convectifs dans un mur-serre à l'aide d'un thermoanémomètre à impulsions

Thèse de doctorat de spécialité mécanique des fluides , Toulouse ,1981

{39} R. CADIERGUES

La solution rationnelle pour le calcul des régimes variés

Promoclim E. Tome 9 E -n°5 décembre 1978

{40} Wanuff OLIPHANT

Measure of wind speed distribution across a solar collector

Solar energy Vol 24, p 403-406

{41} M. BAILLY

Thermodynamique technique. 2.a Production et transfert de la chaleur, écoulement

Edition Bordas 1971

{42} **Frank KREITH & Jan F. KREIDER**

Principal of solar engineering
Hemisphere publishing corporation, 1978

{43} **R. BERNARD, G. MENGUY, M. SCHWARTZ**

Le rayonnement solaire conversion thermique et application
deuxième édition augmentée Technologie et documentation
Lavoisier 75008 Paris, 1980

{44} **John E. HAY**

Calculating Solar Radiation for inclined surfaces :Practical approaches
Renewable Energy vol 3, number 4 / 5, June / July 1993

{45} **H.P. GARG and Gouri DATTA**

Solar radiation fundamentals and characteristics of solar radiation
Renewable Energy vol 3, number 4/5, June / July 1993

{46} **M.A. YAGHOUBI and A. SABZEVARI**

Studies, on Simulations of Passive Solar Buildings
Solar and Wind Technology vol 4, n°4, pp 337 -346 .1987

{47} **John LIENHARD**

Radiative Heat Transfert: a heat transfert textbook
Prentice-Hall, Inc englewood cliffs New Jersey 07632, 1981

{48} **M. RAOUST**

*Incidence de l'énergie solaire et du rayonnement Grande Longueur
d'Onde sur le comportement thermique des parois*
Contrat plan de construction, le 12 Juin 1980-Paris

{49} **SMITH**

*The effect of a self consistent effective ambient temperature on collector efficiency
parameters*
Solar energy . vol 20 - 1. 1978

{50} **R. SIEGEL, J.R. HOWELL (1966)**

Thermal radiation heat transfert, 1972

{51} **P. DEPECKER, J. BRAU, F. ALLARD**

Allocation spatiale des masses thermiques pour l'habitat solaire passif. Revue internationale d'héliotechnique
deuxième trimestre, 1982

{52} **Danielle DAROLLES**

Couplages Transfert de Chaleur et de Masse à la surface de matériaux poreux utilisés en génie civil lors de séchages en écoulements turbulents
Thèse de doctorat de l'université Paul SABATIER Spécialité: génie civil 19 Juin 1987

{53} **J.P. TRIPLET, G. ROCHE**

Métrologie Générale
deuxième édition 1977 Ecole Nationale de la Métrologie

{54} **M. BAILLY**

Thermodynamique Technique 2b. Machines thermiques et frigorifiques;
Tables numériques. Editions Bordas, 1971

{55} **T. MAILLARDET et J. M. VIEILLARD**

L'indépendance énergétique de la maison
Editions Eyrolles 75005 Paris, 1981

{56} **GRIMER**

Theoretical consideration in the use of small passive solar test boxes.
S.E Vol 22, p.343-350

{57} **R. COMOLET**

Mécanique expérimentale des fluides . Tome II : Dynamique des fluides réels, turbomachines
3^e édition Masson, 1982.

{58} **Benjelloum YOUNES**

Etude des transferts de chaleur par convection naturelle en espace confiné: stabilité des écoulements et ajustement des profils de température
Thèse de doctorat d'état es science de l'université SIDI Mohamed Ben Abdellah, soutenue le 23 Novembre 1992

{59} **P. Laurent-GENGOUX & D. TRYSTRAM**

Comprendre l'informatique numérique
Edition Lavoisier Tec & Doc, Avril 1989

{60} **Thierry ROBIN**

Mathématiques Physique et Basic
Edition Marketing copyright, 1986

{61} **Mohamed E. SHOBOKSHY and M. H. FAHMY**

Studies, on simulations of passive solar buildings
Solar and Wind Technology vol 4, N°4, pp337-346, 1987.

{62} **Lee W. JOHNSON and R. Dean RISS**

Numerical analysis
second edition, 1982

{63} **D. CACCAVELLI**

Modélisation du comportement thermique des bâtiments multizones. -Adaptation à un processus de conception
Thèse doctorat, INSA-Lyon, 1988. 477p.

{64} **S.V. SZOKOLAY**

Environmental Science Handbook
London. construction press. 1980, 530 P.

{65} **Cathérine TOURRAND**

Caractérisation thermique des parois complexes utilisés dans l'habitat.
Thèse du diplôme de doctorat de spécialité physique des systèmes énergétiques.
Université Paris VII, 21 Juillet 1991.

ANNEXE 1

COORDONNEES SOLAIRES

A1 POSITION DU SOLEIL A UN INSTANT DONNE {43}

Il existe des tables, toujours compliquées, permettant le calcul de la position du soleil en fonction du temps, comme l'American Ephemeris et le Nautical Almanac.

Les formules suivantes dérivent des tables précitées et permettent le calcul de la position du soleil à mieux 0,01 ° près. L'origine des temps est fixée au 1er Janvier 1980, à midi G.M.T.

A1.1 CALCUL DU TEMPS

posons $\Delta = \text{année (année dans laquelle on se trouve)} - 1980$
(année de référence) et $\text{bissex} = \Delta / 4 \text{ [mod 4]}$

Nous avons l'expression suivante du temps :

$\text{temps} = 365.\Delta + \text{bissex} + \text{jour} - 1$ $+ (\text{heures} + (\text{minutes} + \text{minutes} + \text{secondes} / 60) / 60) / 24$
--

Si $(\Delta = \text{bissex} . 4)$ alors $\text{temps} = \text{temps} - 1$.

Si $(\Delta < 0)$ et $\Delta \neq (\text{bissex} . 4)$, $\text{temps} = \text{temps} - 1$

Dans ces formules jour est le numéro du jour depuis le 1er Janvier sauf pour les années bissextiles pour lesquelles on soustrait 1 au numéro du jour avant le 1er Mars .

A1.2 LONGITUDE DU SOLEIL SUR L'ECLIPTIQUE

$$\theta = 2.\pi. \text{ temps} / 365,25$$

$$\text{anomalie de la terre} : g = -0,031271 - (4,53963.10^{-7}) . \text{ temps} + \theta$$

$$L' = 4,900968 + 3,67474.10^{-7}.\text{temps} + (0,033434 - 2,310^{-9} . \text{ temps}).\sin (g)$$

$$+ 0,000349.\sin (2.g) + \theta$$

A1.3 ASCENSION DROITE α ET DECLINAISON δ

$$\tan (\alpha) = \sin (\varepsilon) . \tan (L')$$

si $\alpha < 0$ alors $\alpha = \alpha + 2 . \pi$ radians

$$\sin (\delta) = \sin (\varepsilon) . \sin (L')$$

ε = angle de l'écliptique et de l'équateur céleste :

$$\varepsilon = 23,4420^\circ - (3,56^\circ . 10^{-7} . \text{ temps})$$

A1.4 TEMPS SIDERAL

1 jour standard = 1,0027379 jour sidéral

$$T_s = 6,720165 + 24.(\text{ temps} / 365,25 - (\text{ année} - 1980)) + 1,411.10^{-6}.\text{temps}$$

T_l = temps local standard (temps légal) ; TU = temps universel

fuseau = fuseau horaire (+ vers l'ouest , - vers l'est)

C = correction de l'été , S = temps local sidéral

$$TU = TM + \text{fuseau} - C \qquad S = T_s - \text{longitude} + 1,0027379.TU$$

A1.5 COORDONNEES SOLAIRES

H = hauteur ; Z = distance zénithale; ω = angle horaire ; α = ascension droite; a = azimut.

$H = 90^\circ - Z$; $\omega = \alpha - \delta$ $\cos(Z) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$

$\sin(\alpha) = \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) / \sin(Z)$

comme a s'obtient en inversant la fonction sinus, les valeurs de Arcsin(a) fournies par les calculatrices sont comprises entre -90° et $+90^\circ$; or a peut dépasser ces limites. L'algorithme pour la correction est le suivant:

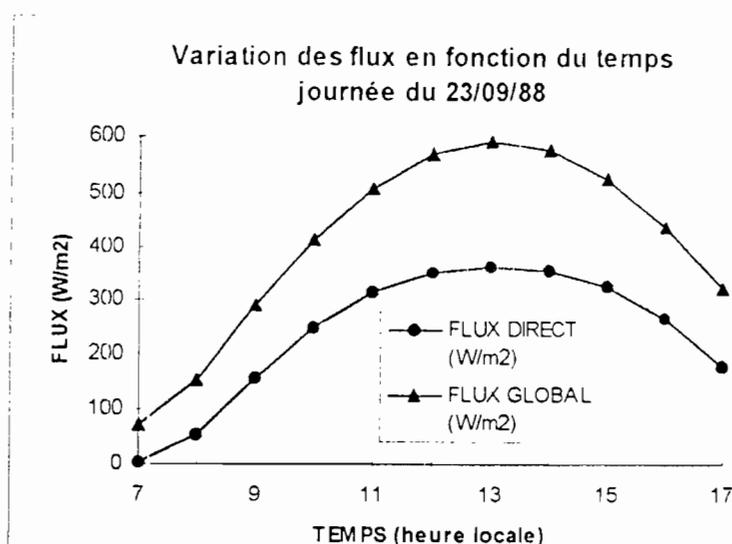
si $\cos(Z) < \sin(\delta) / \sin(\phi)$ et si $a < 0$ alors $a = a + 360^\circ$ sinon $a = 180^\circ - a$

A1.6 CORRECTION DE LA REFRACTION ATMOSPHERIQUE

hauteur du soleil au lever : $H_0 = -0,833^\circ - 0,0388^\circ \cdot \sqrt{h}$

h = altitude en mètres au-dessus du niveau de la mer

A1.7 EVOLUTION TEMPORELLE DES FLUX THEORIQUES



ANNEXE.2

DETERMINATION DE LA MATRICE DE FACTEUR DE FORME

A2.1 PROPRIETES DES FACTEURS DE FORME

- Si F_{ij} et F_{ji} sont les facteurs de forme entre deux parois en présence on a:

$$(1) A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

où A_i et A_j sont les surfaces des parois (i) et (j).

- Pour une enceinte fermée composée de n parois, la somme des facteurs de forme relative à une paroi (j) s'exprime comme suit:

$$(2) \sum_{i=1}^n F_{ji} = 1$$

A2.2 APPLICATION DES PROPRIETES

L'application de la formule (1) aux parois qui composent les enceintes de la figure.A2.1 donne:

- ◇ cas de l'enceinte formée par la toiture (t), le mur (m) et le plancher (s)

$$\underbrace{A_t F_{tm} = A_m F_{mt} ; A_t F_{ts} = A_s F_{st} ; A_s F_{sm} = A_m F_{ms}}_{(A)}$$

- ◇ cas de l'enceinte formée par la surface imaginaire (a), le mur (m) et le plancher (s)

$$\underbrace{A_a F_{am} = A_m F_{ma} ; A_a F_{as} = A_s F_{sa} ; A_s F_{sm} = A_m F_{ms}}_{(B)}$$

Si nous appliquons la relation (2) aux enceintes précédentes, nous obtenons:

- ◇ cas de l'enceinte formée par la toiture (t), le mur (m) et le plancher (s)

$$\underbrace{F_{tt} + F_{tm} + F_{ts} = 1 ; F_{mm} + F_{mt} + F_{ms} = 1 ; F_{ss} + F_{st} + F_{sm} = 1}_{(C)}$$

- ◇ cas de l'enceinte formée par la surface imaginaire (a), le mur (m) et le plancher (s)

$$\underbrace{F_{aa} + F_{am} + F_{as} = 1 ; F_{mm} + F_{ma} + F_{ms} = 1 ; F_{ss} + F_{sa} + F_{sm} = 1}_{(D)}$$

Conformément à la figure.A2.1, nous pouvons écrire les relations ci-après:

$$\underbrace{F_{ma} = F_{mt} ; F_{sa} = F_{st} ; F_{ta} = F_{tm} + F_{ts}}_{(3)}$$

A2.3 DETERMINATION DES FACTEURS DE FORME

◆ *Détermination du facteur de forme entre le plancher(s) et la surface A (a): F_{sa}*

Pour deux disques en regard (figure.A2.2), LIENHARD{47} donne comme facteur de forme entre les surfaces (1) et (2) la relation suivante:

$$(4) F_{12} = \frac{1}{2} \left[X - \sqrt{X^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right]$$

Les paramètres de la relation (4) s'expriment comme suit:

$X = 1 + \frac{1+R_2^2}{R_1^2}$ avec $R_1 = \frac{r_1}{H}$ et $R_2 = \frac{r_2}{H}$ où r_1 et r_2 désignent les rayons des deux disques, H la distance qui sépare les deux disques.

L'application de la formule (4) à la surface imaginaire A (a) et au plancher (s) de la figure.A2.1 donne:

$$F_{sa} = \frac{1}{2} \left[X - \sqrt{X^2 - 4 \left(\frac{R_a}{R_s} \right)^2} \right]$$

Comme $r_a=r_s=r$ nous avons: $R_a=R_s=R$ et $X = 1 + \frac{1+R^2}{R^2}$; de ce fait F_{sa} s'écrit alors:

$$F_{sa} = \frac{1}{2} \left[X - \sqrt{X^2 - 4} \right] \text{ avec } X = 1 + \frac{1+R^2}{R^2}$$

◆ *Détermination de F_{as}*

De la relation $A_a F_{as} = A_s F_{sa}$ nous obtenons $F_{as} = \frac{A_s}{A_a} F_{sa}$;

puisque $A_s=A_a$ alors:

$$F_{as} = F_{sa}$$

Nous avons alors l'expression de F_{st} : $F_{st} = F_{sa}$

◆ *Détermination de F_{aa} et F_{ss}*

Comme la surface A et le plancher ne se voit pas alors :

$$F_{ss} = F_{aa} = 0$$

◆ Détermination de F_{sm}

Le système (C) permet d'écrire que: $F_{sm} = 1 - F_{sa} - F_{ss}$. Cette relation peut de la manière suivante:

$$F_{sm} = 1 - F_{sa}$$

◆ Détermination de F_{ms}

De la relation $A_m F_{ms} = A_s F_{sm}$ nous obtenons:

$$F_{ms} = \frac{A_s}{A_m} F_{sm}$$

◆ Détermination de F_{am}

puisque $F_{aa} + F_{am} + F_{as} = 1$ on a: $F_{am} = 1 - F_{as}$. Donc

$$F_{am} = F_{sm}$$

◆ Détermination de F_{ma}

De la relation $A_m F_{ma} = A_a F_{am}$ nous obtenons $F_{ma} = \frac{A_a}{A_m} F_{am}$;

ainsi

$$F_{ma} = F_{ms}$$

◆ Détermination de F_{mt} et F_{st}

D'après la relation (3) on a:

$$F_{mt} = F_{ma} \text{ et } F_{st} = F_{sa}$$

◆ Détermination de F_{mm}

Comme $F_{mm} + F_{ma} + F_{ms} = 1$ on a: $F_{mm} = 1 - F_{ms} - F_{ma}$.

Puisque $F_{ma} = F_{ms}$ nous obtenons: $F_{mm} = 1 - 2F_{ms}$

◆ Détermination de F_{ts}

De la relation $A_t F_{ts} = A_s F_{st}$ nous obtenons:

$$F_{ts} = \frac{A_s}{A_t} F_{st}$$

◆ Détermination de F_{tm}

De la relation $A_t F_{tm} = A_m F_{mt}$ nous obtenons:

$$F_{tm} = \frac{A_m}{A_t} F_{mt}$$

◆ Détermination de F_{tt}

Comme $F_{tt} + F_{tm} + F_{ts} = 1$ nous avons:

$$F_{tt} = 1 - F_{ts} - F_{tm}$$

En appliquant les formules précédentes on obtient les relations suivantes:

$F_{tt}=0,29$	$F_{tm}=0,44$	$F_{ts}=0,27$
$F_{mm}=0,38$	$F_{mt}=0,31$	$F_{ms}=0,31$
$F_{ss}=0$	$F_{sm}=0,62$	$F_{st}=0,38$

En affectant à, l'indice t la valeur 1, l'indice m la valeur 2 et l'indice s la valeur 3 nous obtenons :

$F_{11}=0,29$	$F_{12}=0,44$	$F_{13}=0,27$
$F_{21}=0,31$	$F_{22}=0,38$	$F_{23}=0,31$
$F_{31}=0,38$	$F_{32}=0,62$	$F_{33}=0$

La matrice de facteur de forme s'écrit alors:

$$(FF) = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,29 & 0,44 & 0,27 \\ 0,31 & 0,38 & 0,31 \\ 0,38 & 0,62 & 0,00 \end{bmatrix}$$

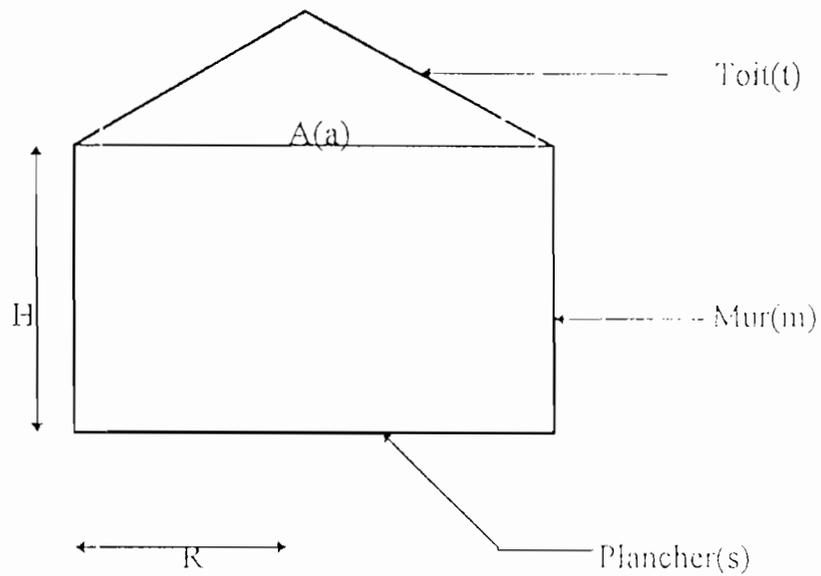


FIGURE.A2.1: Coupe longitudinale de la case ronde

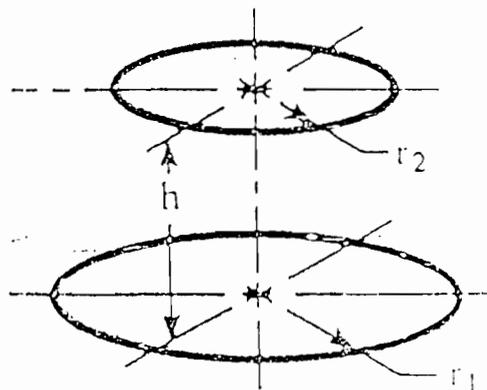


FIGURE.A2.2: Configuration pour la détermination du facteur de forme

