



HAL
open science

Etude de l'inertie thermique de parois : Cas des murs typiques de maisons d'habitation de Madagascar

Herimamy Naharitra Rabemanantsoa

► **To cite this version:**

Herimamy Naharitra Rabemanantsoa. Etude de l'inertie thermique de parois : Cas des murs typiques de maisons d'habitation de Madagascar. Génie civil. Université d'Antananarivo, 2021. Français. NNT: . tel-03157609

HAL Id: tel-03157609

<https://hal.science/tel-03157609v1>

Submitted on 8 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE DOCTORALE : INGENIERIE ET GEOSCIENCES

THESE

Présentée par

RABEMANANTSOA Herimamy Naharitra

En vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat de l'Université d'Antananarivo

En : Géosciences, Technologie des Poudres divisés et Ecobâtements

Etude de l'inertie thermique de parois :
Cas des murs typiques de maisons
d'habitation de Madagascar

Directeur de thèse : **RANAIVO RABEHAJA née RAHELIARILALAO**
Bienvenue, Professeur titulaire.

Promotion 2018



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE DOCTORALE : INGENIERIE ET GEOSCIENCES

THESE

Présentée par

RABEMANANTSOA Herimamy Naharitra

En vue de l'obtention du diplôme de

Docteur de l'Université d'Antananarivo

En : Géosciences, Technologie des Poudres divisés et Ecobâtements

***Etude de l'inertie thermique de parois :
Cas des murs typiques de maisons
d'habitation de Madagascar***

Soutenu le : 05 Février 2021

Devant la commission d'examen :

Président : Mr. RASOLOMANANA Eddy Harilala, Professeur Titulaire

Directeur de thèse : Mme. RAHELIARILALAO Bienvenue, Professeur Titulaire

Rapporteur interne : Mr. RAKOTONINDRAINNY, Professeur Titulaire

Rapporteur externe : Mr. RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné, Professeur

Examineurs : Mr. RAKOTOMALALA Jean Lalaina, Professeur Titulaire

Mr. RAJAONARISON Eddie Franck, Professeur

Promotion 2018

♥REMERCIEMENTS♥

Ce présent mémoire n'aurait pu avoir lieu sans la grâce de *DIEU*, aussi, je rends à Lui seul la gloire.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnages et entités qui m'ont aidé d'une façon ou d'une autre à la réalisation de cette thèse.

Ainsi, j'exprime mes vifs et sincères remerciements au :

❖ Professeur *RANDRIANJA Roger*, Directeur de l'Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE), qui nous a autorisé à soutenir cette thèse ;

❖ Professeur *RASOLOMANANA Eddy Harilala*, qui a bien voulu faire l'honneur de présider la soutenance de cette thèse ;

❖ Professeur *RANAIVO RABEHAJA née RAHELIARILALAO Bienvenue*, mon directeur de thèse, qui depuis le début n'a jamais cessé de me donner de l'aide et de conseils durant la réalisation de ce travail malgré ses diverses occupations ;

❖ Professeurs *RAKOTONINDRAINNY* et *RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné*, qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse ;

❖ Professeurs *RAKOTOMALALA Jean Lalaina* et *RAJAONARISON Eddie Franck*, qui malgré leurs responsabilités, ont bien voulu faire partie des membres de jury et d'examiner ce travail ;

Sans oublier tous mes collègues et mes amis du **CNRIT**, pour leurs collaborations et appuis à la réalisation de ce mémoire.

UN IMMENSE REMERCIEMENT à toute ma famille ; particulièrement à mon épouse, à mes parents, à mes frères et mes sœurs pour leur soutien en toute circonstance.

Enfin, je remercie l'ensemble des personnes qui du près ou de loin ont permis l'avancée et l'aboutissement de mes travaux mais également mon épanouissement personnel.

A toutes et à tous, MERCI !!!

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

NOMENCLATURE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE

PARTIE I – SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET ÉTAT DES LIEUX

CHAPITRE I - PHÉNOMÈNES PHYSIQUES LIÉS AU COMPORTEMENT
THERMIQUE DU MUR

CHAPITRE II - COMPORTEMENT THERMIQUE DYNAMIQUES DES
MURS SOUMIS À DES TEMPÉRATURES VARIABLES EN
SURFACE

CHAPITRE III - TYPOLOGIES DES MURS ET HABITAT-TYPES A
MADAGASCAR

PARTIE II – CARACTÉRISATION DE L'INERTIE THERMIQUE DES PAROIS-TYPES
DE MADAGASCAR

CHAPITRE IV - DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES
DES MATÉRIAUX

CHAPITRE V - APPROCHE EXPÉRIMENTALE DE LA MESURE DE
L'INERTIE THERMIQUE DES PAROIS

CHAPITRE VI - CARACTÉRISATION DES MURS SUIVANT LA NORME ISO
13786

CHAPITRE VII - RÉSULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXE 1 - MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION IDENTIFIÉS AUX AUTRES
COMPOSANTS DE BÂTIMENT

ANNEXE 2 - LIGNES DE COMMANDE SUR ARDUINO

ANNEXE 3 - EXTRAIT DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE ENREGISTRÉES DANS
LA CARTE MICRO SD

TABLE DES MATIÈRES

NOMENCLATURE

ABREVIATIONS

1D	:	Une direction
ASHRAE	:	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASTM	:	American Society for Testing and Material
CBAC	:	Cellule de mesure en brique d'argile cuite
CLO	:	Courtes longueurs d'Ondes
CTCB	:	Cellule de mesure en terre crue battue
CUS	:	Centres Urbains Secondaires
EDP	:	Equations aux Dérivées Partielles
EN	:	Norme Européenne
EPM	:	Enquête auprès des Ménages
FFT	:	Fast Fourier Transform
GCU	:	Grands Centres Urbains
GES	:	Gaz à Effet de Serre
GLO	:	Grandes longueurs d'Ondes
HHQE	:	Habitat Haute Qualité Environnementale
HVAC	:	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
INSTAT	:	Institut National de la Statistique
ISO	:	International Organisation for Standardization
LCD	:	Liquid Crystal Display
NF	:	Norme Française
NTC	:	Negative Temperature Coefficient
OTP	:	One Time Programmable
PCM	:	Phase Change Materials
PID	:	Proportionnel Intégral Dérivé
RT	:	Règlement Thermique
RTC	:	Real Time Clock
SSPCM	:	Symmetry and Structural Properties of Condensed Matter
USB	:	Universal Serial Bus
USI	:	Unité Système Internationale
VER	:	Volume Élémentaire Représentatif
ZEB	:	Zero Emissions Buildings

SYMBOLES ET UNITES

<i>Latins</i>	<i>Grecs</i>
a : diffusivité thermique [$m^2.s^{-1}$]	$\Delta H_{latente}$: enthalpie massique de transformation
arg : argument	Δt_f : retard thermique [s ou h]
b : effusivité thermique [$W.K^{-1}.m^{-2}.s^{1/2}$]	$(\Delta T_m)_{x=0}$: amplitude imposé en surface
C_0 : célérité de la lumière dans le vide 3×10^8 [$m.s^{-1}$]	$\Delta T(x)$: amplitude de température d'une face à une distance x
cos : cosinus	ΔT : différence entre température de surface de la paroi et température ambiante intérieure
$cosh$: cosinus hyperbolique	λ : longueurs d'ondes [μm]
C_p : Chaleur spécifique à pression constante [$J.kg^{-1}K^{-1}$]	λ_{eq} : conductivité thermique équivalente du mur [$W.m^{-1}K^{-1}$]
d : épaisseur du mur [cm]	λ_m : conductivité thermique du mortier de ciment [$W.m^{-1}K^{-1}$]
e : extérieure	δ : profondeur de pénétration périodique [m]
e_{clt} : épaisseur de la couche limite thermique [m]	$\mathcal{E}_{\lambda\theta\varphi}$: émissivité spectrale directionnelle
exp : exponentielle	ε_i : émittance thermique de la surface interne
$E_{m,lat}$: énergie stockée par chaleur latente	ε_e : émittance thermique de la surface externe
$E_{m,sens}$: énergie stockée par chaleur sensible	ρ : masse volumique [$kg.m^{-3}$]
f : facteur d'amortissement	θ_e : oscillations de la température extérieure [K]
$\overrightarrow{grad} T$: gradient de température	θ_i : teneur volumique en constituant i
G_{th} : conductance thermique [$W.K^{-1}$]	$\overline{\theta_e}$: moyenne de la température extérieure [K]
H : longueur caractéristique de la surface [m^2]	$\hat{\theta}_e$: amplitude complexe de la température extérieure [K]
h : hauteur de l'échantillon [m]	$\hat{\theta}_i$: amplitude complexe de la température intérieure [K]
h_i : coefficient de transfert de chaleur par convection et rayonnement à l'intérieur [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	
h_e : coefficient de transfert de chaleur par convection et rayonnement à l'extérieur [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	
h_{ce} : coefficient de transfert par convection à l'extérieur [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	
h_{ci} : coefficient de transfert par convection à l'intérieur [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	
h_{re} : coefficient de transfert par rayonnement à l'extérieur [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	
h_{ri} : coefficient de transfert par rayonnement à l'intérieur [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	
i : intérieure	
$j^2 = -1$	
K_1 : capacité thermique surfacique à l'intérieur [$kJ.m^{-2}K^{-1}$]	
K_2 : capacité thermique surfacique à l'extérieur [$kJ.m^{-2}K^{-1}$]	
$L_\lambda^0(\lambda, T)$: luminance du corps noir	
L : longueurs d'un échantillon [m]	
l : largeur d'un échantillon [m]	
mod : module	
$m - n - p$: coefficients liés à la rugosité de la paroi	
P : période de la variation [s]	
q_e : oscillation du flux de chaleur à l'extérieur [$W.m^{-2}$]	
Q : quantité de chaleur	
\dot{q} : densité volumique d'énergie générée [$W.m^{-3}$]	

<i>Latins</i>	<i>Grecs</i>
\bar{q}_e : moyenne du flux de chaleur à l'extérieure [W.m ⁻²]	$ \hat{\theta}_e $: module de l'amplitude complexe de la température extérieure [K]
\hat{q}_e : amplitude complexe du flux de chaleur à l'extérieur [W.m ⁻²]	$ \hat{\theta}_i $: module de l'amplitude complexe de la température intérieure [K]
\hat{q}_i : amplitude complexe du flux de chaleur à l'intérieur [W.m ⁻²]	ψ : déphasage des oscillations de la température [rad]
R_{th} : résistance thermique [K.W ⁻¹]	ϕ : flux de chaleur [W]
sin : sinus	φ : déphasage des oscillations du flux de chaleur [rad]
sinh : sinus hyperbolique	σ_0 : constante de Stefan-Boltzmann :
T_f : température du fluide [K]	5,67 10 ⁻⁸ [W.m ⁻² K ⁻⁴]
T_i : température de consigne à l'intérieur [K]	ω : fréquence angulaire [rad.s ⁻¹]
T_e : température de consigne à l'extérieur [K]	
T_{mi} : moyenne de la température ambiante et de la surface du côté intérieur [K]	
T_{me} : moyenne de la température ambiante et de la surface du côté extérieur [K]	
T_s : température de la surface [K]	
U : transmittance thermique en régime permanent	
v_f : vitesse du vent [m.s ⁻¹]	
Y_{ii} : module de l'admittance thermique à l'intérieur [W.m ⁻² K ⁻¹]	
Y_{ee} : module de l'admittance thermique à l'extérieur [W.m ⁻² K ⁻¹]	
Y_{ie} : module de la transmittance thermique périodique [W.m ⁻² K ⁻¹]	
Z : matrice de transfert de chaleur	

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Coefficients de la corrélation de <i>McAdams</i> en fonction du type de surface [6]....	6
Tableau 2 : Tableau des équivalences des grandeurs. [38]	18
Tableau 3 : Répartition de la population suivant le type de logement occupé, par milieu de résidence.	65
Tableau 4 : Types de matériaux de construction pour les murs extérieurs par région.	67
Tableau 5 : Classement des matériaux utilisés pour les murs extérieurs dans les habitats typiques Malgaches.	67
Tableau 6 : Les dimensions des échantillons en terre crue battue.....	71
Tableau 7 : Les dimensions des échantillons de brique adobe.....	72
Tableau 8 : Les dimensions des échantillons de brique d’argile cuite.	72
Tableau 9 : Les volumes moyens des échantillons testés.....	73
Tableau 10 : Masse moyenne de l’échantillon en terre crue battue.	73
Tableau 11 : Masse moyenne de l’échantillon en brique adobe.....	73
Tableau 12 : Masse moyenne de l’échantillon en brique d’argile cuite.....	74
Tableau 13 : Masse volumique apparente des différents types de mur.....	74
Tableau 14 : Propriétés thermophysiques des différents murs.....	76
Tableau 15 : Caractéristiques des parois de la cellule CBAC.....	79
Tableau 16 : Dimensions des deux cellules de mesure.	81
Tableau 17 : Spécifications techniques du capteur DHT11.	84
Tableau 18 : Extrait de données de températures prises lors de l’étalonnage des capteurs.	88
Tableau 19 : Extrait de données de température enregistrée sur les parois de la CBAC.	91
Tableau 20 : Extrait de données de la température ambiante à l’intérieur de la cellule CBAC.	92
Tableau 21 : Extrait de données de température enregistrée sur la paroi de la CTCB.....	93
Tableau 22 : Extrait de données de la température ambiante à l’intérieur de la cellule CTCB.	94
Tableau 23 : Epaisseurs des parois monocouches utilisées lors des calculs dans ISO 13786.	99
Tableau 24 : Températures moyennes journalières de la paroi 4 de CBAC.	100
Tableau 25 : Températures moyennes journalières de la paroi en terre crue battue.	100
Tableau 26 : Données des parois multicouches utilisées lors des calculs dans ISO 13786. ..	102
Tableau 27 : Températures moyennes journalières de la paroi 1 de CBAC.	102
Tableau 28 : Températures moyennes journalières de la paroi 2 de CBAC.	102
Tableau 29 : Températures moyennes journalières de la paroi 3 de CBAC.	103
Tableau 30 : Déphasage thermique et facteur d’amortissement thermique moyens.....	115
Tableau 31: Déphasage et facteur d’amortissement de quelques exemples de murs.....	117
Tableau 32 : Eléments de la matrice de transfert pour la paroi 4 de CBAC.	118
Tableau 33 : Eléments de la matrice de transfert pour la paroi en terre crue battue.	119
Tableau 34 : Admittances thermiques de la paroi 4 de CBAC.	120
Tableau 35 : Admittances thermiques de la paroi en terre crue battue.	120
Tableau 36 : Propriétés dynamiques de transfert thermique de la paroi 4 de CBAC.....	121
Tableau 37 : Propriétés dynamiques de transfert thermique de la paroi en terre crue battue.	121
Tableau 38 : Résistance et transmittance thermique de la paroi 4 de CBAC.....	123
Tableau 39 : Résistance et transmittance thermique de la paroi en terre crue battue.....	123
Tableau 40 : Eléments de la matrice de transfert pour la paroi 1 de CBAC.	125
Tableau 41 : Eléments de la matrice de transfert pour la paroi 2 de CBAC.	125
Tableau 42 : Eléments de la matrice de transfert pour la paroi 3 de CBAC.	126
Tableau 43 : Admittances thermiques des enveloppes multicouches.	126
Tableau 44 : Propriétés dynamiques de transfert thermique de la paroi 1 de CBAC.....	127

Tableau 45 : Propriétés dynamiques de transfert thermique de la paroi 2 de CBAC.....	128
Tableau 46 : Propriétés dynamiques de transfert thermique de la paroi 3 de CBAC.....	128
Tableau 47 : Résistance et transmittance thermique des enveloppes multicouches.	129
Tableau 48 : Admittances thermiques internes moyennes des parois de CBAC et CTCB. ...	129
Tableau 49 : Admittances thermiques externes moyennes des parois de CBAC et CTCB. ..	130
Tableau 50 : Transmittances thermiques périodiques moyennes des parois de CBAC et CTCB.	130
Tableau 51 : Déphasages thermiques moyens des parois de CBAC et CTCB.	130
Tableau 52 : Capacités thermiques internes moyennes des parois de CBAC et CTCB.....	130
Tableau 53 : Capacités thermiques externes moyennes des parois de CBAC et CTCB.....	130
Tableau 54 : Facteurs d’amortissement moyens des parois de CBAC et CTCB.	131
Tableau 55 : Transmittances thermiques moyennes des parois de CBAC et CTCB.	131
Tableau 56 : Déphasages thermiques expérimental et selon ISO 13786.	133
Tableau 57 : Facteur d’amortissement expérimental et selon ISO 13786.....	133
Tableau 58: Déphasage et facteur d’amortissement de quelques murs.....	134
Tableau 59 : Type de matériaux pour le plancher, par région.....	XII
Tableau 60 : Type de matériaux du plafond, par milieu de résidence.	XIII
Tableau 61 : Récapitulation des matériaux utilisés dans les habitats typiques Malgaches....	XV

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les différentes phases d'un milieu poreux.	8
Figure 2 : Echanges thermiques sur une enveloppe extérieure de bâtiment.	11
Figure 3 : Bilan d'énergie pour un mur plan [1].	12
Figure 4 : Conduction à l'intérieure d'un mur simple en régime permanent.	17
Figure 5 : Schéma électrique équivalent du mur simple.	18
Figure 6 : Représentation des deux types d'inertie thermique [58].	23
Figure 7 : Les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique [83].	26
Figure 8 : Relation Température/Enthalpie [80].	27
Figure 9 : Milieu semi-infini avec température sinusoïdale imposée en surface [1].	30
Figure 10 : Représentation du déphasage thermique et du facteur d'amortissement [71].	35
Figure 11 : Variation de e_{cht} suivant les valeurs de la diffusivité thermique [Auteur].	37
Figure 12 : Phénomènes physiques à la base du démarche ISO 13786 [Auteur].	39
Figure 13 : Circuit électrique équivalent d'un composant plan monocouche homogène [42].	40
Figure 14 : Configuration simplifiée d'un composant plan.	41
Figure 15 : Quadripôle thermique équivalent sous forme de réseau.	43
Figure 16 : Organigramme de la méthode de calcul selon ISO 13786.	47
Figure 17 : Coupe verticale de la boîte chaude gardée de la norme EN 1934 (en 1998).	53
Figure 18 : Un système de boîte chaude gardée utilisé par <i>Giorgio et al.</i> [118].	55
Figure 19 : Laboratoire de cellules de test « ZEB » de <i>Francesco G. et al.</i> [125].	57
Figure 20 : Exemple de caractérisation in situ par <i>Fayçal</i> [97] : (a) Bâtiment démonstratif ; (b) positionnement des thermocouples ; (c) positionnement du fluxmètre.	58
Figure 21 : Mesures in situ effectuées par <i>Tingting WU</i> [117].	59
Figure 22 : Les différents types d'habitats à Madagascar.	62
Figure 23 : Maison « <i>Zafimaniry</i> » en milieu rural d'Ambositra [131].	63
Figure 24 : Maisons traditionnelles en brique de terre cuite des hautes terres Malgaches (en milieu urbain) [130].	64
Figure 25 : Les dimensions mesurées d'un échantillon.	71
Figure 26 : Relation entre la densité et la conductivité thermique des matériaux de construction [70].	75
Figure 27 : Cellule de mesure CBAC.	79
Figure 28 : (a) Structure de la paroi 2 ; (b) Structure de la paroi 1 et 3 ; (c) Structure de la paroi 4.	80
Figure 29 : Cellule de mesure CTCB.	81
Figure 30 : Sondes de température DS18B20.	83
Figure 31 : Capteur de température ambiante et d'humidité DHT11.	84
Figure 32 : Central d'acquisition des données expérimentales.	85
Figure 33 : (a) Module micro-SD ; (b) Module RTC ; (c) Carte arduino UNO.	86
Figure 34 : Emplacement lors de l'étalonnage des capteurs DS18B20 à l'extérieur.	87
Figure 35 : Emplacement lors de l'étalonnage des capteurs DS18B20 à l'intérieur.	87
Figure 36 : Principe de mise en place du capteur DS18B20 sur la surface.	89
Figure 37 : Positionnement du DHT11 à l'intérieur de la cellule.	89
Figure 38 : Positionnement des capteurs sur les faces extérieures de la cellule CBAC.	90
Figure 39 : Positionnement des capteurs DS18B20 sur la CTCB.	93
Figure 40 : Choix du composant/éléments dans l'outil de calcul.	97
Figure 41 : Choix du nombre de couche du composant.	97
Figure 42 : Représentation de la structure du composant dans l'outil de calcul.	97
Figure 43 : Champs d'insertion des données dans l'outil de calcul.	98
Figure 44 : Affichage des résultats dans l'outil de calcul.	99
Figure 45 : Résultats de l'étalonnage des capteurs du groupe intérieur.	105

Figure 46 : Résultats de l'étalonnage des capteurs du groupe extérieur.	106
Figure 47 : Ecart moyen des résultats lors de l'étalonnage du DS18B20.	107
Figure 48 : Courbes de températures de surfaces de la paroi 1 de CBAC.	108
Figure 49 : Courbes de températures de surfaces de la paroi 2 de CBAC.	108
Figure 50 : Courbes de températures de surfaces de la paroi 3 de CBAC.	109
Figure 51 : Courbes de températures de surfaces de la paroi 4 de CBAC.	110
Figure 52 : Courbes de températures de surfaces de la paroi de CTCB.	111
Figure 53 : Courbes de température ambiante à l'intérieur de la cellule CBAC.	112
Figure 54 : Courbes de température ambiante à l'intérieur de la cellule CTCB.	112
Figure 55 : Déphasages thermiques journaliers lors de la 1ère série de mesure.	113
Figure 56 : Déphasages thermiques journaliers lors de la 2ème série de mesure.	113
Figure 57 : Facteurs d'amortissement journaliers lors de la 1ère série de mesure.	114
Figure 58 : Facteurs d'amortissement journaliers lors de la 2ème série de mesure.	115
Figure 59 : Représentation des parois multicouches.	124

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE 1 – MATERIAUX DE CONSTRUCTION IDENTIFIES AUX AUTRES
COMPOSANTS DE BÂTIMENT
- ANNEXE 2 – LIGNES DE COMMANDE SUR ARDUINO
- ANNEXE 3 – EXTRAIT DES DONNEES DE TEMPERATURE ENREGISTREES
DANS LA CARTE MICRO SD

INTRODUCTION GENERALE

Nos travaux d'investigation consistent à étudier et évaluer le comportement dynamique de transfert thermique à travers les enveloppes extérieures des habitats typiques de Madagascar. La composition et la structure de ces parois sont déterminantes sur le confort intérieur de l'habitat. Généralement, leur rôle est d'assurer une bonne stabilité de l'édifice et de protéger l'intérieur contre les intempéries et agressions de l'extérieur. Afin d'assurer une ambiance intérieure confortable, elle devrait être capable de résister aux fluctuations thermiques. Vis-à-vis de ces dernières, la première référence est l'inertie thermique.

En outre, du fait du réchauffement climatique, les besoins en climatisation ne cessent d'augmenter conduisant à une augmentation de la consommation d'énergie, impactant fortement l'environnement. Mais compte tenu d'une part des considérations environnementales pour la lutte contre les changements climatiques et d'autre part des crises énergétiques chroniques mondiales, le recours excessif aux systèmes actifs de climatisation et chauffage ne fait plus partie d'une solution durable. Ce fait se produit dans les pays économiquement avancés. En effet, ces systèmes de régulation de température sont principalement à l'origine des pics de consommations énergétiques très élevés durant la phase d'utilisation du bâtiment. Limiter les besoins en climatisation actif des bâtiments est donc devenu un véritable enjeu. Ainsi, pour y répondre et afin de relever le défi d'un bâtiment faible consommation et faible émission de GES - dans le cadre de la mise en place de l'habitat haute qualité environnementale (HHQE) -, l'inertie thermique constitue un atout essentiel pour gérer l'énergie reçue par la paroi extérieure du bâtiment. Ainsi donc, la prise en compte de l'inertie thermique des matériaux de construction est devenue indispensable au même titre que leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques. À Madagascar, en l'absence de systèmes conventionnels de régulation de températures, certains types d'habitats procurent plus de confort thermique que d'autres. C'est ce que tente de démontrer cette étude. D'où son intitulé « *Etude de l'inertie thermique de parois : Cas des murs typiques de maisons d'habitation de Madagascar* ».

L'étude du comportement thermique dynamique d'un matériau permet de décrire son inertie thermique. Etudier l'inertie thermique des parois de bâtiment consiste donc à l'estimation des caractéristiques décrivant son comportement lorsqu'elles sont soumises à des sollicitations thermiques variables sur ses faces.

L'objet de notre étude est donc la détermination des caractéristiques décrivant le comportement dynamique lors du transfert de chaleur à travers les murs typiques des maisons d'habitation malgache. L'étude a été menée selon les démarches de la norme ISO 13786 et une approche

expérimentale en environnement naturel. Notre principal objectif est d'une part d'identifier les structures qui assurent une température intérieure faiblement impactée par les fluctuations externes sans avoir recours à un système de chauffage ou de refroidissement ordinaire. Et d'autre part compléter les lacunes en matière de données thermiques sur les murs typiques malgaches afin d'apprécier la contribution de ces derniers au confort thermique de l'habitat. On s'est limité sur les parois typiques les plus couramment utilisés à savoir les parois en terre, façonnées en brique ou non : les murs en terre crue battue et en brique d'argile cuite.

Ce manuscrit est élaboré selon le plan suivant :

- La première partie relève de la synthèse bibliographique et de l'état des lieux. La description des phénomènes physiques liés au comportement thermique dynamique de l'enveloppe des bâtiments ainsi que les lois les régissant sont présentées dans le premier chapitre. Les propriétés thermiques intrinsèques des matériaux y sont également exposées. Dans le second chapitre, nous avons développé quatre méthodes distinctes de caractérisation du comportement thermique dynamique des parois soumis à des températures variables en surface. Il s'agit du solide semi-infini, des démarches de la norme internationale ISO 13786, des simulations numériques et enfin la caractérisation expérimentale. Le troisième chapitre traite des typologies de murs et habitats types malgaches à partir desquelles nous avons orienté le choix des murs à étudier.
- La seconde partie de cette thèse est dédiée à la caractérisation de l'inertie thermique des murs fabriqués avec de la terre crue et de brique d'argile cuite. Tout d'abord la fabrication des matériaux de construction et la détermination de leurs propriétés thermophysiques nécessaires à la caractérisation est présentée dans le premier chapitre de cette partie. Le chapitre 2 se focalise sur l'approche expérimentale de la mesure de l'inertie thermique des murs des cellules expérimentales réalisées en environnement naturel. Les mesures consistent à enregistrer les températures de surfaces et d'ambiance des cellules. Suivi par l'analyse des données recueillies et la détermination des paramètres de l'inertie des parois. Le troisième chapitre concerne la mise en œuvre des démarches de calculs selon la norme ISO 13786. Cette norme internationale est l'une des méthodes de caractérisation présentées dans le deuxième chapitre de la première partie. Les résultats obtenus avec les deux méthodes de caractérisation sont présentés dans le dernier chapitre de cette partie. Ce chapitre est clôturé par une comparaison de leurs résultats.

L'objectif, la méthodologie et les résultats majeurs de l'étude sont rappelés dans la conclusion générale. Pour améliorer notre travail, nous présentons des pistes de recherche, des volets qui nécessitent d'être approfondis.

**PARTIE I – SYNTHÈSE
BIBLIOGRAPHIQUE ET
ETAT DES LIEUX**

CHAPITRE I - PHENOMENES PHYSIQUES LIES AU COMPORTEMENT THERMIQUE DU MUR

INTRODUCTION

Dans la réalité, plusieurs phénomènes physiques interagissent sur les enveloppes extérieures d'un bâtiment, produits par les environnements intérieur et extérieur. Mais dans le cas où l'on ne tient pas compte des transferts de masse et que l'on n'observe pas de phénomènes de diffusion de matière, de changement de phase, de réaction chimique, ils subissent des sollicitations thermiques qui se présentent sous les trois modes de transfert suivants : la conduction, la convection et le rayonnement. Ce chapitre nous permet donc de présenter les phénomènes de transfert de chaleur qui agissent sur l'enveloppe extérieure de bâtiment.

I.1 - MODE DE TRANSFERT DE CHALEUR SUR UNE PAROI DE BATIMENT

La paroi extérieure d'un bâtiment est l'interface entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur. Elle est donc le siège de transferts de chaleur entre ces deux zones. Les phénomènes de transfert de chaleur qui s'exercent sur une paroi de bâtiment se situent au niveau de ses deux surfaces limites qui génèrent ensuite les transferts thermiques à l'intérieur.

I.1.1 - Sollicitations thermiques

Nous présentons ici les sollicitations thermiques à priori fortement corrélées aux comportements thermiques d'un mur, pouvant concerner aussi bien l'enveloppe interne qu'externe du bâtiment.

Une sollicitation thermique peut représenter une donnée climatique :

- Température extérieure,
- Rayonnement solaire,
- Vent.

Elle peut aussi représenter des conséquences de systèmes de régulation ou des actions de l'occupant :

- Puissance de chauffage ou de refroidissement,
- Débit de ventilation (naturelle, forcée ou mixte),
- Puissances dissipées par les équipements et les occupants.

Les sollicitations thermiques sont caractérisées par leur évolution temporelle. On trouve principalement :

- Les sollicitations en échelon
- Les sollicitations de type Dirac

- Les sollicitations périodiques (sinus...)
- Les sollicitations pseudo-aléatoires
- Les perturbations aléatoires mais finies

I.1.2 - Les transferts de chaleur à l'extérieur de la paroi

Les surfaces limites de la paroi subissent deux modes de transferts de chaleur. La convection et le rayonnement thermique qui se traduisent par les transferts de chaleur entre les surfaces du mur avec l'air ambiant et les milieux environnants à l'intérieur et à l'extérieur.

I.1.2.1 - La convection thermique

Ce mode de transfert caractérise l'échange thermique au travers d'écoulements laminaires à l'intérieur d'un fluide ou entre une surface solide et la couche limite d'un fluide en mouvement [1]. Le gradient de température au sein du fluide implique une différence de leur masse volumique (le fluide froid est plus dense que le fluide chaud) qui provoque son mouvement [2]. Lors d'un échange thermique à l'intérieur d'un fluide, si les effets de compressibilité, de dilatabilité, de dissipation visqueuse et les sources internes sont négligés à l'intérieur de ce dernier, l'équation microscopique de l'énergie s'écrit [3] :

$$\lambda \nabla^2 T = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \nabla T \quad (\text{I-1})$$

Le terme $\rho C_p \vec{u} \nabla T$ prend compte du transport d'enthalpie par écoulement dont \vec{u} est le champ de vitesse microscopique.

Lors d'un échange de chaleur entre la surface d'un solide et un fluide, la loi de Newton exprime le flux de chaleur échangé φ à travers leur surface de contact S :

$$\varphi = h_c S (T_s - T_f) \quad (\text{I-2})$$

Où h_c est le coefficient d'échange par convection et T_s et T_f sont respectivement la température à la surface du solide et du fluide.

La convection est dite naturelle ou libre lorsque la circulation du fluide est induite par les variations de sa masse volumique dues aux différences de température. Elle est par contre dite forcée lorsque la circulation est provoquée par l'action d'une force extérieure d'origine mécanique au fluide (pompe, mise en pression, ventilateur, ...). Et elle est dite mixte lorsqu'elle mêle de manière équivalente les deux modes précédents.

Pour le bâtiment, la surface extérieure de son enveloppe est soumise à un échange thermique par convection naturelle sous l'influence de l'air ambiant qui circule à l'extérieur, en tenant compte à la fois des caractéristiques de vent et de rugosité de surface [4]. Sa surface intérieure

est soumise à un échange par convection naturelle dû au vent intérieur, et/ou forcée lors de l'utilisation de systèmes de ventilation et de climatisation. Les coefficients de transfert par convection (intérieur et extérieur) ont une influence importante aux échanges convectifs alors qu'il demeure souvent difficile à déterminer. Toutefois, des modèles de calculs peuvent être évoquées pour les calculer. Les travaux de *Churchill et al.* [5] ont développé un formalisme théorique permettant d'avoir une expression du coefficient d'échange convectif interne issue des régimes asymptotiques laminaires et turbulents :

$$h_{c,i} = [(h_{lam})^n + (h_{turb})^n]^{\frac{1}{n}} \quad (I-3)$$

Par la suite, en mesurant la convection naturelle aux abords d'une paroi verticale isotherme, ils ont pu fournir une corrélation pour le coefficient d'échange convectif intérieur valide aussi bien en régime laminaire que turbulent, selon le formalisme précédent [5].

$$h_{c,i} = \left[\left(\frac{0,0175|\Delta T|}{H} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(1,6952|\Delta T|^{\frac{1}{3}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (I-4)$$

Où ΔT représente la différence entre températures de surface de la paroi et température ambiante intérieur et H la longueur caractéristique de la surface.

De la même manière, il existe dans la littérature de nombreux modèles de calcul des coefficients d'échange convectif extérieur, dont la plupart sont fonction de la vitesse du vent et de l'état de surface de la paroi [6]. La relation la plus couramment utilisée est celle de *McAdams*, donnée par la relation :

$$h_{c,e} = 5,678 \left[m + n \left(\frac{v_f}{0,3048} \right)^p \right] \quad (I-5)$$

La mesure de la vitesse de vent doit être effectuée dans le voisinage du bâtiment mais éloignée de tout obstacle afin de ne pas être perturbée. Les coefficients m , n et p sont liés à la rugosité de la paroi.

Tableau 1 : Coefficients de la corrélation de *McAdams* en fonction du type de surface [6].

Rugosité	$v_f < 4,88 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$			$4,88 \leq v_f < 30,48 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$		
	m	n	p	m	n	p
Surface lisse	0,99	0,21	1,00	0,00	0,50	0,78
Surface rugueuse	1,09	0,23	1,00	0,00	0,53	0,78

1.1.2.2 - Le rayonnement thermique

Tous les corps, même à basse température, émettent et reçoivent de la chaleur par rayonnement. Il s'agit d'un rayonnement de nature électromagnétique effectué au détriment de l'énergie interne d'un corps. Le rayonnement thermique se traduit donc par un transfert de radiations thermique de différentes longueurs d'onde (0,1 à 100 μ m) entre deux corps [2]. Tous les corps (solides, liquides, gazeux) émettent et absorbent des radiations thermiques dont leur densité dépend de la température des corps et de leurs coefficients optiques de surface. Les bilans radiatifs réalisent alors la balance entre flux thermique émis et absorbés [7].

Valentina T. [8] présente que le flux de chaleur $\varphi_{r,e}$ émis par une surface d'un corps dépend de la température de surface, ainsi que de son émissivité spectrale directionnelle. Il est obtenu par intégration dans toutes les directions (θ, φ) sur l'hémisphère (angles solides Ω) et sur tout le spectre (longueurs d'onde notées λ).

$$\varphi_{r,e} = \int_{\lambda} \int_{\Omega} \varepsilon_{\lambda\theta\varphi} L_{\lambda}^0(\lambda, T) \cos \theta d\Omega d\lambda \quad (\text{I-6})$$

Où $\varepsilon_{\lambda\theta\varphi}$ est l'émissivité spectrale directionnelle et $L_{\lambda}^0(\lambda, T)$ est la luminance du corps noir.

Cette dernière est calculée par la loi de Planck dans sa théorie de quanta :

$$L_{\lambda}^0(\lambda, T) = \frac{2hC_0^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hC_0}{\sigma \lambda T}\right) - 1} \quad (\text{I-7})$$

Où h est la constante de Planck, C_0 est la célérité de la lumière dans le vide, et σ est la constante de Stefan-Boltzmann. Une hypothèse communément utilisée est que les surfaces sont lambertiennes : leur luminance est indépendante de la direction [8]. Par ailleurs, il est parfois difficile d'obtenir les valeurs spectrales de l'émissivité. On utilise alors une émissivité moyenne ε qui varie entre 0 et 1, et alors la loi de Stefan-Boltzmann est généralement utilisée pour un calcul approché des pertes par émission radiative :

$$\varphi_{r,e} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{I-8})$$

Le flux de rayonnement incident absorbé $\varphi_{r,a}$ par la surface extérieure d'un mur est composé de quatre parties : les flux solaires direct et diffus, le flux thermique de fond de ciel, et le flux issu des réflexions et diffusions multiples dans l'atmosphère. Le flux de rayonnement net absorbé est calculé par intégrations spatiale et spectrale des luminances spectrales directionnelles

La quantité de flux radiatif globale échangée est donc :

$$\varphi_r = \varphi_{r,e} - \varphi_{r,a} \quad (I-9)$$

Le transfert de chaleur par rayonnement sur la paroi d'un bâtiment est scindé en trois sortes suivant la longueur d'onde de la bande spectrale [7].

- Les courtes longueurs d'ondes (CLO) définies pour des longueurs d'ondes $\lambda \in [0 - 2,5\mu\text{m}[$;
- Les grandes longueurs d'ondes (GLO) définies pour $\lambda \in]2,5 - 100\mu\text{m}[$, correspondant aux rayonnements thermiques infrarouges.

Elangovan R. et al. [4] expliquent que le rayonnement à ondes courtes comprend l'absorption de la radiation solaire sur la face extérieure du mur. Le rayonnement à ondes longues qui comprend l'échange de chaleur entre la face externe du mur avec le ciel, les bâtiments environnants et le sol. Et enfin, le rayonnement à ondes longues qui comprend l'échange de chaleur entre les faces internes du mur avec les occupants et le milieu ambiant intérieur.

I.1.3 - Transfert de chaleur à l'intérieur de la paroi

Les échanges thermiques entre les surfaces de la paroi avec les milieux extérieurs créent une déstabilisation de son équilibre thermique provoquant un transfert de chaleur à l'intérieur de la paroi qui s'effectue dans toutes ses phases constitutives. En effet, une telle paroi de bâtiment est souvent un milieu poreux constituée de trois phases : une phase solide (liée à la structure du matériau), une phase liquide (eau libre et eau absorbée contenue dans le matériau) et une phase vapeur (air humide). Au niveau macroscopique, la représentation d'un tel milieu suppose la description de chacune de ses phases [9].

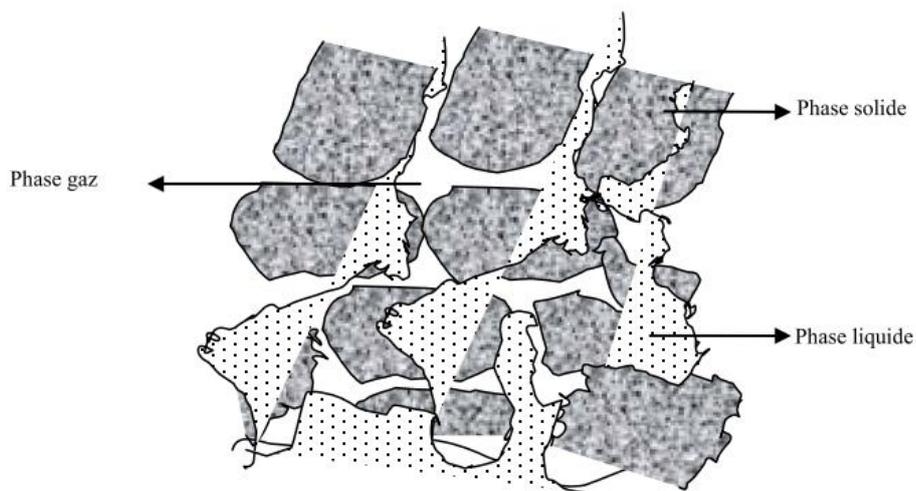


Figure 1 : Les différentes phases d'un milieu poreux.

A ce niveau, le mode de transfert englobe les trois modes de transfert de chaleur qui sont essentiels au fonctionnement thermique de l'enceinte du bâtiment. C'est-à-dire la conduction dans le squelette solide, dans la phase liquide et dans le gaz ; la convection naturelle dans les pores et aussi le rayonnement [4].

En effet, la conduction se produit à la fois dans les pores et dans le squelette solide, avec la conduction de gaz et la conduction du solide du matériau poreux étant les principaux facteurs [10]. Dans les matériaux poreux secs, la conductivité de la phase liquide est souvent négligeable [11].

Pour la convection, elle se produit dans les pores occupés par le gaz ou le liquide. Mais souvent, elle est supposée négligeable en raison de la petite taille des pores dans une paroi [10] [11] [12] [13] [14]. *Naitali B.* [10] et *Clyne T.* [13] disent que le diamètre des pores auquel la convection doit être prise en compte est d'environ 10 mm, à température ambiante et pression atmosphérique.

Le rayonnement se produit lorsque la chaleur des particules est convertie en une forme d'onde qui se déplace à travers les pores. *Brakel J.* [11] et *Mathieu N.* [15] confirment qu'il devient important à des températures élevées (il devient même le mode de transfert prépondérant dans le milieu). Et *Nassima* [14] et *Hill F.* [16] assurent qu'il est significatif à des températures supérieures à 403K. Pour *Helte A.* [17], il est non négligeable pour des matériaux présentant un taux élevé de porosité et des tailles de pores supérieures à 100 μm .

Malgré tout cela, de nombreuses études considèrent que le transfert thermique dans un tel milieu poreux ne se compose que de la conduction dans la phase solide [10] [12] [13] [15] [18] [19] [20] [21]. On peut donc remplacer le problème de transfert couplé conduction-convection-rayonnement dans un mur à un transfert thermique par conduction seule. En effet, dans la structure d'une paroi de bâtiment, les pores des matériaux utilisés étant souvent de faibles dimensions (sauf les matériaux creux), alors la part de transfert convectif peut être négligée. De même, au voisinage de la température ambiante, la part du rayonnement est très faible devant la conduction [14]. De plus, *Le Hung N.* [2] ajoute que hormis le rayonnement à travers les corps transparents, la conduction est pratiquement le seul mode de transmission de la chaleur à travers les corps solides.

1.1.3.1 - Le transfert par conduction

Le phénomène de la conduction de la chaleur existe dans tous les corps : solides, fluides et gaz. C'est un phénomène de transfert de l'énergie interne. Pour les solides, la conduction est assurée par le mouvement des électrons libres et les vibrations du réseau cristallin, appelés phonons

[10] [22] [23] [24]. Pour les fluides, elle correspond à une transmission d'énergie cinétique produite par les chocs entre les molécules [25]. Le transfert thermique par les vibrations moléculaires est le mode de conduction principale dans les matériaux non métalliques.

Généralement, pour décrire le phénomène de conduction à travers un matériau, la loi de Fourier (1822) traduit que la densité de flux de chaleur traversant le matériau est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi}_c = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{I-10})$$

Où $\vec{\varphi}_c$ est le vecteur densité de flux thermique par conduction et λ désigne la conductivité thermique du matériau.

1.1.3.2 - Concept de conductivité thermique équivalente

Le transfert thermique dans le mur est donc considéré comme purement conductif ayant une conductivité thermique équivalente, obtenue après mise en œuvre d'une approche simplificatrice [10] [13] [14]. Cette conductivité thermique équivalente définit la quantité de flux de chaleur produit en tant que l'ensemble de la conduction-convection-rayonnement sous le gradient unitaire de température. Elle dépend des conductivités thermiques des phases constituant la paroi (solide et fluide), des fractions volumiques de ces phases (la porosité).

La conduction de la chaleur au sein de la paroi est donc décrite à l'aide d'équation qui suppose l'équivalence de ce milieu, hétérogène par nature, à un milieu homogène équivalent. La densité de flux de chaleur par conduction $\vec{\varphi}_c$ dans le mur est déterminée en utilisant l'équation suivante qui considère le mur en milieu homogène équivalent [26] :

$$\vec{\varphi}_c = -\lambda_{\text{éq}} \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{I-11})$$

Cette équation est établie en utilisant une relation semblable à la loi de FOURRIER pour les milieux homogènes. $\lambda_{\text{éq}}$ est la conductivité thermique équivalente du milieu homogène équivalente et T sa température.

Cette définition de conductivité thermique équivalente n'a de sens que dans le Volume Élémentaire Représentatif (VER) du matériau hétérogène car il s'agit du volume au-dessus duquel la valeur de la conductivité thermique équivalente n'est plus soumise à des fluctuations dues à des hétérogénéités [26]. Ce volume est choisi afin de conférer un caractère local aux propriétés physiques de la paroi. Celui-ci est ainsi considéré comme homogène, et le modèle physique représentant les phénomènes de transfert thermique au sein du mur est obtenu par intégration des équations de conservation dans l'espace sur ce volume de référence [27]. Le

VER doit être suffisamment grand pour être représentatif, c'est-à-dire pour permettre la caractérisation de toute propriété, mais suffisamment petit pour que la grandeur ainsi définie conserve un caractère local [28] [29]. Il est obtenu en effectuant un changement d'échelle sur le milieu réel à l'aide de plusieurs procédés de changement d'échelle dont parmi eux, l'une des plus classiquement utilisées est la prise de moyenne volumique [9] [27] [28] [29] [30] [31]. Les échanges thermiques qui se produisent sur le mur extérieur se présentent donc comme montré sur la figure 02 suivante.

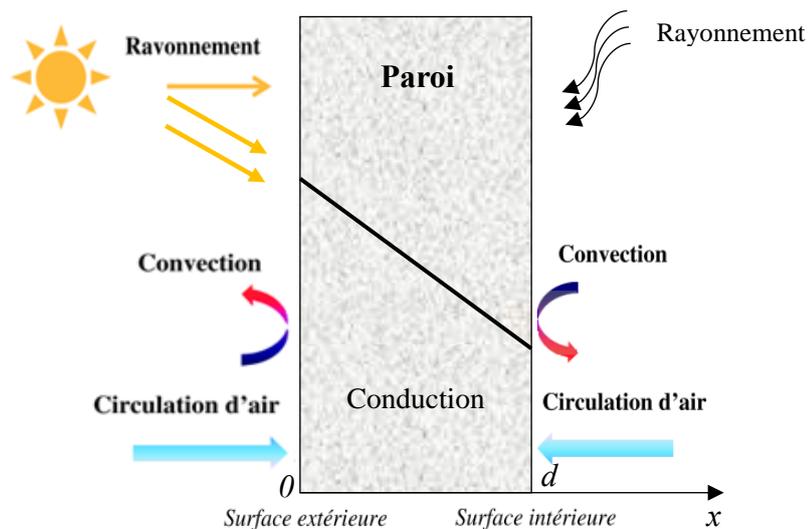


Figure 2 : Echanges thermiques sur une enveloppe extérieure de bâtiment.

I.2 - FORMULATION DU PROBLEME DE CONDUCTION DE LA CHALEUR A TRAVERS LA PAROI

I.2.1 - Bilan d'énergie

On s'attachera à présenter l'équation de la chaleur dans sa forme unidirectionnelle décrivant le transfert de chaleur au travers d'un mur plan. En effet, les parois de bâtiment ont le plus souvent une épaisseur finie (notée « d » dans ce travail) très faible devant leurs dimensions transversales. Cette configuration géométrique permet de justifier l'hypothèse d'unidirectionnalité du transfert thermique sur laquelle s'appuie le modèle 1D développé dans ce travail.

Considérons alors un système d'épaisseur dx dans la direction x et de section d'aire S normalement à la direction (O_x). Le bilan d'énergie sur ce système (Premier principe de la thermodynamique et mécanique des milieux continus) s'écrit [1] :

$$\varphi_{c,x} + \varphi_g = \varphi_{c,x+dx} + \varphi_{st} \quad (I-12)$$

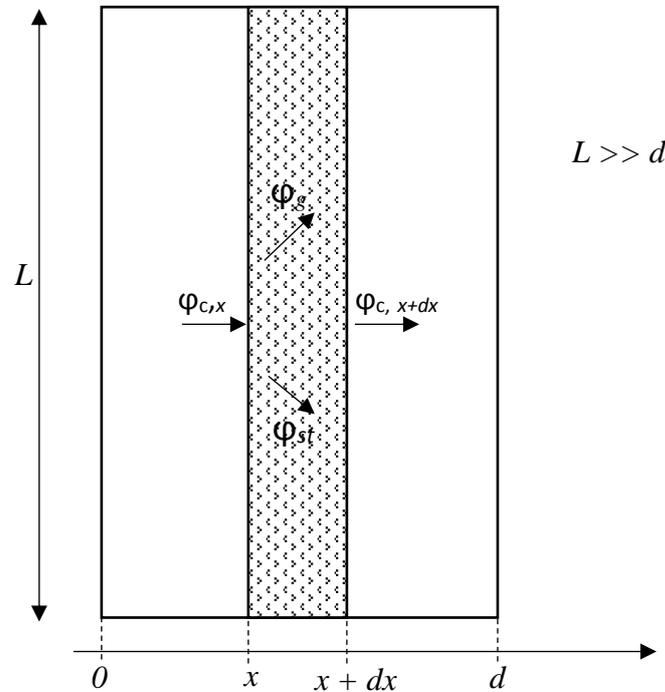


Figure 3 : Bilan d'énergie pour un mur plan [1].

I.2.2 - Expression des flux thermiques

Il faut établir les expressions des différents flux d'énergie. En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, nous obtiendrons une équation aux dérivées partielles dont la résolution permettra de connaître, à chaque instant, l'évolution de la température en chaque point de la paroi étudié. Ainsi, les expressions de ces flux d'énergie sont :

$\varphi_{c,x}$ désigne le flux thermique conductif entrant en x soit d'après (I-10), $\varphi_{c,x} = \left[-\lambda_{\text{éq}} S \frac{\partial T}{\partial x} \right]_x$

φ_g est le flux d'énergie thermique générée par la source interne, $\varphi_g = \dot{q} S dx$

$\varphi_{c,x+dx}$ est le flux thermique conductif sortant en $x+dx$, $\varphi_{c,x+dx} = \left[-\lambda_{\text{éq}} S \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x+dx}$

φ_{st} est le flux de chaleur stockée par le corps (variation de son énergie interne au cours du temps), $\varphi_{st} = \rho C_p S dx \frac{\partial T}{\partial t}$

ρ : masse volumique du matériau [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

C_p : chaleur massique du matériau [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

S : aire de la section de passage du flux de chaleur [m^2],

\dot{q} : densité volumique d'énergie générée [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$]

I.2.3 - Equation générale du transfert de chaleur

En reportant ces expressions de flux thermiques dans le bilan d'énergie (I-12) et en divisant par dx , nous obtenons l'équation de la chaleur par conduction en 1D :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{\dot{e}q} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I-13})$$

Cette équation peut se simplifier dans un certain nombre de cas :

- S'il n'y a pas une génération d'énergie à l'intérieur du mur, $\dot{q} = 0$
- Si $\lambda_{\dot{e}q}$ est constante

Nous avons l'équation suivante pour le transfert de chaleur 1D à travers le mur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_{\dot{e}q}}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{I-14})$$

Pour résoudre le problème de conduction, la connaissance des propriétés thermophysiques du mur ainsi que la condition initiale et les conditions aux limites à la surface de ce dernier est primordiale.

I.2.4 - Conditions initiales et conditions aux limites à la surface du mur

I.2.4.1 - Conditions initiales

Elles traduisent la distribution de la température à l'intérieur et à la surface de la paroi à l'instant $t = 0$. La connaissance de l'état initial du champ de température est sûrement essentielle même si dans la pratique, c'est un problème délicat. En effet, s'il est aisé de connaître les températures de surface en début d'essai, il est très difficile de connaître le champ interne qui dépend de l'historique de sollicitation auquel le système a été soumis préalablement. Il est donc nécessaire de faire des hypothèses et de faire le nécessaire dans la procédure expérimentale pour qu'elles rendent compte de l'état réel de la situation la plus proche possible, si les sollicitations n'ont pas été enregistrées. Pour *Khaled C.* [32], il a opté, pour leur protocole expérimental, un système de chauffage placé à la surface extérieure du mur pendant plusieurs dizaines de minutes qui rend le champ de température interne de la paroi auscultée vers un régime permanent. L'observation des températures des deux surfaces et du flux entrant côté extérieur permet d'apprécier la validité de l'hypothèse et définir le moment du début de l'essai. Et dans ces conditions, à l'état initial, *Khaled* affirme que le profil de température interne de la paroi est

considéré comme stable et variant linéairement entre les deux surfaces de la paroi, et peut s'écrire sous la forme :

$$T(x,0) = T_i + (T_e - T_i) \frac{x}{e} \text{ pour tout } 0 < x < e \quad (\text{I-15})$$

Avec $T(x,0)$ la température à l'intérieure de la paroi à l'état initial, T_i et T_e sont respectivement la température de la face interne et externe de la paroi et e l'épaisseur de la paroi.

1.2.4.2 - Les conditions aux limites à la surface du mur [33] [34]

Elles traduisent le lien entre la paroi et le milieu extérieur. Les conditions imposées aux frontières du mur peuvent être classées en trois catégories.

- Condition de DIRICHLET : la température est imposée sur la surface de la paroi. Cette condition stipule que la température à la surface du corps doit être connue $T_p = f(M_p, t)$. Dans le cas du régime stationnaire, $T_p = f(M_p)$. La température de la surface est maintenue constante et on aura dans ce cas $T_p = \text{constante}$.
- Condition de NEUMANN : la densité de flux est imposée en surface du mur. Le flux de chaleur circulant dans la paroi est imposé par la production d'une source de chaleur. Par exemple : une résistance électrique placée dans le matériau produit une quantité de chaleur uniquement fonction des conditions électriques.

$$\varphi_p = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{surf} = f(M_s, t) \text{ où } \frac{\partial T}{\partial n} \text{ est la dérivée normale à la surface.}$$

On peut avoir une densité de flux constant : $\varphi_p = \text{constante}$.

On peut aussi avoir $\varphi_p = 0 = f(M_s, t)$, cas du mur isolé thermiquement en surface.

- Condition de FOURIER : elle est la condition la plus complexe, mais aussi la plus courante. Elle intervient notamment dans le cas où la surface du mur est en contact avec un fluide.

A la surface de contact (paroi-fluide), on écrit :

$$\varphi_p = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{surf} = h(T_p - T_f) \quad (\text{I-16})$$

Avec h : le coefficient d'échange thermique superficiel (convection + rayonnement).

I.3 - LES GRANDEURS THERMIQUES APPARENTES DU MUR

Le comportement et la réponse thermique du mur faces aux sollicitations externes dépendent en grande partie de ses propriétés thermiques. Dans le cas du transfert de chaleur par conduction, les principales grandeurs thermiques sont la conductivité thermique, la diffusivité thermique, l'effusivité thermique et la chaleur spécifique.

I.3.1 - La conductivité thermique

La conductivité thermique notée « λ » indique la quantité de chaleur transférée en une unité de temps ($1s$) au travers d'un matériau d'une unité de surface et avec une épaisseur de 1m, quand les deux faces opposées diffèrent d'une unité de température ($1K$) [W01]. La conductivité thermique est une mesure des qualités isolantes ou conductrices d'un matériau. La connaissance de la conductivité thermique est importante dans le choix des matériaux à utiliser, qu'il s'agit de réduire ou, au contraire, de favoriser les échanges de chaleur.

On distingue :

- Les isolants thermiques qui sont caractérisés par une faible conductivité (inférieure à $0,17 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) ;
- Les matériaux thermiquement conducteurs constitués principalement par les métaux et les alliages et pour lesquels les conductivités sont supérieures à $10 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
- Les autres matériaux qui n'appartiennent pas à ces deux catégories.

I.3.2 - La diffusivité thermique

La propagation de la chaleur dans un matériau dépend de sa diffusivité thermique « a », qui est le rapport de la conductivité thermique λ sur la capacité thermique volumique (ρC_p) [35] :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (\text{I-17})$$

Exprimer en $[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$, la diffusivité thermique détermine la vitesse avec laquelle la chaleur se propage dans le matériau. Elle exprime donc la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température.

Ce paramètre intervient directement dans l'équation de transfert de la chaleur et plus sa valeur est faible, plus le front de la chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur parvient sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est importante [36].

I.3.3 - L'effusivité thermique

L'effusivité thermique « b » traduit l'aptitude d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement [32]. C'est-à-dire qu'elle est la capacité d'un matériau à absorber l'énergie et à la restituer. À la différence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité du déplacement de la chaleur à travers la masse d'un matériau, l'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe la chaleur. Ainsi une effusivité élevée limite les valeurs du gradient de température [37].

Le comportement ou la réaction des couches superficielles des parois, en particulier au niveau des surfaces à l'intérieur de la pièce est caractérisé par l'effusivité du matériau qui les constitue. Elle évolue en fonction de la conductivité thermique et de la capacité thermique volumique et calculée par la relation suivante :

$$b = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (\text{I-18})$$

I.3.4 - La chaleur spécifique

La chaleur spécifique C_p est définie comme étant la quantité d'énergie requise pour augmenter la température d'une unité de masse d'un degré [36]. Elle caractérise l'aptitude du matériau à emmagasiner de la chaleur. Ceci met en évidence l'importance de la chaleur spécifique pour tous calculs de stockage de chaleur ou de transfert de chaleur. Elle peut être calculée par la relation :

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (\text{I-19})$$

Où Q est la quantité de chaleur, m la masse du corps et ΔT la différence de température.

Ce paramètre est fonction de la structure moléculaire du matériau et de sa phase (solide, liquide ou gaz). Et pour un milieu poreux, elle peut être exprimée en fonction de celle des phases qui le constituent [24] :

$$C_p = \sum_i \theta_i C_{p_i} \quad (\text{I-20})$$

θ_i : teneur volumique en constituant i ,

C_{p_i} : chaleur spécifique ou chaleur volumique du constituant i .

I.4 - ANALOGIE ELECTRIQUE-THERMIQUE

I.4.1 – Définition du système analogique [38]

Deux systèmes sont dits analogiques lorsqu'ils obéissent aux mêmes équations et possèdent aussi des conditions aux limites identiques. Cela signifie que l'équation traduisant l'un des systèmes peut être transformée pour exprimer le second système par simple changement de symbole de différentes variables.

I.4.2 – Analogie électrique-thermique pour un mur en régime permanent

Considérons un mur homogène d'épaisseur d , de surface S , de conductivité thermique équivalente $\lambda_{\text{éq}}$ dont la face en $x = 0$ est maintenue à la température T_1 et la face en $x = d$ à la température T_2 . Le flux de chaleur Φ qui traverse ce mur en régime permanent est tel que :

$$\phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{I-21})$$

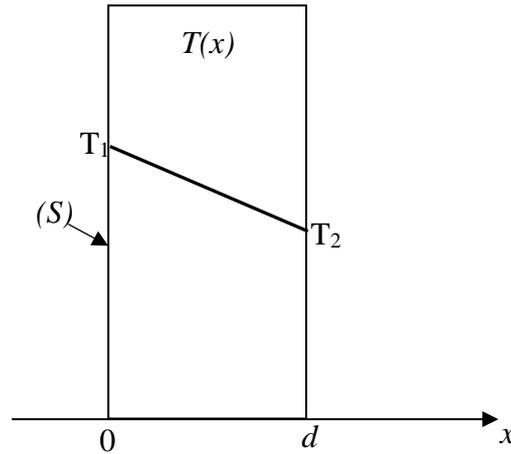


Figure 4 : Conduction à l'intérieur d'un mur simple en régime permanent.

En régime permanent, la répartition de la température est linéaire c'est-à-dire de la forme $y(x) = ax + b$. Soit :

$$T(x) = -\frac{T_1 - T_2}{d}x + T_1 \quad (\text{I-22})$$

Le gradient de température est alors constant : $\frac{dT(x)}{dx} = -\frac{T_1 - T_2}{d}$

D'où, l'expression du flux de chaleur devient :

$$\phi = \frac{\lambda S}{d}(T_1 - T_2) \quad (\text{I-23})$$

Le flux de la chaleur est donc proportionnel à la différence de température entre les deux faces du mur. Le coefficient de proportionnalité représente la conductance thermique du dispositif :

$$G_{th} = \frac{\lambda S}{d}$$

Et on définit ainsi la résistance thermique du mur : $R_{th} = \frac{1}{G_{th}} = \frac{d}{\lambda S}$ (I-24)

On en déduit la différence de température entre les deux faces du mur par la relation :

$$(T_1 - T_2) = R_{th}\phi \quad (\text{I-25})$$

Cette relation est analogue à la loi d'OHM. En effet, une résistance électrique R_e , parcourue par un courant I développe une différence de potentiel $U_1 - U_2$, telle que :

$$(U_1 - U_2) = R_e \cdot I \quad (I-26)$$

Le transfert de chaleur par conduction thermique entre deux points d'un mur homogène est donc analogue au passage d'un courant électrique dans un conducteur.

La différence de potentiel est l'équivalent de la différence de température ; l'intensité de courant est l'homologue du flux thermique. Au vecteur densité de flux thermique correspond en électricité le vecteur densité de courant.

Le tableau 02 suivant récapitule l'analogie entre les grandeurs utilisées en électricité et celles utilisées en thermique.

Tableau 2 : Tableau des équivalences des grandeurs. [38]

Grandeurs électriques		Grandeurs thermiques	
Désignation	Unité (USI)	Désignation	Unité (USI)
Conductivité électrique σ	$[\Omega^{-1} \cdot m^{-1}]$	Conductivité thermique λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Différence de potentiel ΔV	[V]	Différence de température ΔT	[K]
Vecteur densité de courant $\vec{j} = -\sigma \overrightarrow{grad}V$	$[A \cdot m^{-2}]$	Vecteur densité de flux de chaleur $\vec{\phi} = -\lambda \overrightarrow{grad}T$	$[W \cdot m^{-2}]$
Résistance électrique $R = \frac{1}{\sigma}$	$[\Omega]$	Résistance thermique $R_{th} = \frac{d}{\lambda S}$	$[K \cdot W^{-1}]$
Conductance électrique $G = \frac{1}{R}$	$[\Omega^{-1}]$	Conductance thermique $G_{th} = \frac{\lambda S}{d}$	$[W \cdot K^{-1}]$
Intensité du courant I	[A]	Flux de chaleur Φ	[W]
Capacité électrique C	[F]	Capacité thermique $C_{th} = M \cdot C_p$	$[J \cdot K^{-1}]$
Loi d'Ohm $(U_1 - U_2) = R_e \cdot I$	[V]	Loi de Fourier $(T_1 - T_2) = R_{th} \phi$	[K]

Ainsi il est possible de décrire un problème thermique de conduction par un schéma électrique comme l'indique la figure 5 suivante :

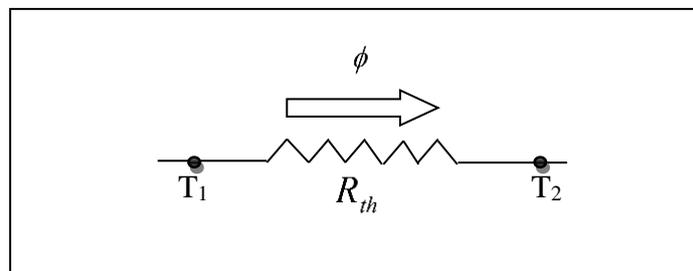


Figure 5 : Schéma électrique équivalent du mur simple.

Et pour un système de N murs accolés, la résistance thermique équivalente peut être obtenue par les formules suivantes :

- Si les N murs sont montés en série, alors la résistance équivalente est obtenue de façon analogue que dans l'électricité. On a donc :

$$R_T = \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\lambda_i S} = \sum_{i=1}^N R_i \quad (\text{I-27})$$

- Pour des murs placés en parallèles à la direction du flux de chaleur, la résistance thermique équivalente est :

$$\frac{1}{R_T} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i} \quad (\text{I-28})$$

CONCLUSION

On a vu dans ce chapitre que différents modes de transfert de chaleur se présentent sur une paroi de bâtiment. Sur ses frontières, deux modes de transfert dont la convection et le rayonnement thermique interagissent sur eux. A travers la paroi, les trois modes de transfert peuvent se présenter. Mais après des hypothèses simplificatrices déduites des études antérieures par différents auteurs, on peut ramener le mode de transfert en une seule mode qui est le transfert conductif seul équivalent. Pour cela, on a établi l'équation générale qui régit ce mode de transfert équivalent et on a aussi présenté les quatre propriétés thermiques intrinsèques des matériaux qui sont nécessaire pour sa résolution. Ces quatre propriétés thermiques sont indispensables à l'évaluation du comportement de la paroi du bâtiment face aux perturbations appliquées à sa surface.

CHAPITRE II - COMPORTEMENT THERMIQUE DYNAMIQUES DES MURS SOUMIS A DES TEMPERATURES VARIABLES EN SURFACE

INTRODUCTION

L'étude du comportement thermique dynamique des murs est primordiale à fin d'évaluer le degré de confort thermique d'un bâtiment durant son utilisation. En effet, l'enveloppe extérieur du bâtiment joue un rôle de filtre thermique permettant de créer un microclimat plus ou moins indépendant des fluctuations météorologiques extérieures. Pour bien mener une étude complète, il est nécessaire de se doter d'une méthode d'évaluation. C'est-à-dire un outil qui intègre l'ensemble des problématiques thermiques et qui donne accès à la recherche de solutions. Cela nécessite de définir les limites de l'étude, connaître les besoins du calcul et des informations disponibles sur l'objet étudié.

L'objet de ce chapitre consiste donc d'une part à comprendre l'aspect dynamique des transferts thermiques à travers les murs et d'autre part à invoquer quelques méthodes existantes permettant d'étudier et d'analyser leurs comportements thermiques dynamiques. En effet, d'après la littérature, plusieurs méthodes de résolution sont disponibles pour atteindre ce but comme les méthodes analytiques, les méthodes numériques (différence finie, volume fini, éléments finis), la méthode analogique (thermique-électrique) et la méthode expérimentale.

II.1 - ASPECT DYNAMIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU MUR

II.1.1 - Enjeux du comportement thermique dynamique du mur extérieur

L'étude de l'aspect dynamique des transferts thermiques dans la paroi du bâtiment tient une place importante pour appréhender son comportement thermique lorsqu'il est soumis à des sollicitations thermiques variées. En effet, elle joue un grand rôle sur l'amélioration du confort thermique de l'occupant et l'économie d'énergie du bâtiment tout entier. Ceci est dans le but de maximiser la performance énergétique de ce dernier. Comme les travaux de *Taylor et al.* [39], qui ont validé un modèle pour étudier les paramètres clés du bâtiment et les stratégies permettant d'améliorer le confort thermique et de réduire la consommation d'énergie dans le bâtiment construit en pisé. En outre, les travaux de *Stijn V. et al.* [40] montrent que deux stratégies principales peuvent être distinguées pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Les stratégies actives qui englobent l'amélioration des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC) et de l'éclairage artificiel. Tandis que les stratégies passives basées sur les améliorations de l'enveloppe du bâtiment, qui impliquent l'optimisation de son comportement thermique dynamique afin de réduire sa demande en énergie.

D'après les travaux consultés dans [41] [42] [43] [44] et [45], l'étude du comportement thermique dynamique des composants de bâtiment est liée aux consommations d'énergie en matière de chauffage et de climatisation dans le but de maintenir constante la température ambiante intérieure du bâtiment dans les pays tempérés. *Jonathan K. et al.* [46] ajoutent que l'utilisation de l'énergie pour maintenir des températures intérieures confortables dépend dans une certaine mesure de la capacité de stockage thermique du composant du bâtiment en contact avec l'air intérieur. Ceci s'aligne parfaitement dans le cadre de la mise en place du bâtiment HHQE. De plus, la RT 2012 [47] ont fixé un certain nombre d'exigences pour les bâtiments, ainsi que leurs composants dans l'obligation d'assurer un renforcement au niveau de confort thermique sans avoir à recourir à un système actif de climatisation ; ainsi que d'introduire un système permettant de limiter leur consommation en énergie. De ce fait, le secteur du bâtiment a favorisé le renforcement de l'isolation thermique des composants du bâtiment, notamment les parois opaques extérieures. Cette technique permet d'éviter les déperditions de la chaleur à travers les parois et donc de minimiser la consommation d'énergie nécessaire pour maintenir la température interne requise. Cependant, avec une forte isolation, si elle limite la consommation d'hiver liée au chauffage, elle induit de fortes surchauffes en saison chaude. Afin de lutter contre ce phénomène, diverses méthodes sont proposées, comme la surventilation nocturne [48] [49] [50], les méthodes architecturales [51], et le renforcement de l'inertie thermique. Cette dernière est très intéressante vue les ajustements qu'elle procure. En effet, ce paramètre assure deux enjeux majeurs liés à l'efficacité énergétique du bâtiment dont un enjeu d'amélioration du confort thermique d'été et un enjeu d'économie d'énergie de chauffage d'hiver par le stockage des apports solaires transmis [52] [53] [54].

C'est précisément sur ces enjeux que fournissent les parois d'enveloppe extérieure sur l'efficacité énergétique du bâtiment que l'on s'intéresse à leur inertie thermique. En effet, la réponse dynamique du mur est habituellement décrite par des paramètres liés à l'inertie thermique [55]. Et *Maurizio C. et al.* [56] et *Carlini M. et al.* [57] soulignent également qu'étudier l'inertie thermique des murs de bâtiment nous permet de décrire le comportement thermique dynamique de ces derniers.

II.1.2 - Inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment

II.1.2.1 - Définition de l'inertie thermique des parois de bâtiments

L'inertie thermique peut être considérée comme la capacité des matériaux à maintenir stable sa température intérieure malgré les variations de la température extérieure. C'est-à-dire elle gère la transmission des variations de température et le stockage des flux thermiques dans les

matériaux. Selon *Jeannot Y. [58]*, elle est définie comme une propriété de la paroi du bâtiment à s'opposer aux variations de température. Pour *Liebard [59]*, elle est une notion qui recouvre à la fois l'accumulation de la chaleur et sa restitution progressive au moment venu, avec un décalage dans le temps appelé déphasage. On peut donc définir simplement l'inertie thermique d'un matériau ou d'une paroi comme sa capacité à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit, afin d'atténuer les variations des températures internes. Pour la paroi du bâtiment, l'inertie thermique dépend en grande partie des propriétés thermiques des matériaux qui la constituent. Elle peut être évaluée à l'aide des deux propriétés suivantes : la diffusivité et l'effusivité thermique, ce qui nous conduit à l'introduction des deux types d'inertie thermique suivantes.

II.1.2.2 - Types d'inertie thermique

Dans le domaine de l'habitat, deux types d'inertie sont distingués [58] :

II.1.2.2.1 - Inertie thermique de transmission

Il s'oppose au transfert du flux à travers la paroi et ce sont les parois opaques d'enveloppe exclusivement qui sont concernées. Elle agit en résistant à la variation de température extérieure due aux amplitudes thermiques du climat et aux effets du rayonnement solaire sur les parois d'enveloppe externe. Vis-à-vis de cette variation extérieure, ce type d'inertie fait appel principalement à la diffusivité thermique « *a* » de la paroi d'enveloppe : avec une faible diffusivité, les variations de température seront fortement retardées. En effet, La diffusivité thermique commande la vitesse de transmission d'une variation de température à travers la paroi.

II.1.2.2.2 - Inertie thermique par absorption

Il réduit les variations internes de la température, due à l'intermittence des sources de chaleur interne et à la pénétration solaire par les baies (systèmes passifs à apports directs), en absorbant la chaleur. Ce sont les parois internes qui sont concernées. Par absorption de la chaleur, ce type d'inertie devient prépondérant donnant toute son importance à l'effusivité thermique « *b* » des matériaux constituant les parois. En absorbant facilement les flux de chaleur, un matériau effusif s'échauffera peu et limitera les variations de température interne. En effet, l'effusivité exprime la capacité d'un matériau à absorber (ou à restituer) une puissance thermique.

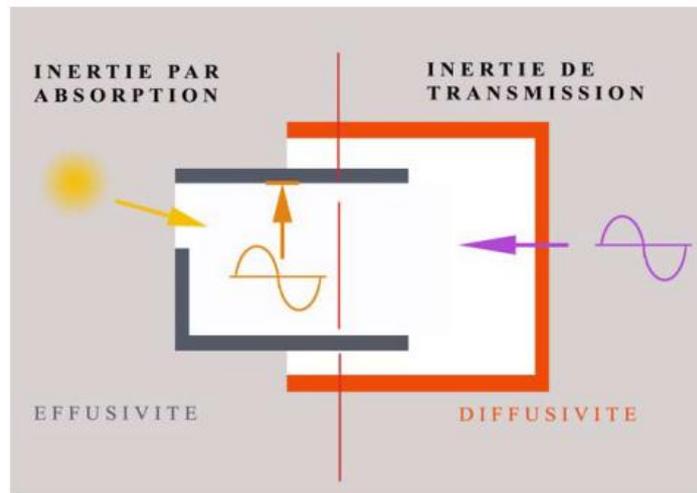


Figure 6 : Représentation des deux types d'inertie thermique [58].

Bien qu'il existe deux types d'inertie thermique, pour la suite de notre travail, on ne parlera que du type inertie de transmission qui concerne la paroi opaque extérieure recevant des sollicitations thermiques en sa surface extérieure.

II.1.2.3 - Enjeux de l'inertie thermique de la paroi

Cette propriété est très importante pour garantir un bon confort thermique et une économie d'énergie du bâtiment durant les deux saisons chaude et froide. *De Gracia A. et al.* [60] soulignent que l'évaluation de l'inertie thermique conduit en une meilleure estimation du confort thermique et de la performance énergétique du bâtiment. Comme montré dans les travaux de *Balaras* [61], il a mis en exergue le rôle de l'inertie thermique sur la charge de climatisation d'un bâtiment. Il a fait dans cette étude une large revue et un classement des outils de simulations permettant le calcul de la charge thermique de climatisation et la température intérieure d'un bâtiment, et qui prennent en compte l'effet de l'inertie thermique. *Norén et al* [62] ont étudié l'influence de l'inertie thermique sur la réduction de la consommation de l'énergie de chauffage d'un bâtiment de référence suédois. Ils ont simulé avec trois logiciels de simulation et ont montré le gain d'énergie obtenue grâce à l'utilisation d'une paroi à forte inertie par rapport à un autre plus léger en inertie. *Medjelekh et al* [63] ont évalué l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique des bâtiments en réalisant une comparaison entre une maison de l'époque coloniale et une villa contemporaine. Leurs résultats ont montré que l'utilisation d'un matériau local adapté au climat de la région permet d'obtenir un confort hygrothermique et réduire ainsi la consommation d'énergie. *Aste et al.* [64] ont étudié l'influence de l'inertie thermique de l'enveloppe sur la performance énergétique d'un bâtiment. Ils ont montré que les parois de forte inertie conduisent à des besoins énergétiques plus faibles

que pour celles à faible inertie : les différences varient entre 1% à 10%. Les auteurs démontrent que le rôle de l'inertie thermique devient plus significatif en présence de solutions efficaces pour économiser l'énergie (surventilation en été, masque, système d'ombrage etc.). Beaucoup de travaux ont montré l'importance de la prise en compte de l'inertie thermique sur le comportement thermique et la consommation d'énergie des bâtiments. Comme les travaux de *Kossecka et al* [65], de *Tsilingiris* [66], de *Gagliano et al* [67], il y a aussi ceux de *Stéphan et al* [68].

II.1.2.3.1 - Influence de l'inertie thermique en saison chaude

Elle est utilisée, en construction, pour amortir les fortes fluctuations de température extérieure, et de maintenir la température intérieure dans la zone de confort de manière à limiter les surchauffes [69]. En effet, *Elangovan R. et al.* [70] disent que l'inertie thermique permet de réduire les gains de flux de chaleur en été afin d'améliorer l'environnement intérieur. *Carlos J.* [49], *Loyal C.* [71] et *Ahmed* [72] ajoutent qu'une forte inertie thermique, liée à une ventilation nocturne, permet d'atténuer les surchauffes durant la journée, en été. *Jonathan K. et al.* [46] expliquent que la ventilation sert uniquement à amener de l'air frais dans le bâtiment, et non à le chauffer ou à le refroidir. Durant les nuits d'été, lorsque la température extérieure est généralement inférieure à la température à l'intérieur du bâtiment, il est possible d'appliquer une ventilation naturelle. L'air ventilé favorise, par la convection, la dissipation de la chaleur stockée dans les parois en l'évacuant vers l'extérieur [71].

II.1.2.3.2 - Influence de l'inertie thermique en saison froide

Et en hiver, une forte inertie thermique permet d'emmagasiner la chaleur de la journée due aux apports solaires puis de la restituer plus tard dans la journée lorsque la température extérieure commence à chuter. En période hivernale, *Balaras C.* [61] affirme que l'énergie disponible des gains solaires et les gains internes durant le jour, est stockée dans la masse et lentement restituée dans l'environnement intérieur plus tard lorsqu'on en a besoin, contribuant ainsi à la diminution de la charge du chauffage. *Eben S.* [73] et *Ben H.* [74] ont démontré l'effet très positif de l'inertie thermique pendant les deux saisons chaude et froide. Ils ont montré à travers des investigations traitant le comportement thermique de deux maisons l'une traditionnelle et l'autre contemporaine, où la maison traditionnelle arrive à réduire considérablement les besoins de chauffage et de refroidissement. De plus, *Elangovan R. et al.* [70] affirment que l'inertie thermique contribue fortement à réduire les pertes de chaleur à l'intérieur, en période hivernale.

II.1.2.3.3 - Influence de l'inertie thermique durant une période jour/nuit

Cependant, pour le cas où la différence de température diurne et nocturne est très importante, une forte inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit. Ceci est particulièrement très intéressant pour une stratégie de systèmes de rafraîchissement nocturne. D'après *Cheng V.* [75], ils affirment que la haute masse thermique retarde le maximum de température pendant le jour. Et de même, *Van der maas et al.* [76] déclarent que la variation de température extérieure entre le jour et la nuit doit être suffisamment importante avec une température et une humidité moyennes comprises dans la zone de confort. *Shaviv E.* [77] démontrent qu'il existe une relation linéaire entre la température intérieure maximale et l'écart de température jour/nuit. Il s'en sert comme outil de conception pour prédire l'efficacité d'une stratégie de rafraîchissement nocturne par l'inertie thermique et la ventilation.

II.2 - STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE

La définition de l'inertie thermique d'une paroi de bâtiment comme la capacité de ce dernier à stocker l'énergie thermique et à la restituer plus tard nous conduit à introduire la notion de stockage de l'énergie thermique.

Le stockage de l'énergie peut se faire par une simple variation de température (stockage à chaleur sensible), par un changement de phase (stockage à chaleur latente), par une transformation physique (adsorption) ou une réaction chimique (stockage thermochimique) [78] [79]. C'est le type de transformation de matériaux qui désigne le mode de stockage de l'énergie. A noter que ces systèmes doivent aussi répondre à des problèmes de non-toxicité et d'excellente tenue dans le temps [80] [81].

Pour l'énergie thermique, elle peut être stockée suite à l'élévation de température qui modifie l'énergie interne du matériau. Les techniques de stockage de l'énergie thermique sont illustrées sur la figure 07 suivante. Les deux voies principales de stockage thermique sont le stockage par la chaleur sensible et le stockage par chaleur latente. La sélection est fonction de la durée de stockage et de la température désirée [78] [82].

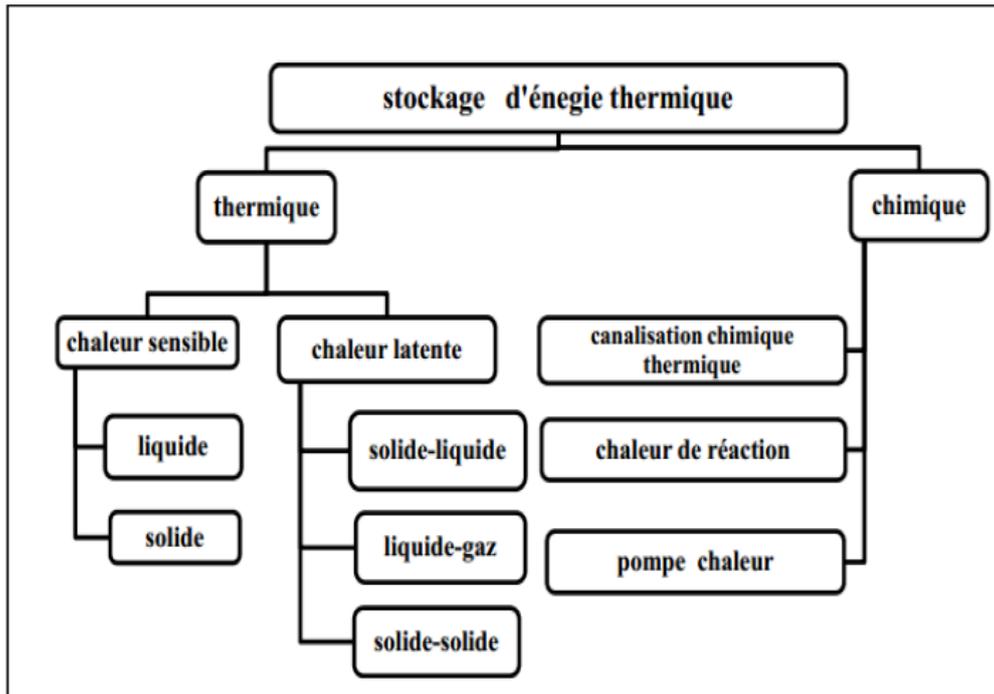


Figure 7 : Les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique [83].

II.2.1 - Le stockage par chaleur sensible

Ce mode de stockage est le moyen le plus ancien utilisé pour emmagasiner de l'énergie sur des durées plus ou moins longues par l'utilisation d'une source de chaleur pour élever la température de la paroi sans changement d'état. L'énergie stockée est généralement faible à cause de la faible densité de stockage ce qui implique des volumes de stockage importants. Cette énergie s'exprime en fonction de la chaleur massique des matériaux C_p et s'écrit de la manière suivante pour une variation de température $T_2 - T_1$ [78] [82] :

$$E_{m,sens} = C_p(T_2 - T_1) \quad (II-1)$$

L'utilisation la plus courante de la chaleur sensible est le stockage thermique saisonnier par des systèmes à grande échelle (stockage souterrain) [82].

II.2.2 - Stockage par chaleur latente

Ce mode de stockage permet de stocker l'énergie par chaleur latente à une température constante qui correspond à la température de changement de phase ou changement d'état physique de la paroi. Le changement d'état à température constante permet essentiellement de réguler la température dans les applications de chauffage ou de climatisation des bâtiments.

Le changement de phase solide-liquide, dont la variation volumique est faible, permet de stocker une grande énergie sous forme de chaleur latente avec des variations faibles de température. Un matériau à changement de phase stocke en premier lieu l'énergie sous forme

de chaleur sensible et lorsque la température extérieure atteint sa température de changement de phase, le matériau change d'état provoquant une rupture des liaisons entre les chaînes moléculaires constituant le matériau. La figure 8 suivante décrit la relation entre l'élévation de la température et l'enthalpie d'un matériau au cours et en dehors d'un changement de phase [80].

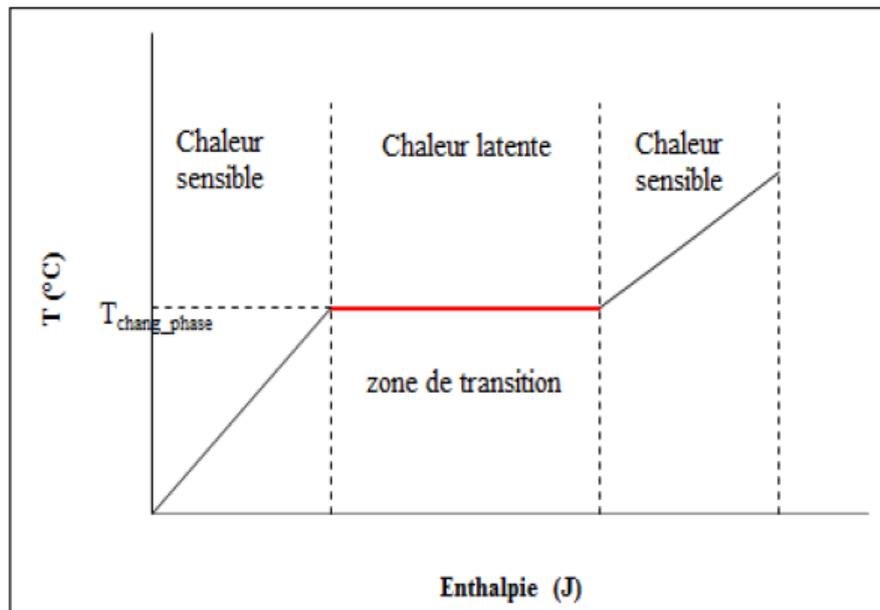


Figure 8 : Relation Température/Enthalpie [80].

Le changement d'état d'un matériau pur se fait à température constante et l'énergie sera stockée par chaleur latente jusqu'à la transformation complète d'un état à un autre. Le surplus d'énergie sera stocké sous forme de chaleur sensible [80].

L'énergie massique stockée s'écrit de la manière suivante [82] :

$$E_{m,lat} = \Delta H_{latente} = \int C_p dt \quad (\text{II-2})$$

Où $\Delta H_{latente}$ est l'enthalpie massique de transformation ou de changement de phase.

Le stockage de l'énergie thermique dans les enveloppes extérieures des bâtiments joue un rôle très important car il permet d'amortir et de lisser les fluctuations thermiques à l'intérieur des pièces et de maintenir une température moyenne acceptable dans ces derniers pendant un certain nombre d'heures. Pour notre cas, il n'existe pas des matériaux à changement de phase dans les parois couramment utilisées, alors l'énergie thermique est stockée par chaleur sensible dans ces derniers.

II.3 - METHODES D'ETUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DYNAMIQUE DES MURS

Le comportement thermique dynamique d'une enveloppe extérieure de bâtiment dépend des paramètres liés à l'inertie thermique qui représentent la réponse dynamique de l'enveloppe lorsqu'elle est soumise à un cycle de radiation solaire. Etudier le comportement du mur en régime variable consiste donc à évaluer son inertie thermique.

II.3.1 - Caractérisation de l'inertie thermique d'une paroi

La notion d'inertie thermique n'est pas facile à appréhender. La plupart du temps, elle est définie comme étant la vitesse avec laquelle la paroi du bâtiment réagit à des perturbations extérieures. Si l'isolation thermique d'une paroi est caractérisée par la résistance thermique R_{th} et, son inverse, la transmittance thermique U_{th} calculées suivant la norme *ISO 6946* [84] ; il n'existe pas de paramètre permettant de caractériser précisément l'inertie thermique. Cependant, il existe des paramètres permettant de l'estimer.

D'une part, la réponse dynamique d'une paroi face aux sollicitations thermiques périodiques dépend en grande partie des propriétés thermiques du matériau qui la constitue. Les deux grandeurs suivantes : la diffusivité et l'effusivité thermiques donnent une information importante pour évaluer l'inertie thermique à l'échelle d'un matériau. Comme dans les travaux de *Zhou et al.* [85] [86] et de *Mazzeo D. et al.* [87] qui ont illustré les effets des propriétés thermiques d'un PCM incorporé dans un panneau mural SSPCM sur l'inertie thermique de ce dernier, lorsqu'elle est soumise, respectivement, à l'action d'une température et d'un flux de chaleur sinusoïdal périodique sur sa surface extérieure. Ou comme dans *Azhary K. et al.* [88] qui étudient l'influence de ces grandeurs sur le comportement thermique dynamique de l'argile non cuite. Ils ont montré les avantages de l'amélioration de ces propriétés sur la capacité de l'argile à fournir un bon confort thermique sans recourir aux systèmes de chauffage et de refroidissement.

D'autre part, lorsqu'on passe à l'échelle d'assemblage de matériaux, ce dernier a une influence non négligeable qui modifie totalement le comportement de celles-ci. On introduit alors d'autres paramètres servant à les caractériser, comme ceux décrits par la norme *ISO 13786* [89]. De plus, cette norme donne des démarches à suivre pour les calculer. L'application du modèle du solide semi-infini est aussi une autre méthode pour étudier le comportement thermique d'une paroi lorsqu'elle est soumise à des perturbations thermiques sinusoïdales en sa surface. Les méthodes expérimentales sont les plus pertinents car elles permettent d'évaluer le

comportement du mur sous les conditions météorologiques réelles. Mais elles nécessitent l'utilisation de bons instruments de mesure et une maîtrise parfaite des techniques de mesure.

II.3.2 - Modèle du solide semi-infini

Les parois extérieures des bâtiments sont généralement soumises à des sollicitations de nature périodique. Ainsi, les températures et les flux sont souvent modélisés par des fonctions sinusoïdales. Ce modèle est une méthode analytique, basée sur un régime périodique établi, permettant de connaître à chaque instant l'évolution de la distribution de la température à l'intérieur du milieu semi-infini. Cette distribution est une solution de l'équation de transfert de chaleur (équation I-14) par conduction à travers le matériau. Elle donne des informations importantes concernant l'inertie thermique du milieu.

II.3.2.1 - Milieu semi-infini

Un milieu semi-infini est une paroi d'épaisseur suffisamment grande que la perturbation appliquée sur une face ne soit pas ressentie par l'autre face. Un tel système représente l'évolution d'un mur d'épaisseur finie pendant un temps suffisamment court pour que la perturbation créée sur une face n'ait pas atteint l'autre face [90] (vrai tout le temps que la température de l'autre face n'a pas varié). On dit également que le système est thermiquement épais.

II.3.2.2 - Propagation d'une variation sinusoïdale de température en surface

II.3.2.2.1 - Évolution de la température dans un milieu semi-infini [1] [91] [92]

Considérons un corps s'étendant à l'infini limité par une surface plane ($x = 0$). Supposons que l'amplitude de température soit uniforme dans tout le plan parallèle à la surface et ne dépende que de la coordonnée x et du temps t , $T(x, t)$.

Admettons que la température initiale dans le corps varie autour d'une valeur moyenne T_i quel que soit la profondeur. Si l'on impose une perturbation thermique superficielle sinusoïdale, de période $P = 24h$, donnée par la relation (II-3) suivante :

$$T_0 = (\Delta T_m)_{x=0} \sin \omega t \quad (\text{II-3})$$

Avec T_0 : température en surface à l'instant t

$$(\Delta T_m)_{x=0} : \text{amplitude imposé en surface ; } (\Delta T_m)_{x=0} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

$\omega = \frac{2\pi}{P}$ est la pulsation de l'onde de température périodique.

On a donc, en tout point du milieu semi-infini (en x quelconque), une température de la forme :

$$T(x, t) = T_i + T'_0 \quad (\text{II-4})$$

Où T'_0 est la perturbation en un point du corps résultant de la perturbation T_0 en $x = 0$.

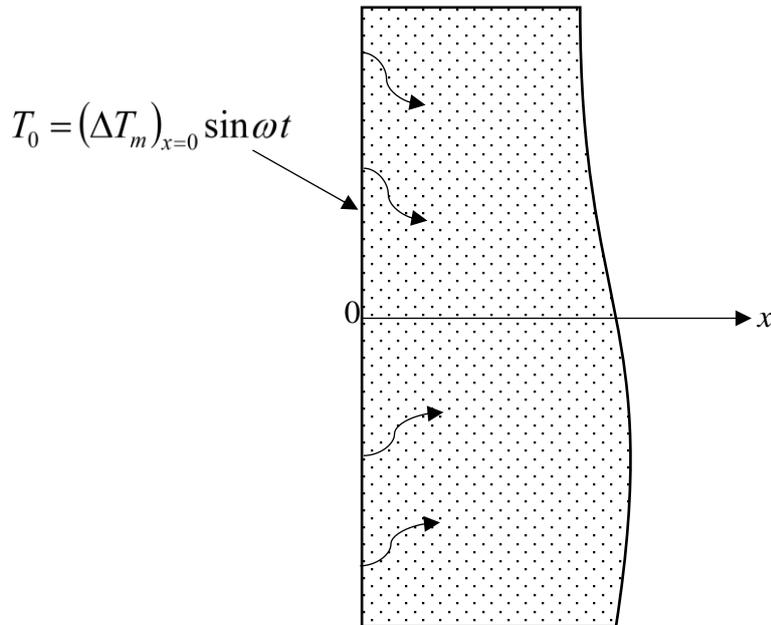


Figure 9 : Milieu semi-infini avec température sinusoïdale imposée en surface [1].

La valeur de $T(x, t)$ sera obtenue à partir de la résolution de l'équation générale du transfert de chaleur :

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (\text{II-5})$$

Où « a » est la diffusivité thermique du matériau ; $a = \frac{\lambda_{\text{éq}}}{\rho C_p}$.

Comme T_i est généralement fixe au cours du temps, on est ramené à résoudre l'équation :

$$\frac{\partial T'_0(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T'_0(x, t)}{\partial x^2} \quad (\text{II-6})$$

Toute variation cyclique de température appliquée à la surface étant décomposable en série de Fourier, on n'envisage qu'une variation purement sinusoïdale de part et d'autre d'une température moyenne T_m [94]. Alors, on peut faire une décomposition en produit de fonctions

et chercher une solution de même fréquence que l'excitation, pour trouver la solution de ce système en régime quasi-stationnaire.

Cherchons alors une solution de la forme :

$$T'_0(x, t) = A(x) \sin \omega t + B(x) \cos \omega t \quad (\text{II-7})$$

En effet, l'amplitude et la phase changent à une distance x de la face d'entrée.

En remplaçant $T'_0(x, t)$ dans l'équation différentielle, on a donc :

$$\left(\omega A(x) - a \frac{d^2 B(x)}{dx^2} \right) \cos \omega t = \left(\omega B(x) + a \frac{d^2 A(x)}{dx^2} \right) \sin \omega t \quad (\text{II-8})$$

Pour qu'une fonction de x soit égale à une fonction de t , il faut que :

$$\left(\omega A(x) - a \frac{d^2 B(x)}{dx^2} \right) = 0 \quad \text{et} \quad \left(\omega B(x) + a \frac{d^2 A(x)}{dx^2} \right) = 0 \quad (\text{II-9})$$

Ajoutons les deux membres de ces deux égalités après avoir multiplié la deuxième par i et introduisons la fonction $Z = A(x) + iB(x)$. On a :

$$\frac{d^2 Z}{dx^2} - i \left(\frac{\omega}{a} Z \right) = 0 \quad (\text{II-10})$$

Les racines de l'équation caractéristique sont de la forme :

$$r_1 = \sqrt{\frac{\omega}{2a}}(1+i) \quad \text{et} \quad r_2 = -\sqrt{\frac{\omega}{2a}}(1+i) \quad (\text{II-11})$$

$$\text{Soit : } Z = A(x) + iB(x) = \alpha \exp \left[\sqrt{\frac{\omega}{2a}}(1+i)x \right] + \beta \exp \left[-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}(1+i)x \right] \quad (\text{II-12})$$

Où α et β sont les constantes d'intégration.

$$\text{Mais : } A(x) = R_e(Z) = \alpha \exp \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x + \beta \exp \left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x \right) \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x \quad (\text{II-13})$$

$$B(x) = I_m(Z) = \alpha \exp \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x - \beta \exp \left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x \right) \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x \quad (\text{II-14})$$

Comme $T'_0(x, t)$ ne peut tendre vers ∞ si x tend vers ∞ , on a donc $\alpha = 0$; soit :

$$T'_0(x, t) = \beta \exp \left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x \right) \left(\sin \omega t \cos \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x - \cos \omega t \sin \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x \right) \quad (\text{II-15})$$

Et pour $x = 0$, on a : $T'_0(x, t) = (\Delta T_m)_{x=0} \sin \omega t \Rightarrow \beta = (\Delta T_m)_{x=0}$

Donc, on a l'expression de $T'_0(x, t)$ suivant :

$$T'_0(x, t) = (\Delta T_m)_{x=0} \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \sin\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \quad (\text{II-16})$$

Cette relation représente la perturbation thermique en un point x du corps à l'instant t . Elle est très importante. En effet, elle décrit la propagation de l'onde de température résultant de la perturbation T_0 appliquée à la surface d'entrée du mur semi-infini, pour un régime périodique pur établi. Et la température en tout point du corps est donc donnée par :

$$T(x, t) = T_i + T'_0(x, t) = T_i + (\Delta T_m)_{x=0} \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \sin\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \quad (\text{II-17})$$

Cette dernière nous permet de déterminer la distribution de la température en tout point x d'un mur semi-infini, à chaque instant t . On peut en déduire les différents paramètres caractérisant la propagation de la température et qui décrit l'inertie thermique du milieu.

II.3.2.2.2 - Variation de l'amplitude de température en un point x fixé à chaque instant t

Elle est obtenue par la relation (II-18) ci-dessous :

$$\Delta T(x, t) = T(x, t) - T_i = (\Delta T_m)_{x=0} \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \sin\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \quad (\text{II-18})$$

Et l'amplitude en un point x fixé est donnée par :

$$\Delta T(x) = (\Delta T_m)_{x=0} \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \quad (\text{II-19})$$

On voit qu'elle dépend de la diffusivité thermique du corps. Elle décroît exponentiellement en fonction de la profondeur et se conserve d'autant plus grande que « a » est élevée.

II.3.2.2.3 - Vitesse apparente de propagation de l'onde de température

Si on pose $T'_0 = 0$ pour tout couple de valeur (x, t) tel que :

$$\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2a}} = 0 \quad \text{ou} \quad \omega \Delta t - \Delta x\sqrt{\frac{\omega}{2a}} = 0 \quad (\text{II-20})$$

Donc, en observant qu'un maximum (ou minimum) de température en $x = 0$ se retrouve à une profondeur Δx pendant le temps Δt , on peut dire que ce maximum (ou minimum) a voyagé avec une vitesse V telle que :

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \sqrt{2a\omega} \quad (\text{II-21})$$

C'est la vitesse avec laquelle un point de l'onde, par exemple un point d'amplitude maximum (ou minimum), se déplace dans la direction des x , après un temps mais elle n'a rien à voir avec la propagation de la chaleur elle-même. Cette vitesse varie comme $a^{1/2}$ ce qui montre l'importance de la valeur de la diffusivité quant à la vitesse apparente de propagation d'une onde thermique.

II.3.2.2.4 - Longueur d'onde de propagation de la température

Si on continue à considérer la pénétration de cette onde, on peut définir sa longueur d'onde :

$$l = V P = P \sqrt{2a\omega} = 2 \sqrt{a \pi P} \quad (\text{II-22})$$

On définit aussi la demi-longueur d'onde comme étant la « profondeur d'inversion ». En effet, lorsqu'un point est au maximum, une demi-longueur d'onde plus loin de ce point est au minimum.

Si on fait $x = l$ dans l'expression de l'amplitude en un point x , de l'équation II-19, on obtient :

$$\Delta T(l) = (\Delta T_m)_{x=0} \exp\left(-2\sqrt{a\pi P} \sqrt{\frac{\pi}{aP}}\right) = (\Delta T_m)_{x=0} \exp(-2\pi) \quad (\text{II-23})$$

Et de même, pour $x = 2l$, on a :
$$\Delta T(2l) = \Delta T(l) \exp(-2\pi) \quad (\text{II-24})$$

Donc, chaque fois que l'on s'enfonce dans le corps semi-infini d'une profondeur égale à l , l'amplitude de l'oscillation des températures est divisée par 535.

II.3.2.2.5 - Profondeur de pénétration d'une onde de température

La diffusivité thermique permet de caractériser la profondeur de pénétration δ d'un signal de température périodique sinusoïdal imposé à la surface d'un mur semi-infini. C'est la profondeur à laquelle l'amplitude du signal est amortie d'un facteur « k ». Elle est calculée à partir de :

$$\delta(\omega) = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad (\text{II-25})$$

Donc, à la profondeur $x = \delta$, l'amplitude de température vaut :

$$\Delta T(x = \delta) = (\Delta T_m)_{x=0} \exp(-1) = 0,37 (\Delta T_m)_{x=0} \quad (\text{II-26})$$

Ainsi donc, à la profondeur de pénétration δ , l'amplitude ne représente plus que 37% de sa valeur imposée à la surface extérieure ($x = 0$).

II.3.2.2.6 - Le déphasage thermique et le facteur d'amortissement en amplitude [71]

Le déphasage et le facteur d'amortissement caractérisent la réponse thermique dynamique du milieu. Le déphasage thermique φ définit le temps que met un flux de chaleur pour traverser la paroi. Il est le temps nécessaire pour que la température de la face intérieure atteigne son maximum à partir du moment où a lieu le pic de température de la face extérieure. Il évolue avec l'inertie thermique du bâtiment. Un déphasage suffisant permettra par exemple que la chaleur extérieure n'arrive qu'en fin de journée dans l'habitat, période où il est plus facile de le rafraîchir grâce à une simple ouverture des fenêtres. L'idéal est d'avoir un déphasage compris aux alentours de 12h, ce qui permet une diffusion régulière de la chaleur sur la journée et d'atténuer les pics de chaleur en été.

Le facteur d'amortissement pour une distance x à l'intérieur du mur semi-infini est le rapport des amplitudes de la température intérieure en un point x et de la température de surface à l'extérieure (en $x = 0$). Plus le facteur d'amortissement est faible plus les températures intérieures sont amorties. Noté f , il est donné par :

$$f = \frac{\Delta T(x)}{(\Delta T_m)_{x=0}} \quad (\text{II-27})$$

Où $\Delta T(x)$: amplitude de température de la face situé à une distance x ;

Ces deux facteurs de la réponse thermique dynamique sont très intéressants car ils décrivent l'inertie thermique du milieu considéré. *Emmanuelle H. et al. [55]* disent que l'inertie thermique des murs peut être brièvement expliquée par ces deux paramètres. *Alberto M. et al. [93]* ajoutent qu'ils sont faciles à comprendre, alors ils sont hautement pris en compte dans la construction. *Cianfrini M. et al. [94]* montrent qu'il existe une corrélation directe entre ces deux facteurs. Plus le déphasage est faible, plus le facteur d'amortissement est élevé. Les travaux de *Aste et al. [64]* l'ont vérifié à l'aide des calculs du déphasage thermique et le facteur d'amortissement pour deux parois ayant de même résistance thermique mais de masse différente. Ils ont montré que la paroi légère possède un déphasage plus faible et un facteur d'amortissement plus élevé

que celui de la paroi lourde. Ils en déduisent que la paroi légère atténue moins les variations des fluctuations thermiques extérieures que la paroi lourde.

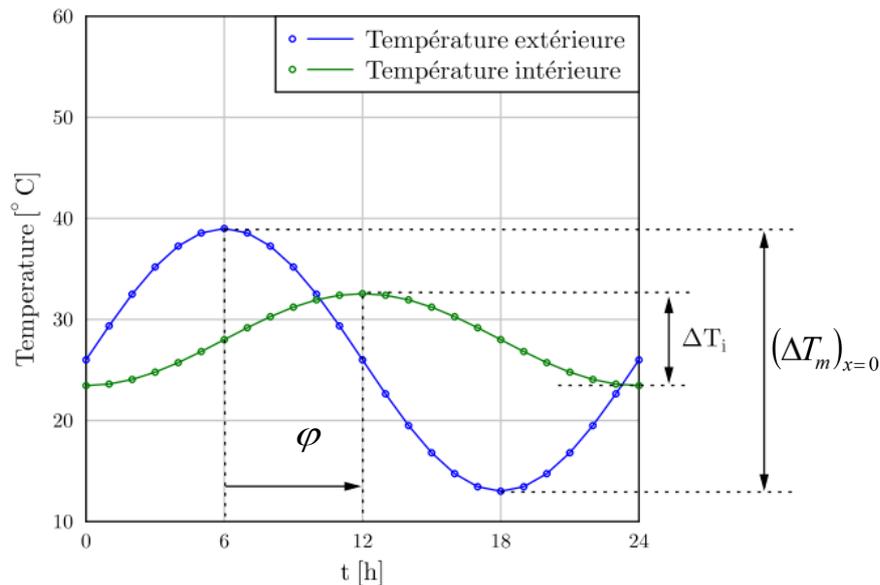


Figure 10 : Représentation du déphasage thermique et du facteur d'amortissement [71].

Le déphasage et le facteur d'amortissement ont fait l'objet de nombreuses études. De nombreuses auteurs ont étudié et cherché les influences de différents paramètres sur leurs variations. *Asan H. et al.* [69] ont réalisé une étude numérique par la méthode de différence finie (schéma de Cranck-Nicolson), les effets simples et combinés des propriétés thermophysiques et de l'épaisseur d'un mur de bâtiment sur le déphasage et l'amortissement d'une perturbation thermique périodique appliquée sur sa face extérieure. Les travaux de *Assan* [95], de *Lakatos* [96] et de *Fayçal F. et al.* [97] ont confirmé que l'épaisseur de la paroi était le principal paramètre pertinent pour le déphasage et l'amortissement du flux de chaleur, même si la composition des murs est très importante. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse courante selon laquelle des masses élevées par unité de surface avant des murs entraînent des décalages importants, car ils sont linéairement proportionnels à l'épaisseur des murs. Mais *Arendt et al.* [98] ont étudié par des simulations numériques l'influence de la taille des cavités, dans un mur en brique d'argile de 300 mm d'épaisseur, sur ces deux facteurs. Leurs résultats montrent que le décalage temporel était compris entre 14 heures et 16,7 heures, avec un maximum à une concentration intermédiaire dans la cavité. *Elangovan R. et al.* [99] ont cherché l'influence de la densité du mur sur ces deux paramètres. Ils ont affirmé que les matériaux de haute densité et de chaleur spécifique procurent un amortissement thermique plus élevé. En conséquence, les facteurs de retard thermique et d'amortissement augmentent. Le matériau de densité plus élevée entraîne une réduction de 1,5°C du pic de température intérieure par rapport

au mur de faible densité. *Tzoulis T. et al.* [100] ont déterminé les effets de l'orientation de la face extérieure d'un mur en béton sur le déphasage et l'amortissement du flux de chaleur absorbé. Ils disent que l'effet de l'orientation s'est avéré faible sur les valeurs de f par rapport aux valeurs de φ .

Le déphasage et le facteur d'amortissement peuvent être évalués en fonction de la température intérieure et fournissent des informations sur le comportement de celle-ci. Ils peuvent être aussi calculés à partir des propriétés thermophysiques des matériaux constituant le milieu. *Ulgen* [101] a développé les expressions analytiques du déphasage et de l'amortissement, d'une paroi homogène, en fonction des propriétés du matériau qui la constitue. Il réalise aussi une étude expérimentale de l'effet des conditions extérieures sur le comportement de dix types de murs. Il montre à travers une comparaison avec les résultats expérimentaux sur les différents types de murs qu'on arrive plus ou moins à bien approcher les deux facteurs ci-dessus en fonction de la composition des parois.

II.3.2.3 - Applicabilité du modèle semi-infini à une paroi de dimension finie

Cette section consiste à vérifier si toutes les équations caractérisant la propagation d'une onde de température en tout point x d'un mur semi-infini sont d'application à des murs d'épaisseurs finis. C'est-à-dire si le problème de transfert conductif au sein des murs peut se ramener au concept du solide semi-infini au sens thermique.

Pour ce faire, on utilise la notion d'épaisseur de la couche limite thermique « e_{ct} ». En effet, pour vérifier qu'un milieu est « thermiquement infini » ou non, il faut définir son épaisseur de la couche limite thermique. *Itterbeek R.* [91] l'a définie comme étant l'épaisseur de la couche sur laquelle il y a une atténuation de 90% de l'amplitude de température arrivée à la surface extérieure de la paroi. C'est-à-dire que le facteur d'amortissement en amplitude sur cette couche vaut 10%. La chaleur est donc quasiment trop faible sur ce plan, et cela implique que la variation de l'amplitude de température de l'autre face des murs (face intérieure) peut être considérée comme négligeable.

Il s'agit de trouver les épaisseurs admissibles pour lesquelles on peut appliquer le modèle, à un instant t fixe donné. Si on fait le rapport de l'amplitude de température sur la couche limite thermique (en $x = e_{ct}$) rapportée à l'amplitude de température imposée à la surface, on trouve l'épaisseur de la couche limite thermique pour laquelle il ne reste plus que 10% de l'amplitude de température imposée en surface :

$$\frac{\Delta T(e_{ct})}{(\Delta T_m)_{x=0}} = \frac{(\Delta T_m)_{x=0} \exp\left(-e_{ct} \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)}{(\Delta T_m)_{x=0}} = \exp\left(-e_{ct} \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) = 0,1 \quad (\text{II-28})$$

$$\Rightarrow e_{ct} = -\frac{\ln(0,1)}{\sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \quad (\text{II-29})$$

Elle détermine la profondeur du plan vertical, située à l'intérieure du mur, pour laquelle on commence à ne plus ressentir la chaleur générée par les perturbations thermiques à la surface extérieure. On constate qu'elle varie suivant la valeur de la diffusivité thermique du matériau. Elle est grande suivant la valeur de « a » croissante. Sa variation est illustrée sur la figure 11 ci-après. Si l'épaisseur réelle du mur est supérieure à cette valeur, alors on peut utiliser les démarches suivant le modèle du solide semi-infini pour des murs d'épaisseurs finies.

Autrement dit : Si $d > e_{ct} \Rightarrow$ mur semi-infini (modèle semi-infini valable).

Si $d < e_{ct} \Rightarrow$ mur fini (modèle semi-infini inapplicable).

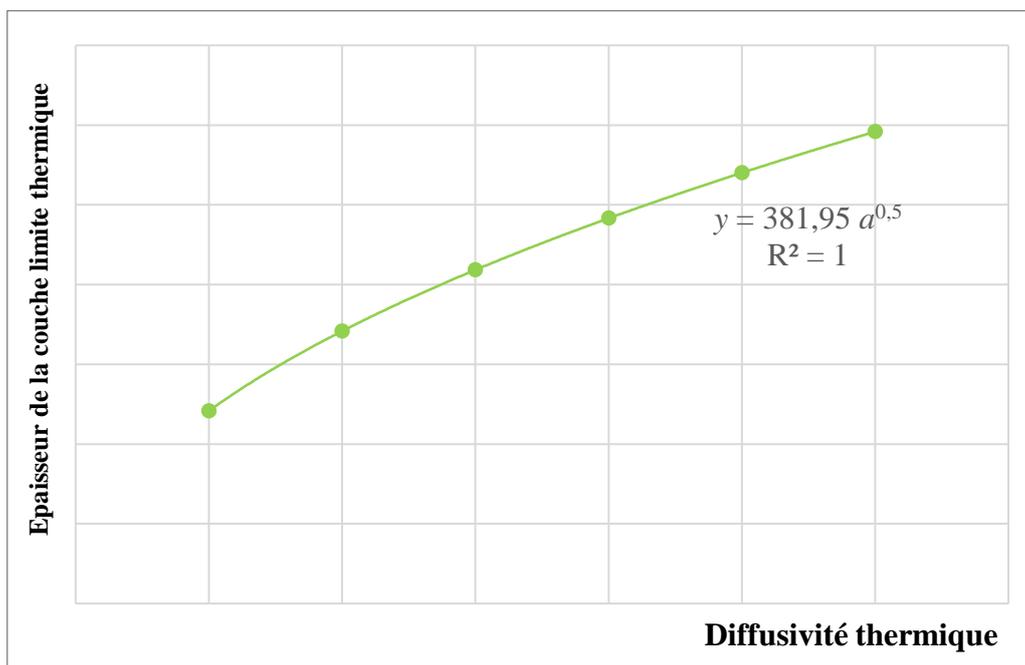


Figure 11 : Variation de e_{ct} suivant les valeurs de la diffusivité thermique [Auteur].

La variation peut se mettre sous forme d'équation de type $e_{ct} = 381,95\sqrt{a}$ avec un coefficient de corrélation $R = 1$. On remarque qu'elle augmente avec la racine carrée de la valeur de a . La profondeur de la couche sur laquelle il ne reste plus que de 10% de la

température extérieure, pour les murs de grande diffusivité thermique, est donc assez grande. Elle peut être même supérieure à l'épaisseur de ces derniers. Dans ce cas, les murs ne peuvent pas être assimilés, thermiquement, comme un mur semi-infini.

II.3.3 - Les démarches de la norme internationale ISO 13786

II.3.3.1 - Généralité

La norme internationale ISO 13786 a été développée pour fournir un instrument d'évaluation capable de quantifier les caractéristiques décrivant le comportement thermique dynamique des composants de bâtiments sous l'influence des sollicitations thermiques (températures et flux de chaleur) variables sur ses faces [102]. Elle propose donc des démarches pour leurs calculs. Elle fournit aussi des termes et définitions qui sont indispensables pour son application. Cependant, les méthodes présentées dans cette norme ne concernent que les composants plans monocouches homogènes ou constituées de plusieurs couches homogènes soumis à des flux de chaleur unidirectionnel.

II.3.3.2 - Termes et définitions utiles

Les termes et définitions fournis dans cette norme sont applicables à tous les composant du bâtiment.

- Selon la norme internationale ISO 13786 [89], un composant est une partie du bâtiment, tel que le mur, le sol ou le plancher, la toiture, le plafond ou une partie d'un tel élément.
- Un composant plan est un composant pour lequel le plus petit rayon de courbure est au moins cinq fois de son épaisseur.
- Une couche homogène est une couche de matériau dans laquelle la plus grande taille d'inhomogénéité ne dépasse pas le cinquième de l'épaisseur de la couche.
- Une zone thermique d'un bâtiment est la partie dans laquelle la température interne est supposée avoir des variations spatiales négligeables.
- Les conditions sinusoïdales sont définies comme les conditions dans lesquelles les variations de température et les flux de chaleur autour de leurs valeurs moyennes à long terme sont décrites par une fonction sinusoïdale du temps.

II.3.3.3 - Phénomènes physiques à la base de la méthode

Les phénomènes physiques présentés dans la partie I qui agissent sur un mur extérieur sont à la base de cette méthode. Ils sont représentés à l'aide de la figure 12 suivante, avec les paramètres et coefficients mis en jeu.

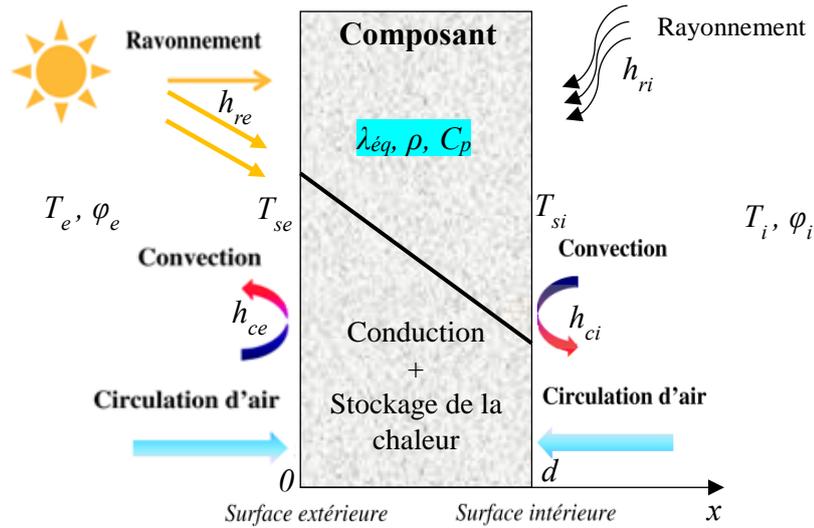


Figure 12 : Phénomènes physiques à la base du démarche ISO 13786 [Auteur].

Ces phénomènes physiques sont gouvernés par les équations qui relient le flux de chaleur échangé à la variation de la température. La conduction de chaleur à l'intérieur du mur est régie par l'équation générale (II-30) qui permet de connaître, à chaque instant, l'évolution et la distribution de la température en chaque point du composant.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_{ég}}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{II-30})$$

Sur les faces extérieure et intérieure, le transfert de chaleur par conduction est relayé par la convection et le rayonnement. Donc, l'application de la condition aux limites de FOURIER (paragraphe I.2.4.2) sur ces deux faces permet d'obtenir les expressions qui traduisent l'échange thermique entre les faces extérieure et intérieure du composant et son milieu environnant. Les quantités de flux de chaleur échangées peuvent se présenter comme suit :

A l'extérieur (en $x = 0$) :

$$\varphi_e = -\lambda_{ég} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h_{ce}(T_{se} - T_e) + h_{re}(T_{se} - T_e) = h_e(T_{se} - T_e) \quad (\text{II-31})$$

A l'intérieur (en $x = d$) :

$$\varphi_i = -\lambda_{ég} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=d} = h_{ci}(T_{si} - T_i) + h_{ri}(T_{si} - T_i) = h_i(T_{si} - T_i) \quad (\text{II-32})$$

Ces deux expressions traduisent les liens entre le mur et le milieu extérieur. Elles permettent de résoudre l'équation générale (II-30), qui donne la répartition de la température dans le mur.

h_i et h_e sont les coefficients d'échange surfaciques par convection et rayonnement entre le mur et son environnement, respectivement, de l'intérieur et de l'extérieur.

Avec : $h_i = h_{ci} + h_{ri}$ et $h_e = h_{ce} + h_{re}$

La norme ISO 13786 considère un régime périodique stable comme un régime thermique, réalisé au moyen d'une oscillation sinusoïdale de la température ou d'un flux de chaleur sur l'une des faces du composant ou même sur les deux [42]. En effet, la surface extérieure du mur est toujours soumise au cycle journalier (saisonnier) du rayonnement solaire, les flux et températures y varient sinusoïdalement. Cette variation conduit à adopter le concept du milieu semi-infini soumis à une variation sinusoïdale de la température et du flux de chaleur sur lequel la norme ISO 13786 s'appuie.

II.3.3.4 - Formalismes à la base de la méthode

Les travaux de *Mazzeo D. et al.* [42] considèrent qu'un composant plan, homogène soumis à l'action conjointe des charges thermiques externes et internes peut être schématisé avec un circuit électrique équivalent sur la figure 13, qui fait référence au régime périodique sinusoïdal et qui a été résolu avec la méthode de superposition de causes et d'effets.

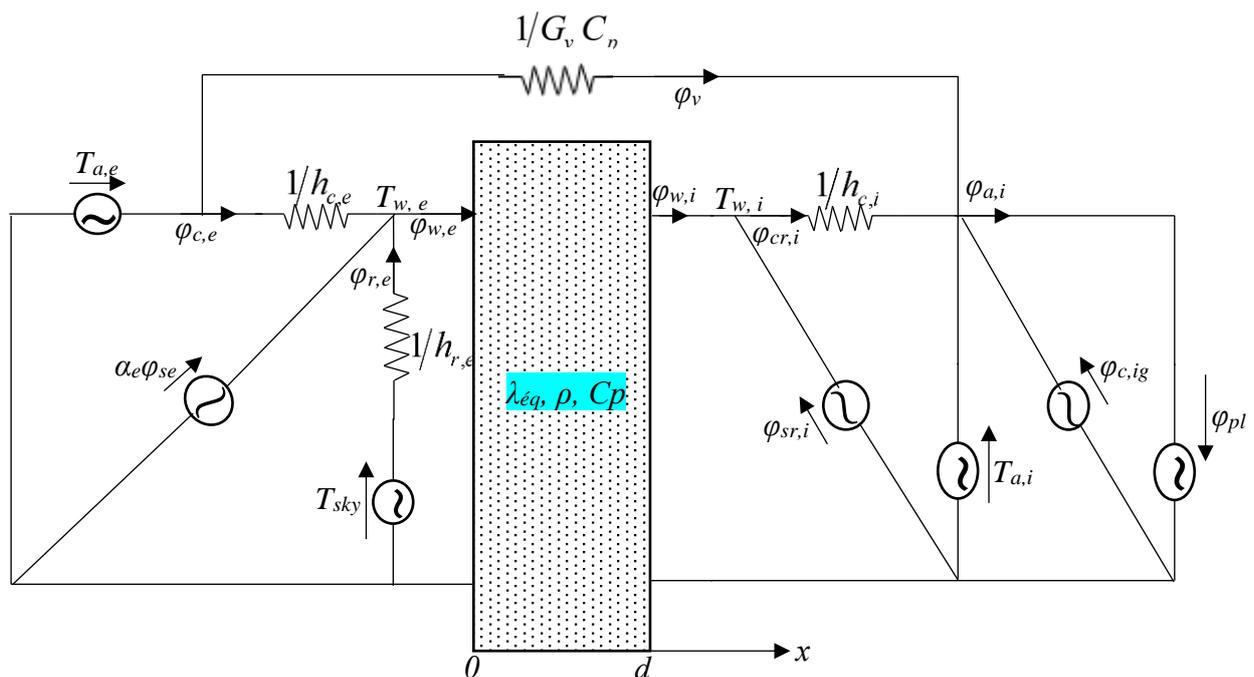


Figure 13 : Circuit électrique équivalent d'un composant plan monocouche homogène [42].

Les sollicitations thermiques appliquées à un composant extérieur regroupent les charges à l'extérieure et à l'intérieure du bâtiment. Ce qui se présente à l'extérieure sont la température de l'air exterieur $T_{a, e}$, la température apparente du ciel T_{sky} , les radiations solaires absorbées $\alpha_e \varphi_{se}$. Et à l'intérieur, il y a la température de l'air intérieure $T_{a, i}$, le flux de chaleur radiative à onde courte $\varphi_{sr, i}$, le flux de chaleur par ventilation φ_v , les flux de chaleurs convectives due à des sources $\varphi_{c, ig}$ et le flux de chaleur fourni par l'installation φ_{pl} .

D'une manière simplifiée, les charges thermiques agissants sur le composant du bâtiment peuvent être représentés par une simple configuration dont seulement les grandeurs d'entrées et de sorties sont affichées (flux de chaleur et température). Considérons donc un composant plan, homogène, monocouche de paramètres thermophysiques constants soumise à des sollicitations thermiques périodiques et on suppose que le régime sinusoïdal établi est atteint.

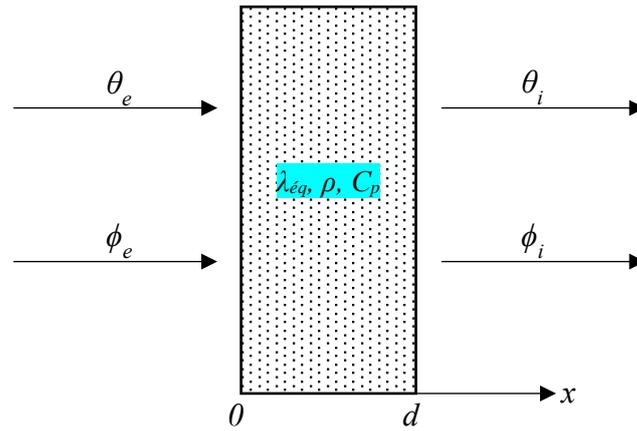


Figure 14 : Configuration simplifiée d'un composant plan.

Selon l'approche relativement simple de l'analyse dynamique d'un composant de bâtiment, la démarche proposée dans la norme ISO 13786 est basé sur le fait que toute fonction périodique telle que le modèle d'évolution temporelle de la température soleil-air extérieur (équation II-33), peut être décomposée en une série de FOURIER constituée de la somme d'un ensemble (éventuellement infini) de fonctions oscillantes simples, à savoir des sinus ou des cosinus [93].

$$T_{sol-air}(t) = \bar{\theta}_e + \sum_{n=1}^{\infty} |\hat{\theta}_{e,n}| \cos(n\omega t + \psi_n) \cong \bar{T}_e + \frac{(1-\rho_{sol})}{h_{ce} + h_{re}} \bar{I}_{sol} + \frac{(1-\rho_{sol})}{h_{ce} + h_{re}} \sum_{n=1}^{\infty} |\hat{I}_{sol,n}| \cos(n\omega t + \psi_n) \quad (\text{II-33})$$

Le groupe de termes qui se multiplie avec I_{sol} , dans lequel il est également supposé constant en raison de sa faible dépendance à la température, affecte clairement de manière linéaire toutes les harmoniques de la série de Fourier. L'oscillation de la température sol-air qui pénètre dans l'élément de construction et qui contribue finalement à un flux de chaleur périodique entrant dans la température ambiante interne est donc :

$$\theta_n(t) = \bar{\theta}_n + \sum_{n=1}^{\infty} |\hat{\theta}_n| \cos(n\omega t + \psi_n) \quad (\text{II-34})$$

La longueur de pénétration des harmoniques diminue avec leur ordre n ; de plus, le terme du premier ordre est souvent dominant. Par conséquent, l'analyse peut être limitée au premier terme d'ordre ($n = 1$), qui produit les effets les plus significatifs dans l'ambiance intérieure. La déviation

résultant de l'utilisation de conditions aux limites non sinusoïdales par rapport aux conditions sinusoïdales prises en compte dans l'ISO 13786 s'est révélée faible et généralement préventive [103].

Ainsi, les oscillations de la température équivalente et celle du flux thermique externe peuvent être simplifiées par les expressions suivantes [89] :

$$\theta_e(t) = \bar{\theta}_e + |\hat{\theta}_e| \cos(\omega t + \psi) \equiv \bar{\theta}_e + \frac{1}{2} (\hat{\theta}_{+e} e^{j\omega t} + \hat{\theta}_{-e} e^{-j\omega t}) \quad (\text{II-35})$$

$$\phi_e(t) = \bar{\phi}_e + |\hat{\phi}_e| \cos(\omega t + \varphi) \equiv \bar{\phi}_e + \frac{1}{2} (\hat{\phi}_{+e} e^{j\omega t} + \hat{\phi}_{-e} e^{-j\omega t}) \quad (\text{II-36})$$

Où les amplitudes complexes de la température et du flux de chaleur sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{\pm e} = |\hat{\theta}_e| e^{\pm j\psi} \\ \hat{\phi}_{\pm e} = |\hat{\phi}_e| e^{\pm j\varphi} \end{cases} \quad (\text{II-37})$$

Des formules analogues peuvent être déduites pour les oscillations du flux de chaleur et de la température à la surface interne.

Par l'analogie électrique-thermique, la configuration simplifiée d'un composant plan, homogène (figure 14), permet de représenter un tel composant par un quadripôle thermique, muni de deux bornes d'entrée et de deux bornes de sortie. Les démarches de la méthode ISO 13786 s'appuie au formalisme des quadripôles thermiques. Alors, le composant peut être modélisé par l'association d'impédances complexes dont les grandeurs à l'entrée et à la sortie, la température et le flux de chaleur, regroupent les sollicitations thermiques périodiques qui agissent sur ses surfaces limites. Une représentation en quadripôle thermique équivalent en π est montrée sur la figure 15 suivante :

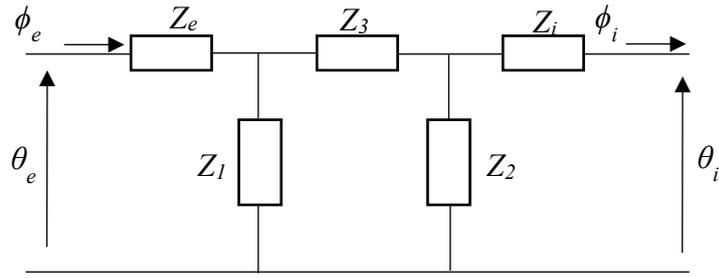


Figure 15 : Quadripôle thermique équivalent sous forme de réseau.

II.3.3.5 - Matrice de transfert de chaleur

Dans le formalisme du quadripôle thermique, les amplitudes complexes de la température et du flux thermique d'un composant de bâtiment sont liées par une matrice de transfert de chaleur complexe Z . Elle relie l'amplitude complexe de la température et du flux thermique du côté extérieur à l'amplitude complexe de la température et le flux thermique de l'autre côté. *Mazzeo D. et al.* [42] affirment que la formulation en termes matriciels d'échange thermique entre l'environnement intérieur et extérieur présente l'avantage évident de créer des relations pour les calculs. Les termes dépendent du matériau (ses propriétés thermophysiques) et de l'épaisseur de chaque couche d'élément ; ainsi que des conditions aux limites sur les deux faces limites externe et interne [89] :

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}_e \\ \hat{\phi}_e \end{pmatrix} = (z) \begin{pmatrix} \hat{\theta}_i \\ \hat{\phi}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{ii} & Z_{ie} \\ Z_{ei} & Z_{ee} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\theta}_i \\ \hat{\phi}_i \end{pmatrix} \quad (\text{II-38})$$

La matrice de transfert de chaleur Z est le produit de la matrice de transfert des couches limites externe et interne avec la matrice de transfert de la couche homogène constitutif du composant. Le produit des matrices de transfert de chaleur se fait, conventionnellement, à partir de la couche la plus interne. On l'appelle aussi matrice de transfert de chaleur de surface en surface. On a donc, pour un composant monocouche, la matrice de transfert de chaleur Z :

$$\begin{pmatrix} Z_{ii} & Z_{ie} \\ Z_{ei} & Z_{ee} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/h_e \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1/h_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II-39})$$

Pour un composant multicouche, sa matrice de transfert de chaleur est le produit de la matrice de transfert de chaleur de chaque couche de l'intérieur vers l'extérieur en tenant compte des couches extrêmes interne et externe. On a donc :

$$\begin{pmatrix} Z_{ii} & Z_{ie} \\ Z_{ei} & Z_{ee} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/h_e \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_e \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix}_n \times \dots \times \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 1 & -1/h_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_i \quad (\text{II-40})$$

Les éléments de la matrice de transfert de chaleur de chaque couche sont obtenus par l'utilisation de la représentation matricielle impédance comme en électricité. Ils sont fonction de la profondeur de pénétration périodique δ et de l'épaisseur d de la couche ; et donnés par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi) \\ Z_{12} = -\frac{\delta}{2\lambda_{\text{éq}}} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi)] \} \\ Z_{21} = -\frac{\lambda_{\text{éq}}}{\delta} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi)] \} \end{cases} \quad (\text{II-41})$$

$$\text{Où} \quad \xi = \frac{d}{\delta} \quad \text{et} \quad \delta = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{éq}} P}{\pi \rho C_p}} \quad (\text{II-42})$$

Les matrices de transfert de chaleur des couches limites extérieure et intérieure

$$\begin{pmatrix} 1 & -1/h_e \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} 1 & -1/h_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

sont obtenus par l'utilisation de la représentation matricielle de chaîne comme en électricité.

h_i et h_e sont données par les expressions suivante :

$$h_i = h_{ci} + h_{ri} \quad \text{et} \quad h_e = h_{ce} + h_{re} \quad (\text{II-43})$$

h_{ci} est généralement de valeur constante, dépendant de la direction du flux de chaleur. La norme ISO 6946 [84] propose les valeurs égales à 0,7 – 2,5 et 5 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les flux de chaleur respectivement vers le bas, horizontaux et vers le haut.

h_{ce} est donné par la superposition des phénomènes de convection libre et les effets du vent, de sorte qu'il dépend fortement de la vitesse du vent. La norme ISO 6946 [84] a également proposé une formule pour l'estimer :

$$h_{ce} = 4 + 4V_{\text{wind}} \quad (\text{II-44})$$

Les coefficients de transfert par rayonnement sont donnés par les formules suivantes [96] :

$$h_{ri} = \varepsilon_i \sigma_0 T_{mi}^3 \quad \text{et} \quad h_{re} = \varepsilon_e \sigma_0 T_{me}^3 \quad (\text{II-45})$$

Les émittances thermiques des surfaces intérieure et extérieure peuvent être mesurés par des méthodes standard comme ASTM C 1371 [104] ou EN 15976 [105]. Mais dans la construction, il est courant de les prendre égal à 0,9 pour les éléments non métalliques et revêtus [93]. Il est également courant de prendre la moyenne des températures de surface égale à la température de consigne pour calculer h_{ri} et h_{re} [93].

II.3.3.6 - Les caractéristiques thermiques dynamiques du composant

Après les calculs des éléments de la matrice de transfert de chaleur Z du composant, les caractéristiques relatives à son comportement thermique dynamique peuvent être déterminées.

Dans la norme internationale ISO 13786, elles sont groupées en deux catégories :

- Les admittances thermiques :

Elles relient le flux thermique complexe aux variations de température complexe du même côté du composant. Leurs modules représentent l'amplitude de la densité de flux de chaleur d'un côté résultant d'une amplitude de température unitaire du même côté, lorsque la température de l'autre côté est maintenue constante. Elles sont données par les relations suivantes, pour le côté intérieur et extérieur :

$$Y_{ii} = -\frac{Z_{ii}}{Z_{ie}} \quad \text{et} \quad Y_{ee} = -\frac{Z_{ee}}{Z_{ie}} \quad (\text{II-46})$$

- Les propriétés dynamiques de transfert thermique :

Elles relient les grandeurs physiques d'une face d'un composant à l'autre face.

i. La transmittance thermique périodique Y_{ie} : elle représente l'amplitude complexe de la densité de flux de chaleur à travers la surface du composant adjacent à la zone interne, divisé par l'amplitude complexe de la température dans la zone externe lorsque la température dans la zone interne est maintenue constante. Son module est une représentation du cycle de flux de chaleur produit à la surface interne par les oscillations de température du côté extérieure.

$$Y_{ie} = -\frac{\hat{q}_i}{\hat{\theta}_e} = -\frac{1}{Z_{ie}} \quad (\text{II-47})$$

ii. Le déphasage de la transmittance thermique périodique Δt_f : il est lié à l'argument de Z_{ie} évalué dans la plage de -2π à 0 selon la relation :

$$\Delta t_f = \frac{P}{2\pi} \arg(Z_{ie}) \quad (\text{II-48})$$

Il représente le décalage temporel ou retard thermique avec lequel un cycle de température du côté extérieur atteint le côté interne tout en traversant le composant.

iii. Le facteur d'amortissement f : il est égal au rapport du module de Y_{ie} et de la transmittance thermique en régime permanent U .

$$f = \frac{|Y_{ie}|}{U} \quad (\text{II-49})$$

Où U est calculé conformément à la norme ISO 6946 [84] sans tenir compte des ponts thermiques pour la cohérence avec le calcul des caractéristiques thermiques dynamiques selon ISO 13786. Ce facteur représente la quantité de chaleur produit à la surface interne par une oscillation de température du côté extérieur.

iv. Les capacités thermiques surfaciques K_m : elles traduisent la capacité de la surface considérée à absorber, stocker et déstocker la chaleur. Nous avons deux capacités thermiques surfaciques des zones internes K_1 et externes K_2 du composant :

$$K_1 = \frac{1}{\omega} \left| \frac{Z_{ii} - 1}{Z_{ie}} \right| = \frac{P}{2\pi} \left| \frac{Z_{ii} - 1}{Z_{ie}} \right| \quad \text{et} \quad K_2 = \frac{1}{\omega} \left| \frac{Z_{ee} - 1}{Z_{ie}} \right| = \frac{P}{2\pi} \left| \frac{Z_{ee} - 1}{Z_{ie}} \right| \quad (\text{II-50})$$

Les travaux de *Di Perna et al.* [106] montre que plus les valeurs de ces grandeurs sont élevées, plus la paroi présente une forte inertie.

La définition des caractéristiques thermiques dynamiques précédente et les formules pour leurs calculs sont valables pour toute période de la variation. En effet, les valeurs des caractéristiques thermiques dynamiques dépendent de la période considérée. Si plus d'une période est considérée, un suffixe supplémentaire doit être ajouté à toutes les quantités affectées afin de distinguer les valeurs pour différentes périodes.

II.3.3.7 - Données requises relatives à un composant

Les données requises pour lancer tous les calculs sont :

- Les dessins détaillés du produit, avec leurs dimensions ;
- Pour chaque matériau utilisé dans le produit : la conductivité thermique λ , la chaleur spécifique C_p , la masse volumique ρ .

II.3.3.8 - Procédures de calcul

Les procédures suivantes s'appliquent aux composants de bâtiment constitués de couches planes homogènes. Les ponts thermiques présents dans un tel composant n'affectent pas considérablement les caractéristiques thermiques dynamiques et peuvent être négligés :

- Identifier les matériaux constituant les couches du composant, leurs épaisseurs (de chaque couche) et déterminer les caractéristiques thermophysiques $\lambda_{\acute{e}q}$, ρ et C_p .
- Spécifier la période de variation à la surface.

- Calculer la profondeur de pénétration des matériaux pour chaque couche.
- Déterminer les éléments de la matrice de transfert de chaleur de chaque couche.
- Multiplier les matrices de transfert de chaleur des couches du composant, y compris celles des couches limites dans l'ordre correct pour obtenir la matrice de transfert de chaleur du composant.
- Calculer les caractéristiques relatives au comportement thermique dynamique du composant (données par leur module et argument).
- Faire un rapport de calcul et interpréter les résultats.

L'algorithme de calcul est présenté sur la figure 16 ci-dessous :

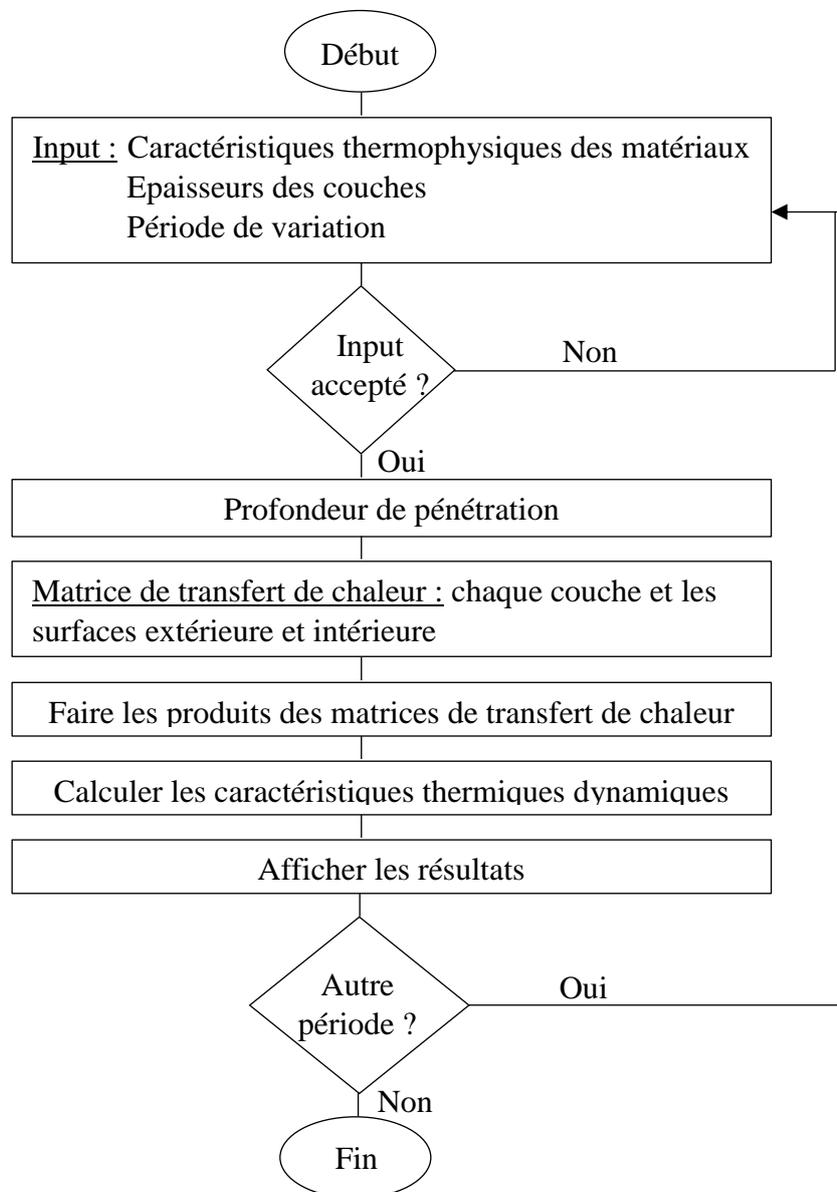


Figure 16 : Organigramme de la méthode de calcul selon ISO 13786.

II.3.3.9 - Rapport de calcul

Selon ISO 13786, le rapport de calcul doit inclure les éléments suivants :

- Une description du composant ou l'élément du bâtiment, son utilisation et énumération des zones en contact avec celui-ci.
- Une description de la partie homogène avec leurs dimensions, identification des matériaux ainsi que leurs caractéristiques thermophysiques.
- Une liste des couches commençant par le côté 1 ; pour les composants enveloppes du bâtiment, le côté 1 doit être celui de la couche la plus interne.
- La surface du composant.
- La période de variation choisie. Il faut afficher clairement les résultats fournis pour chaque période si le calcul est effectué sur plusieurs périodes.
- Les 4 éléments de la matrice de transfert de chaleur Z données par leurs modules et arguments.
- Les 7 caractéristiques relatives au comportement thermique dynamique du composant.
- La transmittance thermique U utilisée pour le calcul du facteur d'amortissement. Il faut indiquer clairement que la transmittance thermique n'inclut pas les ponts thermiques et ne convient pas au calcul du transfert de chaleur en régime permanent.

II.3.4 - Les méthodes numériques

Lorsqu'une géométrie ou des conditions aux limites sont trop complexes, les calculs trop longs, on a souvent recours aux méthodes numériques. Elles sont utilisées pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles (EDP) qui représentent analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques. Les plus couramment utilisées forment trois grandes familles :

- La méthode des différences finies,
- La méthode des éléments finis,
- La méthode des volumes finis,

II.3.4.1 - Principes généraux des méthodes numériques

L'utilisation de l'une des trois méthodes numériques en vue de la solution d'un problème de transfert de chaleur requiert quatre étapes :

- Mise en équations du problème posé qui consiste à exprimer en termes mathématiques un problème posé en termes physiques.

- Discrétisation du domaine et des équations qui consiste à transformer les équations du modèle en valeurs nodales ou équations discrétisées.
- La résolution des équations discrétisées par les méthodes du calcul numérique.
- L'analyse des résultats c'est-à-dire d'évaluer sa cohérence et sa précision.

II.3.4.2 - Simulations numériques du problème

La résolution numérique d'un problème physique nécessite toujours l'utilisation d'au moins un logiciel de simulation. Les modèles numériques obtenus après la mise en équation du problème à traiter sont insérés dans le logiciel de simulation formant ensuite les codes de simulations. De nombreuses études ont été réalisées par un très grand nombre d'institutions, donnant lieu à l'apparition de centaines de logiciels de simulation thermique des bâtiments. Une liste exhaustive des outils peut être trouvée sur le site internet du « Department Of Energy » des Etats-Unis [107]. Parmi ces derniers, un nombre restreint d'outils permettent de calculer l'évolution de la température dans de multiples zones du bâtiment et d'évaluer les besoins thermiques au cours d'une année type. Un état de l'art significatif portant sur une vingtaine d'outils a été réalisé en 2008 [108].

La simulation numérique consiste à implémenter les codes de simulations et d'analyser les résultats de simulations. Les codes peuvent être améliorés suivant les approches et les hypothèses retenues afin de trouver une solution approximative très proche de la solution exacte du problème.

Les simulations numériques des problèmes thermiques de l'habitat sont devenues des outils fortement recommandés dans les pays avancés afin de prédire les comportements de ce dernier et d'évaluer leurs performances énergétiques. Elles ont fait l'objet de nombreuses études. *Pernigotto G. et al.* [109] ont développé et calibré un modèle numérique dans le logiciel *ANSYS Fluent* pour étudier le comportement thermique dynamique d'une paroi en bois monocouche lors d'un essai dynamique avec l'appareil boîte chaude modifié de l'Université libre de Bozen-Bolzano pour l'évaluation expérimentale des paramètres dynamiques décrit par la norme ISO 13786. Le modèle numérique a permis d'étudier différentes conditions aux limites pour évaluer la sensibilité des résultats aux différentes conditions aux limites, dans le but d'affiner la procédure expérimentale. *Roberto B. et al.* [110] ont évalué les besoins en énergie d'un bâtiment dans le sud de l'Italie avec les conditions climatiques réelles par un code de simulation dynamique dans *Design Builder* en fonction de différentes variables comme les surfaces vitrées, le contrôle du rayonnement solaire absorbé et l'exploitation de la surventilation nocturne. Ils ont examiné les performances thermiques d'une enveloppe innovante du bâtiment, construite

avec la technologie d'assemblage à sec. Par la suite, le développement du code de simulation a conduit en une configuration optimale de l'enveloppe du bâtiment pour optimiser les consommations d'énergie de ce dernier. Une étude numérique du comportement thermique d'une paroi composite PCM/béton a été développée par *Faraji M.* [111] pour étudier l'impact du PCM incorporé sur la variation de la température interne d'une serre au sud de la France. Le but étant d'étudier la possibilité de remplacer les parois extérieures épaisses et lourdes d'une serre utilisée dans les pays méditerranéens par des parois minces en masse thermique tout en maintenant des niveaux de confort similaires tout au long de l'année. La méthode de volume fini a été utilisée pour discrétiser les systèmes d'équations qui gouvernent l'ensemble du problème. Il a montré que les variations de la température interne diminuent de manière remarquable dans le mur avec le PCM. Une étude de la réponse dynamique de transfert thermique d'une nouvelle structure d'enveloppe a été réalisée par *Li Zhu et al.* [112], à Tianjin, en Chine. Un modèle numérique complet est présenté et validé pour simuler le comportement de transfert de chaleur dynamique de l'enveloppe, à interface PCM encastré dans un tuyau, au cours d'une journée typique de la saison chaude. Le modèle leur a permis d'étudier et d'analyser simultanément les influences de l'espacement des tuyaux, l'épaisseur de la couche de PCM et l'influence de l'orientation des bâtiments sur le comportement thermique de l'enveloppe. Leurs résultats ont montré que la charge calorifique pouvait être réduite de manière significative lors de l'adoption de l'enveloppe de bâtiment en PCM encastré dans un tuyau.

Durant notre recherche bibliographique, on a constaté que les méthodes de résolution numérique des problèmes thermiques de l'enveloppe de bâtiment sont très nombreuses. Elles ont toutes le même objectif de développer des modèles numériques permettant de décrire le comportement thermique des éléments ou du bâtiment entier en fonction de leurs besoins spécifiques, afin d'introduire de nouvelles stratégies de conception. Elles ont permis d'étudier plusieurs cas complexes avec des conditions climatiques réelles ; et facilitent une étude paramétrique très large pour un temps suffisamment court. Comme les travaux de *Rodriguez M. et al.* [113], de *Gianpiero E. et al.* [114], de *Mahdi A. et al.* [115] ou encore celle de *Haomin W. et al.* [116].

II.3.5 - Les méthodes expérimentales

II.3.5.1 - Généralités

Les méthodes expérimentales sont des techniques qui permettent d'analyser sur place le transfert dynamique de la chaleur d'éléments de parois ou de parois complètes de bâtiments. *Pernigotto G. et al.* [109] ont même confirmé dans leurs travaux qu'elles peuvent constituer

l'approche la plus efficace pour caractériser le comportement thermique dynamique, quantifiable à l'aide de paramètres simples, tels que le coefficient de transmission thermique périodique, le retard thermique et l'amortissement définis par la norme ISO 13786 lorsque des températures sinusoïdales sont présentes et appliquées, respectivement, sur le côté interne et externe du mur.

L'étude pratique de tels éléments ou parois peut se dérouler suivant deux échelles distinctes :

- Mesure en laboratoire ou classique (conditions contrôlées) : sur un échantillon de petite dimension ou sur des éléments d'enveloppe complets (1 à 3m²), à partir de sollicitations déterministes ou contrôlées.
- Mesure in situ (conditions réelles) : sur des échantillons (cellules de mesure) ou sur des bâtiments réels, afin d'étudier leur comportement thermique en fonction du microclimat environnant. La difficulté ici est de trouver une instrumentation et un traitement des données adaptées au suivi dans le temps de l'évolution des grandeurs thermiques.

II.3.5.2 - Méthodes d'approche lors de la démarche expérimentale

Compte tenu de la constitution d'un tel système (hétérogène, multiphasiques, poreux, ...), l'étude peut être abordée de deux manières complémentaires [117].

II.3.5.2.1 - Démarche microscopique ou "interne"

On peut étudier finement les processus physiques mis en œuvre et tenter d'établir des couplages entre phénomènes. Cette démarche devient rapidement très lourde et complexe. En pratique, elle s'appuie quelquefois sur des approches analytiques pures mais aboutit plus généralement à des modélisations numériques directes basées sur une discrétisation dans le temps et dans l'espace. Les résultats obtenus à chaque nœud du maillage sont souvent surabondants vis-à-vis du problème posé.

II.3.5.2.2 - Démarche de la boîte noire

Dans cette approche dite « *boîte noire* », l'étude consiste à utiliser une approche globale et systémique. Dans ce cas, on ne s'intéresse plus au détail des transformations internes de la paroi mais on se borne simplement à établir des relations entrée-sortie. Le système étudié est caractérisé par ses fonctions de réponse (fonction de transfert, réponse impulsionnelle, impédance, ...). Dans ces fonctions, le milieu est caractérisé par des paramètres globaux ou apparents. Les configurations géométriques les plus souvent rencontrées visent à l'établissement des régimes de transfert unidirectionnels que ce soit en coordonnées cartésiennes (cas du mur), en coordonnées cylindriques ou plus rarement en coordonnées sphériques.

II.3.5.3 - Grandeurs mesurées expérimentalement

D'un point de vue expérimental, la méthode nécessite de pouvoir mesurer le flux et la température simultanément dans le même plan. Cette procédure est particulièrement intéressante en pratique, car elle permet notamment de ne pas avoir à faire d'hypothèse sur les conditions limites d'entrée et permet naturellement d'accéder à la détermination de l'impédance thermique du système. L'utilisation des capteurs de température et de fluxmètres à gradients tangentiels est conseillée. L'intérêt majeur de ceux-ci réside dans la faible perturbation qu'ils induisent sur la mesure. Toutefois, il faut remarquer à ce niveau que les thermiciens, par habitude ou tradition, considère très généralement que la seule grandeur accessible expérimentalement est la température. Quand la mesure du flux est effectuée, c'est souvent dans un simple objectif de vérification quelquefois purement qualitative.

Les mesures simultanées ou non de ces deux grandeurs nous permettent d'avoir accès aux grandeurs thermiques apparentes d'une paroi de bâtiment en grandeur réelle (conductivité thermique, diffusivité thermique, effusivité thermique), et d'étudier le phénomène particulier du déphasage et de l'amortissement d'une sollicitation. Ces deux derniers sont souvent estimés ou évalués mais rarement déterminés à partir de mesures réelles.

II.3.5.4 - Les méthodes de caractérisation thermique d'une paroi de bâtiment

Comme nous avons déjà présenté dans le paragraphe précédent, les parois de bâtiments peuvent être étudiées selon deux configurations : en conditions contrôlées de laboratoire ou en conditions in situ. *Tingting WU [117]* explique dans son travail que la première configuration permet de maîtriser les sollicitations, ce qui autorise généralement à avoir recours à des méthodes de traitement des données simplifiées dépendantes des conditions initiales, de l'historique thermique de la paroi et des conditions aux limites. La seconde configuration est plus complexe et présente un certain nombre de difficultés. Celles-ci sont liées à la fiabilité, la précision et la résistance de l'instrumentation face aux conditions microclimatiques de l'environnement extérieur. Un investissement important doit être fait pour s'assurer de la qualité des données récoltées qui seront utilisées par la suite. Ces dernières ont un caractère aléatoire qui nécessite des traitements adaptés. C'est pourquoi *Giorgio et al. [118]* ont confirmé qu'il existe peu d'exemples d'analyses expérimentales et de procédures permettant de déterminer les performances des matériaux et des composants de bâtiment dans des conditions climatiques réelles.

II.3.5.4.1 - Les méthodes en laboratoire : paroi en conditions contrôlées

La plupart des méthodes de caractérisation des matériaux basées sur les transferts thermiques se limitent aux expérimentations de laboratoire. Ceci est dû à la particularité des techniques d'imposition des sollicitations thermiques aux systèmes. L'avantage réside dans la parfaite maîtrise des conditions expérimentales d'un point de vue thermique et la possibilité d'identifier plusieurs paramètres. En effet, on peut contrôler les conditions aux limites de mesure dans ces méthodes. Elles peuvent être établies en régime permanent qui sont indépendantes du temps ; et aussi en régime variable qui sont fonction du temps et peuvent permettre l'identification de plusieurs paramètres. Par contre, la lourdeur des mesures en laboratoire réduit la possibilité de les adapter aux contraintes in situ. Cependant, cette technique peut être rapprochée aux conditions in situ, sans le paramètre aléatoire, pour étudier la réponse dynamique au transfert thermique d'une paroi à une échelle réduite. Les volumes vont du caisson (1m³ environ) à des cellules partagées d'une dizaine de mètres cubes. Les procédures expérimentales sont généralement basées sur la méthode de la boîte chaude gardée prescrite dans la norme EN 1934 en 1998 [109] [117]. Cette dernière permet d'étudier des éléments ou parois de quelques m² de surface.

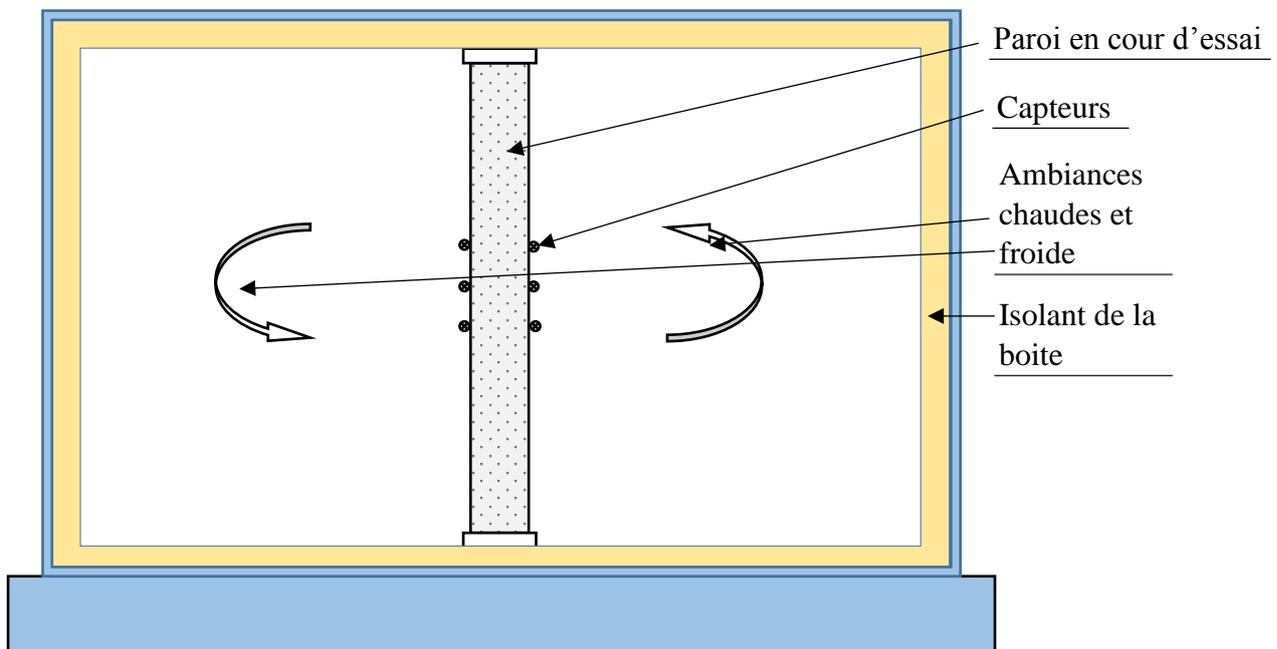


Figure 17 : Coupe verticale de la boîte chaude gardée de la norme EN 1934 (en 1998).

Cette boîte est composée de deux caissons formant les ambiances interne et externe de la paroi à tester. L'enveloppe de la boîte est couverte d'un matériau isolant (polyuréthane, polystyrène, stirodure, ...). Dans chaque caisson, un écran noir (épaisseur : 1,5 cm) devrait être installé pour

réduire l'échange de chaleur par rayonnement entre l'échantillon et les parois de la boîte. Chaque boîtier est équipé d'une unité de refroidissement (un évaporateur) et d'une unité de chauffage (une résistance électrique), commandée par une unité de contrôle PID avec une précision de $\pm 0,1$ K en régime établi pour créer les deux ambiances. De plus, un ventilateur horizontal contrôlé devrait être placé au fond de chaque caisson afin de réduire la stratification verticale de la température de l'air. Lors des essais en régime permanent, les deux chambres sont maintenues à une température constante. Pour les tests dynamiques, une seule chambre est utilisée pour maintenir les conditions d'état stable d'un côté de l'échantillon. Les types de parois étudiées représentent des surfaces pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres carrés. L'intérêt de cette approche est de pouvoir observer des systèmes constructifs complets en tenant compte de leur hétérogénéité : parties solides, joints, lames d'air, alvéoles, ... [117]. De nombreuses études ont été réalisées sur ce principe, les évolutions portent généralement sur le caractère évolutif des sollicitations imposées et le couplage du transfert de masse au transfert thermique. Dans ce cadre on peut citer les travaux de recherche de *Sala* [119] et de *Martín* [120] qui concernent à l'évaluation du comportement thermique dynamique des murs au moyen des essais expérimentaux au laboratoire. Les résultats obtenus ont été analysés et validés par des simulations numériques. Dans les travaux de *Pernigotto* [109] [121] et de *Giorgio* [118] qui sont exactement inspirés des techniques de la boîte chaude gardée de la norme EN 1934, ils ont mesuré avec succès les caractéristiques dynamiques d'un composant de bâtiment dans un régime périodique établi. *Pernigotto et al* ont construit une boîte chaude gardée modifiée, de dimension (1,1*1,7*1,7m), pour mesurer les caractéristiques dynamiques d'une structure en bois monocouche. Lors de ses tests, ils ont maintenu constante la température d'une face de l'échantillon et a imposé une température périodique forcée sur l'autre face par une bobine électrique chauffante. Un fluxmètre et des thermocouples de type T sont positionnés sur les faces de l'échantillon. Un multimètre numérique a enregistré le signal de sortie de tension des thermocouples et du fluxmètre toutes les 60 secondes afin de mieux caractériser la réponse dynamique de l'échantillon. L'algorithme FFT a été mis en œuvre pour calculer chaque jour les 720 premiers harmoniques de températures expérimentales et de flux thermiques enregistrés. Avec le premier terme de l'approximation de Fourier, le coefficient de transmission thermique périodique et le déphasage thermique définis par la norme ISO 13786 sont calculés. Un modèle numérique avec ANSYS Fluent® est développé et calibré par l'auteur pour affiner la procédure expérimentale.

Deux méthodes différentes sont proposées par *Giorgio et al* [118] :

- Un système de boîte chaude (figure 18) où des sollicitations sinusoïdales d'une période d'un jour en termes de température et de flux de chaleur sont imposées,
- Le système est soumis à un autre type de condition aux limites, avec une force motrice thermique impulsive plus rapide.

Le premier a montré un bon accord avec les résultats théoriques attendus. La deuxième méthode s'est également révélée appropriée, mais a subi une précision moindre, elle-même caractérisée par une réduction significative du temps de mesure.

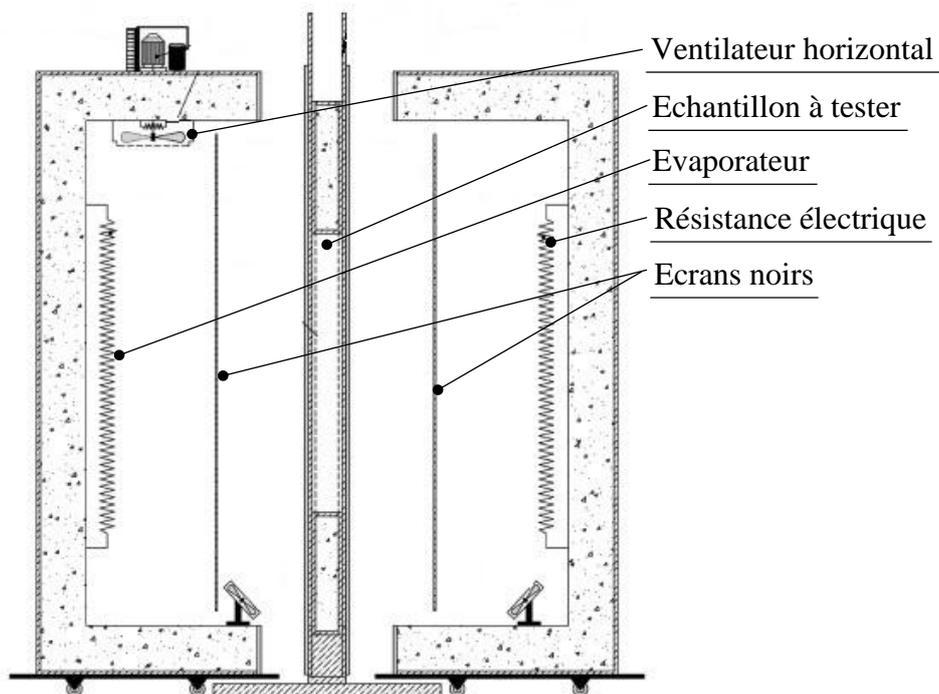


Figure 18 : Un système de boîte chaude gardée utilisé par Giorgio et al. [118].

II.3.5.4.2 - Les mesures in situ

L'étude du comportement thermique de parois de bâtiments in situ présente un certain nombre de difficultés, c'est pourquoi elle est beaucoup moins répandue. Tout d'abord le caractère aléatoire des sollicitations extérieure et intérieure rend complexe l'analyse qui peut en être faite. En effet on ne maîtrise pas souvent les conditions aux limites, ni l'historique des transferts de chaleur au sein de la paroi étudiée. Ensuite il faut mettre en place une instrumentation appropriée qui résiste aux conditions climatiques réelles. Il est intéressant de pouvoir suivre le comportement d'un mur sur une période longue pour étudier l'évolution de ses caractéristiques thermiques. La fiabilité dans le temps et la résistance aux intempéries font partie des qualités nécessaires à un protocole d'instrumentation. Il faut également mettre en place des procédures de traitement compatibles avec les données recueillies et les systèmes étudiés. Dans ce cas, il

existe deux approches possibles. La première consiste à coupler les mesures réalisées sur le bâtiment à un code de calcul de type différences finies ou éléments finis. Comme dans les travaux de *Cucumo* [122], de *Peng* [123] ou de *Cabeza* [126]. La deuxième se limite seulement à la lecture des données brutes de flux et de températures pour analyser le comportement de la paroi. Comme les travaux de *Said M. et al* [124], ou celles de *Tingting WU* [117].

Les mesures in situ peuvent se dérouler en deux techniques. L'une consiste en une mesure qui se place à mi-chemin entre conditions contrôlées et conditions in situ. La paroi est donc soumise en conditions contrôlées sur l'une de ses faces (souvent à l'intérieur d'une boîte) et en conditions in situ sur l'autre face (à l'extérieur de la paroi à tester). La deuxième technique consiste à mesurer directement sur l'enveloppe du bâtiment ou d'une cellule représentative du bâtiment dans des conditions microclimatiques réelles.

Les travaux de *Cucumo* [122] proposent une méthode basée sur la première technique. Elle s'apparente à une boîte chaude gardée placée à l'extérieur de dimensions 4m x 4m x 3m, équipée d'une climatisation réversible, fortement isolée sur trois de ses faces latérales et conservant une face verticale pour le mur à tester. La face extérieure du mur est soumise aux perturbations thermiques extérieures. La structure est positionnée sur une table tournante qui permet d'optimiser l'orientation de la paroi en fonction de l'ensoleillement. Les mesures de flux se font à l'intérieur, les mesures de température se font à l'intérieur et à l'extérieur. Elles permettent de retrouver les caractéristiques thermiques dynamiques par minimisation des écarts entre le modèle et les mesures effectuées. Une autre est présentée par *Francesco G.* [125]. Dans ces travaux, un laboratoire de cellules de test dénommé ZEB est proposé. Ce laboratoire est constitué de deux cellules de test identiques et totalement indépendantes (figure 19). Chaque cellule de test présente une surface de son enveloppe sur laquelle l'échantillon est placé. La surface de l'échantillon de la façade a une dimension interne (L x H) de 2,4 m x 3,3 m et est exposée aux conditions aux limites extérieures, tandis que les autres surfaces sont entourées d'un volume gardé avec conditions contrôlées. L'énergie thermique nécessaire au contrôle de la température interne des deux cellules de test et des deux volumes environnants est gérée par quatre équipements de chauffage et de refroidissement indépendants, installés dans les deux volumes de contrôle (figure 19). Des thermocouples de type T sont utilisés pour surveiller le gradient de température entre les deux surfaces de l'échantillon. La raison d'utiliser deux cellules indépendantes, avec deux volumes gardés au lieu d'un seul volume environnant, est de permettre une plus grande flexibilité pour les activités expérimentales à effectuer avec le banc d'essai. Par exemple, cette configuration permet de réaliser des tests parallèles de la même

technologie/du même matériel d'enveloppe de bâtiment avec différents points de consigne de température d'air intérieur, calendriers d'occupation ou opérations. En raison de la fonction de volume gardé, non seulement des tests comparatifs sont possibles, mais également des tests absolus (calorimétriques) peuvent être effectués simultanément sur les deux cellules de test (c'est-à-dire que deux systèmes différents peuvent être testés avec des conditions aux limites différentes). Les travaux de *Cabeza* [126] présentent un gros investissement expérimental de réalisation in situ de cellules climatisées et d'instrumentation pour tester différents types de parois isolantes. L'analyse se limite aux consommations relevées dans chacune des cellules à l'aide de compteurs et à une évaluation de la transmittance du mur à partir d'une formulation en régime permanent, inadaptée aux conditions de transfert.

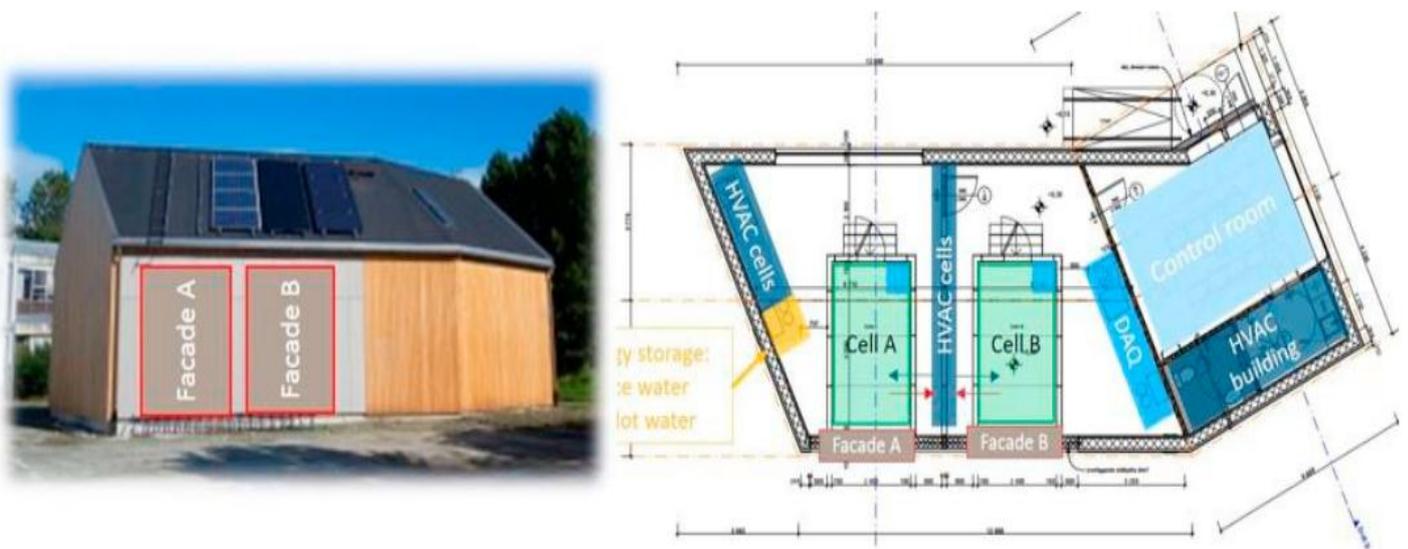


Figure 19 : Laboratoire de cellules de test « ZEB » de Francesco G. et al. [125].

Pour étudier les caractéristiques thermiques dynamiques des briques d'argile cuite, *Fayçal et al* [97] ont procédé à la deuxième technique. Ils ont conçu et construit un bâtiment démonstratif avec des briques fabriquées par la Briqueterie du Nord en France (figure 20). Les mesures de flux et températures sont réalisées sur le bâtiment démonstratif construit. Des capteurs de température et des fluxmètres ont été installés sur les murs afin de caractériser le comportement thermique de briques en terre cuite dans des conditions réelles et d'étudier le confort thermique intérieur. Les capteurs de température sont installés à la fois dans la majeure partie du mur et sur ses surfaces. Deux fluxmètres sont placés de chaque côté du mur (figure 20). Les analyses de la variation des températures intérieure et extérieure des parois ont conduit à la détermination

du déphasage thermique et du facteur d'amortissement qui décrivent l'inertie thermique des parois en brique.



Figure 20 : Exemple de caractérisation in situ par Fayçal [97] : (a) Bâtiment démonstratif ; (b) positionnement des thermocouples ; (c) positionnement du fluxmètre.

Pour *Tingting WU* [117], dans sa thèse de Doctorat, il a procédé à des essais relatifs aux mesures in situ sur des parois réelles d'une maison individuelle (figure 21) suivant la deuxième technique. Des thermocouples et des fluxmètres sont utilisés pour assurer une mesure du flux et de la température dans le même plan. Des sondes de température (type résistance de platine PT100) sont utilisées pour mesurer la température d'air à proximité de la paroi. Les capteurs de température et flux de chaleur sont fixés à la paroi à l'aide d'un film de colle époxy déposé uniformément en surface. L'auteur a effectué trois sortes de mesure dont les températures de surfaces interne et externe, le bilan fluxmétrique en surfaces intérieure et extérieure de paroi et les températures d'air intérieure et extérieure. Leurs essais ont duré pendant un an et l'étude de

l'évolution de température en fonction de la fondamentale jour/nuit (période de 24 heures) a permis de calculer les déphasages moyens de chaque mois pendant une durée d'un an. L'objectif de *Tingting WU* est de proposer une méthode de caractérisation thermique in situ d'une paroi de bâtiment en complément des mesures de laboratoire de référence. Il confirme que les instrumentations proposées, basée sur l'utilisation des fluxmètres thermiques, est fiable et adaptée aux conditions réelles extérieures. Et que les résultats sont logiques et mettent en évidence un comportement évolutif lié à la porosité du matériau constitutif de la paroi soumis à l'environnement naturel.



Figure 21 : Mesures in situ effectuées par *Tingting WU* [117].

En général, les mesures in situ sont généralement basées sur l'utilisation de capteurs de température et de fluxmètres de part et d'autre des surfaces de la paroi. L'étude de l'évolution des températures et flux de chaleur superficielles permettent d'analyser la réponse thermique dynamique d'un élément ou d'une paroi tout entière. Cependant, l'analyse du transfert de chaleur à travers la paroi n'est pas facile mais nécessite la maîtrise des techniques de mesures et la mise en place des instrumentations au position adéquate. Et il faut toujours tenir compte de la période de mesure qui influe les résultats obtenus.

Différents tests sont proposés par d'autres chercheurs comme celles de *Peng* [123] effectué sur un bâtiment existant de type logement. Les deux faces des parois sont instrumentées de façon identique, c'est à dire plusieurs fluxmètres et plusieurs dizaines de thermocouples en surfaces intérieures et extérieures. L'approche expérimentale est intéressante mais le traitement des données est décevant puisque principalement basé sur la méthode des moyennes. *Marincic et al* [127] ont analysé une maison expérimentale et démonstrative construite sur le campus de l'Université de Sonora, Mexico. Le mur de la maison est constitué de blocs de béton cellulaire et de blocs de terre stabilisés. Des capteurs de températures sont situés sur les côtés interne et externe du mur, sur les deux matériaux. L'étude est réalisée en mesurant les températures superficielles, en utilisant deux méthodes : les mesures par contact avec des capteurs continus et les images infrarouges instantanées captés par une caméra « Fluke Ti25 ». La détermination du déphasage et du facteur d'amortissement est basée par une simple analyse des températures superficielles obtenues à l'intérieure et à l'extérieure.

CONCLUSION

Cette partie est consacrée en une présentation des théories liées à la caractérisation du comportement thermique dynamique d'un élément ou d'une paroi soumise aux conditions aux limites périodiques sur l'une ou sur ses deux faces. Tout d'abord, on a présenté l'aspect dynamique du transfert de chaleur à travers une paroi en montrant l'intérêt majeur d'une étude du comportement thermique d'une telle paroi. Il nous a permis d'entamer le concept d'inertie thermique, une caractéristique thermique importante lors d'une étude dynamique du transfert de chaleur sur un composant de bâtiment soumis à une variation cyclique de température et de flux de chaleur. Après, les méthodes de caractérisation sont citées et développées. On a vu que l'analyse de la réponse dynamique au transfert thermique d'un mur de bâtiment peut être mener par une étude théorique (modèle du solide semi-infini, démarches ISO 13786). Ou par des simulations numériques en développant des codes de simulation relatives à chaque scénario. Cette technique est avantageuse de la faite qu'elle permet de mener plusieurs études même avec des géométries et des conditions les plus complexes. Mais les résultats restent toujours à des solutions approximatives. Et enfin par des méthodes pratiques (en laboratoire ou in situ) à l'aide des mesures expérimentales des températures et flux thermique sur les surfaces d'un composant ou d'une paroi. Cette technique nous permet d'avoir des résultats pratiques et réels. Cependant, cette méthode est toujours difficile à exécuter à cause de la nécessité des instrumentations fiables et résistant aux conditions climatiques extérieures (lors des mesure in situ) ; mais aussi sur la maîtrise des techniques de mesure.

CHAPITRE III - TYPOLOGIES DES MURS ET HABITAT-TYPES A MADAGASCAR

INTRODUCTION

Le but de notre étude est d'étudier et évaluer le comportement thermique dynamique des enveloppes extérieures des bâtiments malgaches, alors cette partie se concentre en une présentation des différents types de murs identifiés dans les constructions à Madagascar. L'identification a été dictée par l'analyse de l'existant. L'analyse se porte sur des constructions typiques du pays qui nous ramène à identifier les types de bâtiments et les matériaux de construction utilisés surtout pour les parois verticales extérieures. Pour cela, l'enquête effectuée par l'INSTAT en 2010 a retenu les différents types de bâtiments ainsi que les matériaux de construction facilement identifiables utilisés [128]. *Andrianiaina H.* [129] dit que le type de bâtiment est en étroite relation avec les modes de vie de la population ainsi que le site d'implantation, pour chaque pays. Dans notre analyse, on constate que le projet de construction des bâtiments d'habitation à Madagascar se joue suivant la densité démographique, l'aménagement du territoire et aux possibilités financières de la population. Tandis que dans les pays développés, ce sont les ressources énergétiques qui déterminent l'architecture et les équipements nécessaires utilisés dans le bâtiment [129].

III.1 - CLASSIFICATIONS DE L'HABITAT SELON L'ARCHITECTURE MALGACHE

Plusieurs classifications sont valables en ce qui concerne l'habitat. La notre concernant les maisons d'habitation à Madagascar est déduite de celle de L'Institut National de la Statistique [128]. Suivant les matériaux, les techniques utilisés qui sont très diversifiés et les architectures qui sont très typiques d'une région à l'autre, on peut classer l'habitat malgache en deux grandes catégories [130] :

- Les habitats traditionnels,
- Les habitats modernes.

Ces deux classes se répartissent dans différentes zones de notre pays comme la montre la figure ci-dessous :

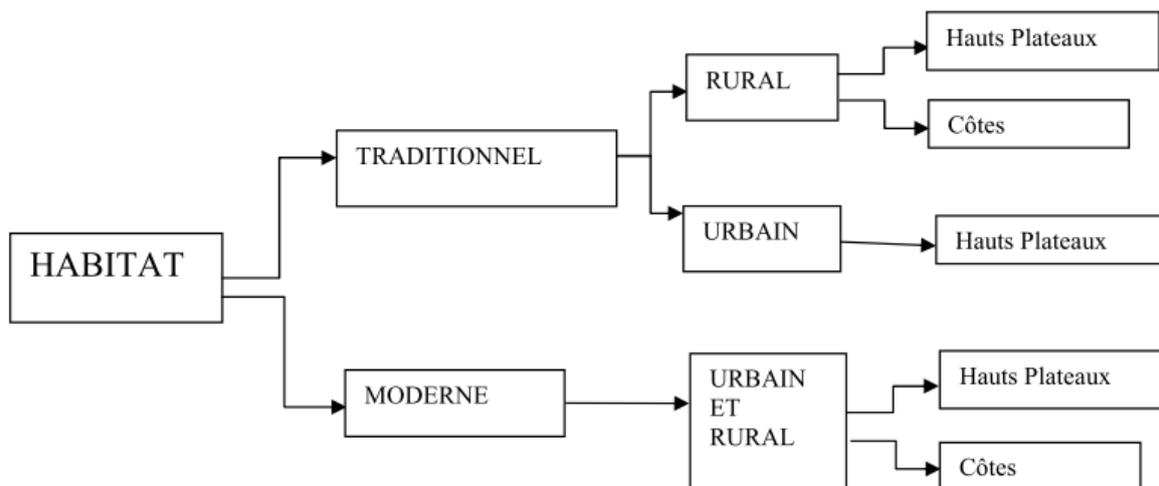


Figure 22 : Les différents types d'habitats à Madagascar.

III.1.1 - Les habitats traditionnels

A Madagascar, la construction des maisons traditionnelles dépend principalement des matériaux et des végétations disponibles dans le milieu. Les maisons traditionnelles sont en général des maisons individuelles c'est-à-dire un immeuble indépendant, occupé exclusivement par le ménage et comprenant éventuellement plusieurs pièces. Le style de construction est un peu ancien. C'est le type d'habitat le plus dominant à Madagascar surtout en milieu rural. Selon « Enquête auprès des ménages 2010 » effectuée par l'INSTAT en 2010 [128], 86,5% des ménages malgaches y vivent dont :

- 89,7% des ménages ruraux ;
- 74,2% des ménages des Centres Urbains Secondaires (CUS) et
- 48,2% des ménages des Grands Centres Urbains (GCU).

III.1.1.1 - En milieu rural

III.1.1.1.1 - Dans les Hauts Plateaux

C'est-à-dire dans les provinces d'Antananarivo et de Fianarantsoa, la caractéristique typique est l'existence des murs et parois en terre et en briques [128]. Ce sont :

- Le torchis ou Ritso peta (boue projetée) et qui est plaqué sur une cloison de roseaux. La latérite, mêlée à la paille de riz hachée constitue une pâte, qui est projetée des deux côtés de la cloison afin d'en assurer l'étanchéité ;
- Le pisé qui s'agit de la boue malaxée qui est étendue par couches successives entrecoupées de périodes de séchage, afin de consolider l'ensemble ;

- L'adobe ou briques en terre crue, celles-ci sont élaborées et moulées à partir de pâte de terre. Les briques séchées sont utilisées comme des parpaings, et assemblées entre elles à l'aide d'un mortier de terre.

Pour ces maisons, les toits sont en chaume et les planchers en bois ou en terre et couverts de natte, fabriquées par des roseaux. En général, les maisons sont sans plafond.

On rencontre aussi des maisons en bois des « *Zafimaniry* » avec leurs ouvertures richement sculptées, dans la partie d'Ambositra [131].



Figure 23 : Maison « *Zafimaniry* » en milieu rural d'Ambositra [131].

III.1.1.1.2 - *Dans les zones côtières*

Un modèle d'habitation rectangulaire à pièce unique s'est répandu pratiquement presque partout dans les milieux ruraux des côtes de Madagascar, mais avec des variantes quant aux matériaux utilisés, lesquels proviennent de la végétation du lieu d'implantation [132] :

- On trouve, dans le Nord, des maisons fabriquées à partir des nervures de raphia pour tous les éléments constitutifs de la maison (mur, plancher, porte, toit) ;
- Au sud, les maisons en « *raotse* » sont très rependues. Le « *raotse* » est un bois épineux léger et tendre typique de la région. L'assemblage de l'habitation est réalisé sans aucun clou, sans aucune cheville, mais uniquement par emboîtements [132] ;
- Les maisons typiques de la région Sud-Ouest est la maison en « *Vondro ou jonc* ». Ce bois est abondant dans le milieu salé, à proximité des mangroves de la côte, et très utilisé car peu coûteux et très adapté au climat chaud et sec du Sud-Ouest malgache [132].
- Dans la côte Est de l'île, on rencontre les maisons typiques appelées « *trano falafa* ». Ce sont des maisons végétales fabriquées à partir du « *ravinala ou l'arbre du voyageur* ». Cet arbre permet à lui tout seul de construire tout une maison traditionnelle (mur, plancher, toit, porte, ...) [132].

- Dans la région Tanala, on rencontre un autre type de maison appelé « *maison Tanala* » construit avec des bambous sous forme de planchettes entrecroisées [132] ;

III.1.1.2 - En milieu urbain

L'architecture en bois fut longtemps le privilège de l'aristocratie comme en témoignent les cases royales et les différents palais de l'ancien Palais de la Reine d'Antananarivo. Ces vieilles demeures nobles étaient très belles avec leur véranda et leurs colonnes [130]. Mais l'introduction de tous les métiers européens du bâtiment (cuisson de la brique, tuiles, amélioration de l'usage de bois) par Jean Laborde, en 1831, a eu de profondes conséquences qui se sont étendues aussi bien dans les villes que dans les campagnes. Et en 1868, on vulgarisa les matériaux non combustibles par crainte des incendies contre lesquels pratiquement rien n'était prévu. Dès lors se généralisa l'emploi de la terre cuite non seulement dans la capitale mais aussi presque dans tous les centres urbains des Hautes Terres où elles concurrencèrent le pisé et le chaume [130] [133]. Ces maisons traditionnelles sont d'inspiration anglaise et on peut les surnommées maisons traditionnelles améliorés [134]. Actuellement, elles sont encore présentes dans tous les centres urbains des hautes terres Malgaches et même dans la Capitale. La figure 25 suivante nous montre des exemples de maison traditionnelle en milieu urbain.



Figure 24 : Maisons traditionnelles en brique de terre cuite des hautes terres Malgaches (en milieu urbain) [130].

III.1.2 - Les habitats modernes

Ce sont des modèles un peu plus confortables. Comme des villas ou des maisons à étage comportant plusieurs appartements formés de plusieurs pièces (cuisine, toilette, etc.), ou de plusieurs chambres. On les rencontre surtout dans les Grands Centres Urbains (GCU) et Centres Urbains Secondaires (CUS). Très peu se trouve en milieu rural.

Le style de construction est moderne c'est-à-dire que les maisons sont en dur et les dimensions sont très variées selon l'architecture désirée et la possibilité de chaque individu. Le dur est

représenté de nos jours par des matériaux modernes c'est-à-dire le béton, le parpaing, la pierre, les briques de terre cuite, les tôles etc., et assortis éventuellement des toilettes modernes. Les maisons sont en général électrifiées et raccordées à l'eau potable.

Selon les enquêtes effectuées par l'INSTAT en 2010 [128], 15,7% des ménages malgaches y vivent dont :

- 11,6% des ménages ruraux ;
- 16,3% des ménages des Centres Urbains Secondaires (CUS) ;
- 48,7% des ménages des Grands Centres Urbains (GCU).

Les habitats modernes sont presque les mêmes dans les Hauts Plateaux que dans les zones côtières. La seule différence c'est que pour les murs, le choix des matériaux utilisés se porte sur leur disponibilité locale [130].

Suivant les deux grandes classes de l'habitat Malgache, une analyse a été effectuée par l'INSTAT en 2010 [128] qui montre la répartition de la population suivant le type de logement occupé, par milieu de résidence, dans toute l'Ile. Le tableau 3 ci-après nous récapitule cette répartition :

Tableau 3 : Répartition de la population suivant le type de logement occupé, par milieu de résidence.

Unité : [%]

Milieu	Maison individuelle traditionnelle	Habitats modernes				Autres	TOTAL
		Appartement	Studio	Chambre	Villa		
Urbain	74,2	5,9	1,2	13,4	3,8	1,5	100,0
Rural	89,7	3,2	0,3	5,7	0,9	0,2	100,0
Ensemble	86,5	3,7	0,5	7,3	1,5	0,5	100,0

Source : INSTAT/DSM/EPM 2010.

Cette répartition ne prend a priori en compte aucun critère sur le type de matériaux utilisés ni sur le degré de confort offert par le logement.

Suivant ces deux grandes classes, les matériaux de constructions utilisés sont nombreux et facilement observables sur les différents composants du bâtiment.

III.2 - MATERIAUX DE CONSTRUCTION IDENTIFIES SUR LES PAROIS DE BATIMENT

Le type de matériaux utilisés indique le degré de confort que peut procurer l'habitat. L'enquête effectuée par l'INSTAT a retenu les matériaux facilement observables et qui permettent de différencier les ménages malgaches. Ces matériaux sont repérés uniquement sur les murs et

parois du bâtiment [128]. Les matériaux pour les autres composants sont présentés en annexe 1.

III.2.1 - Pour les murs et parois

La terre battue, l'écorce et les briques sont les matériaux les plus utilisés par les ménages malgaches pour la construction des murs et parois avec des proportions respectives de 34,5% ; 31,4% et 22,5%. Pour le premier matériau suscité, c'est la région d'Ihorombe qui se distingue en tout premier lieu avec un taux de 81,0%. En seconde position se trouvent les régions de Betsiboka, d'Itasy et Bongolava avec des taux respectifs de 79,8% ; 78,9% et 78,0%. La terre battue peut être argileuse ou latéritique et peut être utilisée directement ou transformée en briques crues. Les régions d'Atsinanana, Vatovavy Fitovinany et Analanjirifo, par contre, sont particulièrement caractérisées par l'usage des écorces, feuilles et tiges avec des proportions respectives de 83,6%, 83,0% et 75,8%. C'est d'ailleurs dans ces trois régions que la végétation est encore très dense. Par ailleurs, l'usage des briques cuites est caractéristique des habitations des Hautes Terres, entre autres dans les régions d'Analamanga (71,9%), de Vakinankaratra (55,7%), de Alaotra Mangoro (34,2%) et de Matsiatra Ambony (31,1%). Les briques sont plus fréquemment utilisées dans le milieu urbain qu'en milieu rural. Le tableau 4 ci-après donne le pourcentage de type de matériaux des murs extérieurs, par région [128].

Bien que l'usage de ces trois types de matériaux (terre battue, écorce, briques cuites) soit toujours fréquent en milieu urbain et rural, les ménages malgaches se servent aussi d'autres types de matériaux pour construire leurs murs. On peut citer par exemple les planches qui sont localisées dans la région d'Androy, où plus de 46% des murs des habitats sont concernés. Il y a aussi les tôles ondulées, les parpaings, les pierres, les f t etc. qui sont rarement utilisés c'est-à-dire avec un taux d'utilisation plus bas que celle des matériaux cités précédemment [128].

Tableau 4 : Types de matériaux de construction pour les murs extérieurs par région.

Unité : %

Région	Ecorce, feuille, tige	Terre battue	Planche	Contre-plaqué	Tôle ondulée	Fût bidon	Pierre	Brique	Parpaing	Autres	Total
Analamanga	0,1	20,2	3,3	0,1	0,0	0,0	0,1	71,9	4,1	0,2	100,0
Vakinankaratra	0,2	42,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	55,7	0,5	0,0	100,0
Itasy	1,4	78,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	19,5	0,1	0,0	100,0
Bongolava	1,1	78,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,8	4,1	0,0	100,0
Matsiatra Ambony	0,4	66,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,4	31,1	1,7	0,0	100,0
Amoron'i Mania	0,5	74,8	3,3	0,0	0,0	0,0	0,4	17,8	3,2	0,0	100,0
VatovavyFitovinany	83,0	9,1	5,3	0,0	0,1	0,0	0,0	1,5	1,0	0,0	100,0
Ihorombe	4,1	81,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,3	10,6	3,3	0,0	100,0
Atsimo Atsinanana	73,4	16,9	3,9	0,0	1,0	0,0	0,1	0,7	0,9	3,3	100,0
Atsinanana	83,6	0,3	9,8	0,0	4,0	0,0	0,0	0,1	1,7	0,5	100,0
Analanjirifo	75,8	0,9	18,7	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,9	1,9	100,0
Alaotra Mangoro	8,3	48,8	5,3	0,0	0,4	0,0	0,1	34,2	3,0	0,0	100,0
Boeny	39,4	37,9	1,5	0,3	4,8	1,5	0,3	7,4	6,8	0,1	100,0
Sofia	15,2	72,4	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	11,5	0,6	0,0	100,0
Betsiboka	5,0	79,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7	12,8	1,6	0,0	100,0
Melaky	39,1	51,6	0,2	0,0	0,5	0,0	0,0	7,0	1,5	0,1	100,0
Atsimo Andrefana	29,7	42,9	4,7	0,0	3,9	0,0	0,3	16,6	1,8	0,0	100,0
Androy	10,8	21,8	46,6	0,0	0,6	0,0	1,5	17,4	0,8	0,6	100,0
Anosy	31,8	26,1	18,5	0,0	0,1	0,1	0,0	21,6	1,8	0,0	100,0
Menabe	18,5	66,8	6,0	0,0	0,1	0,3	0,1	3,7	4,4	0,0	100,0
DIANA	68,5	2,0	3,2	0,0	17,5	0,9	0,8	3,0	4,0	0,2	100,0
SAVA	74,7	0,1	18,5	0,0	4,8	0,1	0,4	0,2	1,3	0,0	100,0
Ensemble	31,4	34,5	7,0	0,0	1,8	0,1	0,2	22,5	2,2	0,3	100,0

Source : INSTAT/DSM/EPM 2010

Tableau 5 : Classement des matériaux utilisés pour les murs extérieurs dans les habitats typiques Malgaches.

Nature des Matériaux	Répartition
Terre crue (battue, pisé, adobe, torchis, ...)	34,5% au niveau national (très fréquent en milieu rural)
Ecorce, feuille, tige	31,4% au niveau national (très abondant dans la partie EST de Madagascar)
Brique cuite	22,5% dans toute la Grande Ile (caractéristique des hautes terres malgaches et surtout en milieu urbain)
Planche	7% en totalité (maximale dans la région Androy avec 46%)
Parpaings, Tôles, pierres, fût, autres	Taux d'utilisation très bas (rarement utilisés)

CONCLUSION

Ce chapitre nous a donné plusieurs informations concernant l'habitation à Madagascar. Il nous a permis de connaître les différents types de maison d'habitation et les différents matériaux de construction des parois qui existent dans la grande Ile. On sait maintenant que les maisons d'habitation malgaches sont classifiées en deux catégories distinctes : les maisons traditionnelles et les maisons modernes. Elles sont réparties dans toute l'Ile dont la première catégorie constitue les milieux ruraux dans toutes les régions. Mais les maisons modernes ont un taux élevé dans les centres urbains (grande et secondaire) même s'il y en a un peu dans les zones rurales. Ces deux classifications sont basées suivant les techniques de construction utilisées, les architectures mais surtout suivant les matériaux de construction employés. Ces derniers sont très diversifiés et facilement identifiables sur les différents composants du bâtiment. Pour les enveloppes de bâtiment, on constate que les terres battues, l'écorce, les feuilles, les tiges et les terres cuites restent les matériaux les plus utilisés par la grande partie de la population dans la construction. Dans les régions des hauts plateaux, la région de la côte Ouest et de la côte Sud-Ouest de la Grande Ile, l'utilisation des terres battues et des terres cuites prédomine.

**PARTIE II –
CARACTERISATION DE
L'INERTIE THERMIQUE DES
PAROIS-TYPES DE
MADAGASCAR**

CHAPITRE IV - DETERMINATION DES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DES MATERIAUX

INTRODUCTION

Au niveau national, 57% des murs sont en terre, dont 34,5 % en terre crue et 22,5% en brique d'argile cuite (Cf. Chapitre III). Dans les régions centrales de Madagascar où le climat tropical est tempéré par des hauts plateaux, plus de 70% des murs sont en terre selon les enquêtes effectuées par l'INSTAT auprès des ménages en 2010 [128]. Cette étude focalisée sur les murs en terres cuites et crues, façonnées en briques ou non, concerne ainsi une grande partie des maisons d'habitation de la Grande Ile. Si cette majorité est qualifiée de « traditionnelle » relativement aux matériaux utilisés, en milieu urbain, on assiste de plus en plus à une recrudescence de constructions en béton, qualifiées celles-là de « modernes ». Nous avons jugé intéressant de comparer les performances thermiques des murs en béton et des murs en terre.

Les propriétés thermophysiques intrinsèques des matériaux constitutifs des murs sont les données d'initialisation des séquences de calculs décrites par la norme ISO 13786. Il s'agit de la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique apparente. Suivant la disponibilité des appareils, outils et autres moyens de mesure, les masses volumiques ont été déterminées par mesurage. Les conductivités thermiques par contre ont été calculées à l'aide des modèles mathématiques et les valeurs de la chaleur spécifique relevées dans la littérature. Ce chapitre est consacré à la présentation des méthodes de détermination et de calcul de ces propriétés thermophysiques.

IV.1 - DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

La masse volumique apparente représente la masse du matériau par unité de volume, vide entre les grains inclus et est exprimée en kg/m^3 . Outre les erreurs inhérentes liées aux méthodes de mesure, les échantillons ne présentent pas toujours des caractéristiques rigoureusement identiques même provenant d'un même lot. Les briques sont majoritairement produites de façon artisanale. Quant à la terre crue, sa nature varie d'un site à l'autre. L'utilisation d'additifs et de liant, de la bouse de vache en général en milieu rural, dépend de la disponibilité des matières. La quantité d'eau nécessaire pour assurer une bonne plasticité est laissée à l'appréciation de l'ouvrier. L'intensité du travail de foulage aux pieds conférant une cohésion suffisante pour que des mottes puissent être maniées et montées en mur est également un paramètre non quantifiable. Compte tenu de ces disparités, les éprouvettes retenues pour les mesures de dimensions proviennent de diverses sources. Toutes ces raisons nous amènent à définir les masses volumiques apparentes à partir de grandeurs moyennes. On a donc :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{IV-1})$$

Avec :

ρ : Masse volumique moyenne du mur

m : Masse moyenne d'un échantillon

V : Volume moyenne de l'échantillon

IV.1.1 - Mesures des dimensions d'un échantillon de matériau constituant le mur

Les mesures des dimensions sont effectuées à l'aide d'un pied à coulisse au 1/20 dont sa résolution est de 0,05mm. Ces dimensions sont L , l et h , respectivement la longueur, la largeur et la hauteur d'un échantillon. La figure 26 ci-dessous montre les dimensions à mesurer sur chaque échantillon.

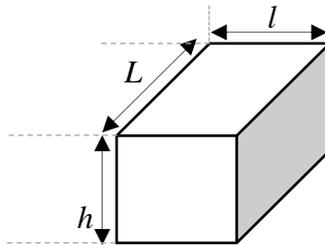


Figure 25 : Les dimensions mesurées d'un échantillon.

IV.1.1.1 - Dimensions des échantillons en terre battue

Les échantillons sont extraits du mur de trois habitats traditionnels en ruines, d'un village situé à environ 45km de la capitale, sur l'axe de la route nationale n°1, dans la commune urbaine d'Arivonimamo. Les trois échantillons sont façonnés de manière à ce qu'ils présentent relativement des dimensions égales, de forme parallélépipédique, pour faciliter les mesures de leurs dimensions. Les résultats de mesure sont reportés dans le tableau ci-après :

Tableau 6 : Les dimensions des échantillons en terre crue battue.

Dimensions	e ₁	e ₂	e ₃
L [m]	0,158	0,154	0,152
l [m]	0,152	0,157	0,156
h [m]	0,110	0,102	0,104

IV.1.1.2 - Dimensions des échantillons en brique adobe

Les échantillons de brique adobe sont ceux fabriqués par les artisans du village de Manerinerina, dans la commune rurale d'Arivonimamo. Nous avons utilisé 10 échantillons de ces briques. Ils ont été exposés et séchés à l'air ambiant durant 60 jours environ. Le tableau suivant montre les résultats de mesure.

Tableau 7 : Les dimensions des échantillons de brique adobe.

Dimensions	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆	e ₇	e ₈	e ₉	e ₁₀
<i>L</i> [m]	0,186	0,185	0,189	0,188	0,185	0,186	0,187	0,186	0,188	0,188
<i>l</i> [m]	0,092	0,090	0,096	0,095	0,090	0,094	0,089	0,096	0,090	0,090
<i>h</i> [m]	0,089	0,089	0,090	0,092	0,091	0,089	0,092	0,090	0,089	0,092

IV.1.1.3 - Dimensions des échantillons en brique d'argile cuite

Les échantillons de briques d'argile cuite utilisés sont ceux fabriqués par les artisans du village Mangatany, dans la commune urbaine d'Arivonimamo. Le combustible utilisé dans les fours de cuisson est la balle de riz. 10 échantillons ont fait l'objet de mesure. Les résultats sont présentés dans le tableau 8.

Tableau 8 : Les dimensions des échantillons de brique d'argile cuite.

Dimensions	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆	e ₇	e ₈	e ₉	e ₁₀
<i>L</i> [m]	0,205	0,205	0,210	0,205	0,205	0,210	0,204	0,208	0,202	0,210
<i>l</i> [m]	0,098	0,092	0,099	0,096	0,092	0,104	0,097	0,100	0,097	0,101
<i>h</i> [m]	0,089	0,087	0,095	0,087	0,089	0,094	0,090	0,092	0,090	0,087

A partir de ces résultats de mesure, nous avons calculé les dimensions moyennes des matériaux utilisés dans chaque mur, permettant de déterminer leurs volumes moyens (tableau 9).

Tableau 9 : Les volumes moyens des échantillons testés.

Matériaux	Dimensions moyennes			Volumes moyens [m ³]
	<i>L</i> [m]	<i>l</i> [m]	<i>h</i> [m]	
Terre crue	0,155	0,155	0,105	0,0025
Brique adobe	0,187	0,092	0,090	0,0015
Brique d'argile cuite	0,205	0,098	0,090	0,0018

La longueur des briques en argile cuite testés est identique à la valeur préconisée par la norme en vigueur à Madagascar. Par contre, la largeur et la hauteur sont différentes. En effet, la norme exige une valeur de 0,09 et 0,10 respectivement pour les deux dimensions.

IV.1.2 - Mesure de la masse moyenne des échantillons

Chaque échantillon est pesé à l'aide d'une balance électronique. Après, nous avons calculé la moyenne des valeurs obtenues pour chaque échantillon. Et les résultats obtenus sont affichés à l'aide des tableaux ci-après.

Tableau 10 : Masse moyenne de l'échantillon en terre crue battue.

Types de murs	Masse des échantillons [kg]			Masse moyenne [kg]
	<i>e</i> ₁	<i>e</i> ₂	<i>e</i> ₃	
Terre crue	4,265	4,100	4,385	4,250

Tableau 11 : Masse moyenne de l'échantillon en brique adobe.

Types de murs	Masse des échantillons [kg]										Masse moyenne [kg]
	<i>e</i> ₁	<i>e</i> ₂	<i>e</i> ₃	<i>e</i> ₄	<i>e</i> ₅	<i>e</i> ₆	<i>e</i> ₇	<i>e</i> ₈	<i>e</i> ₉	<i>e</i> ₁₀	
Brique adobe	1,740	1,790	1,850	1,845	1,755	1,840	1,850	1,760	1,780	1,790	1,800

Tableau 12 : Masse moyenne de l'échantillon en brique d'argile cuite.

Types de murs	Masse des échantillons [kg]										Masse moyenne [kg]
	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}	
Brique cuite	2,560	2,430	2,525	2,470	2,530	2,540	2,550	2,610	2,470	2,515	2,520

D'après les résultats précédents, une brique d'argile cuite est plus lourde qu'une brique adobe avec une masse moyenne respective de 2,520 kg et de 1,800 kg.

IV.1.3 - Calcul de la masse volumique apparente moyenne

La masse volumique apparente moyenne des matériaux est donc obtenue par le rapport de la masse moyenne des échantillons sur leurs volumes moyens. Ainsi, on en déduit les masses volumiques des différents types de murs suivants (tableau 13) :

Tableau 13 : Masse volumique apparente des différents types de mur.

Matériaux	Types de mur	Masse moyenne d'un échantillon [kg]	Volume moyen d'un échantillon [m ³]	Masse volumique apparente moyenne [kg/m ³]
Terre crue	Battue	4,250	0,0025	1700
	Brique adobe	1,800	0,0015	1200
Terre cuite	Brique d'argile	2,520	0,0018	1400
Béton	Béton	3,584	0,0016	2240

Remarque : La valeur de la masse volumique apparente du béton utilisé est celle du béton ordinaire fabriqué au sein du Laboratoire Nationale des Travaux Publics et Bâtiments [135]. Ce béton a été dosé à 350, c'est-à-dire 350kg de ciment par 1m³ de béton. Les dimensions d'un échantillon pour ce béton sont de 0,1m de diamètre et de 0,2m de hauteur.

IV.2 - DETERMINATION DES PROPRIETES THERMIQUES DE CHAQUE TYPE DE MUR

Les propriétés thermiques mis en jeu ici sont la conductivité thermique équivalente λ_{eq} et la chaleur spécifique C_p .

IV.2.1 - Calculs de la conductivité thermique équivalente

La conductivité thermique d'un échantillon de mur peut être déterminée par trois possibilités. Soit on recueille les données bibliographiques, soit on procède à une mesure directe dans des appareils de mesure, ou soit on passe par des formules et des modèles mathématiques. Pour notre cas, nous utilisons les formules mathématiques pour calculer les valeurs de la conductivité thermique équivalente des différents types de murs. En effet, nous avons constaté que nos laboratoires et institutions de recherche ne disposent pas des appareils de mesure appropriée à nos échantillons testés. Nous avons opté pour une estimation de la valeur à partir des modèles mathématiques, celui établi par *Elegovan R. et al.* [70]. Le modèle a été obtenu après l'analyse des données thermophysiques de 830 matériaux différents allant des isolants aux matériaux de maçonnerie structurels (figure 27). C'est une relation empirique qui relie la densité d et la conductivité thermique des matériaux de construction courants. Les valeurs de la conductivité thermique des matériaux sont obtenues conformément aux normes ASTM C177 [136] et ASTM C236 [137], qui sont basées sur une approche en régime permanent. La relation s'écrit :

$$\lambda_{\text{eq}} = 0,0904e^{1,2815d} \quad (\text{IV-2})$$

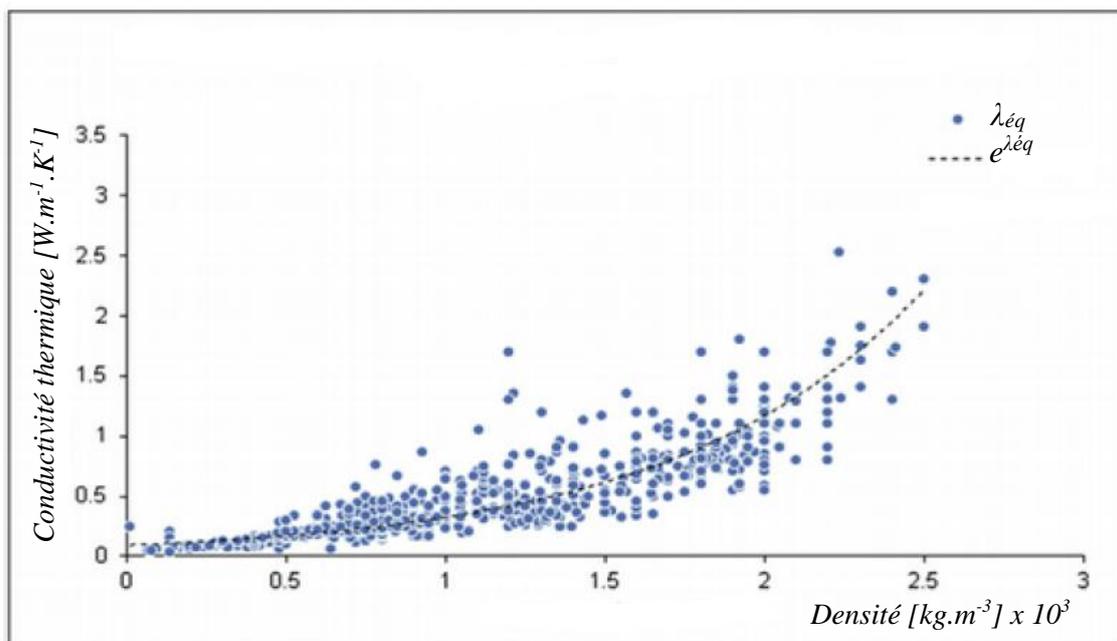


Figure 26 : Relation entre la densité et la conductivité thermique des matériaux de construction [70].

IV.2.2 - Calculs de la chaleur spécifique C_p

Pour les valeurs de la chaleur spécifique, nous avons pris celles fournies dans les bibliographies pour chaque type de mur. Les valeurs trouvées dans les documents de *Fohagui et al.* [138] et d'ASHRAE [139] ont été utilisées.

Ainsi, les données des propriétés thermophysiques des échantillons testés sont affichées sur le tableau suivant :

Tableau 14 : Propriétés thermophysiques des différents murs.

Matériaux	Types de mur	Masse volumique [$kg.m^{-3}$]	Conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	Chaleur spécifique [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
Terre crue	Battue	1700	0,80	900
	Brique Adobe	1200	0,42	880
Argile cuite	Brique cuite	1400	0,54	900
Béton	Béton	2240	1,60	950

Les valeurs des propriétés thermophysiques obtenues ont été confrontées avec celles proposées par les documents de *Fohagui et al.* [138] et d'ASHRAE [139] afin d'examiner leurs crédibilités.

CONCLUSION

Trois propriétés sont déterminées dans ce chapitre : la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique apparente. Faute de l'indisponibilité des appareils de mesure adéquats, les conductivités thermiques des matériaux utilisés pour la confection des murs sont déterminées à partir d'un modèle mathématique. Ce modèle représente la relation qui lie la densité du matériau avec sa conductivité thermique. Cette dernière est donc obtenue après avoir déterminé la masse volumique du matériau. La masse volumique est calculée après des mesures des dimensions (volume apparente) et pesages des échantillons de matériaux. Pour la chaleur spécifique, les valeurs fournies dans les bibliographies sont utilisées. Quant aux matériaux étudiés, trois échantillons en terre crue battue, de forme rectangulaire, sont façonnés à partir du mur de trois anciens habitats différents ruinés pour faciliter la mesure de leurs dimensions. Vingt échantillons dont dix en briques adobe et 10 en argiles cuites sont testés.

CHAPITRE V - APPROCHE EXPERIMENTALE DE LA MESURE DE L'INERTIE THERMIQUE DES PAROIS

INTRODUCTION

Avant de calculer les caractéristiques thermiques décrivant l'inertie thermique des murs par les démarches établies par la norme internationale ISO 13786, on procède d'abord à des mesures expérimentales sur des murs verticaux des cellules de mesure. Les parois de chaque cellule sont faites des matériaux typiques des régions des hautes terres de Madagascar. La méthodologie du plan expérimental à effectuer est décrite dans cette partie, comportant les différentes phases d'essais relatifs aux mesures in situ. Elles commencent donc par la réalisation des cellules expérimentales, le choix – l'assemblage et la mise en place des instrumentations (les capteurs et le central d'acquisition), l'identification des types de mesure à effectuer jusqu'aux mesures expérimentales proprement dites. La compilation, l'analyse statistique et l'interprétation des résultats obtenus seront présentés dans le chapitre résultats et discussions.

L'objectif majeur de cette partie expérimentale est d'évaluer le comportement thermique dynamique des enveloppes extérieures de bâtiment dans les conditions réelles et d'identifier expérimentalement les structures de paroi qui assurent une température intérieure confortable sans avoir recours à un système de chauffage ou de refroidissement conventionnel.

Deux (02) séries de mesure sont effectuées pendant la phase d'expérimentation, en deux périodes différentes, afin de valider les résultats obtenus.

V.1 - REALISATION DU PLAN EXPERIMENTAL DE MESURE

Elle commence par la conception et réalisation des cellules expérimentales en environnement naturel, ensuite l'assemblage et mise en place des instrumentations de mesure, et enfin la collecte et traitement des données collectées.

V.1.1 - Démarches expérimentales

Dans le chapitre II de la première partie (paragraphe II.3.5), nous avons rapporté différentes méthodes de mesure de l'inertie thermique qui sont généralement réalisées in situ ou en laboratoire sur un échantillon ou une cellule ou un bâtiment entier. Notre expérimentation a été menée sur deux types de cellules de mesure expérimentale en environnement naturel. La méthode est basée suivant l'approche globale qui consiste à établir des relations entrée-sortie, dans notre cas face extérieure-face intérieure des murs. Le principe est fondé sur la mesure in situ des températures à la surface extérieure et intérieure des parois et des températures ambiantes interne des cellules de mesure. Le déphasage est l'intervalle de temps entre l'apparition de la température maximale sur la surface extérieure et intérieure de la paroi. Le

facteur d'amortissement est le rapport des amplitudes des fluctuations de température de la surface intérieure et extérieure.

V.1.2 - Justification des choix et présentation des cellules de mesure

Dans le chapitre concernant la détermination des propriétés thermophysiques des parois, trois types de mur en terre ont été étudiés, typiques de la région des hauts plateaux de la grande Ile. Le choix de la paroi pour l'expérimentation devrait donc se baser sur ces trois types de matériaux. Cependant, les travaux d'investigation ont été menés sur deux types de cellules expérimentales en environnement naturel. La première est construite par des briques en argile cuite dénommé CBAC et le deuxième est en terre crue battue ou CTCB.

Les deux cellules s'étalent sur une superficie environ de (2×2) m² à l'extérieure. Elles ont une hauteur de 1m. Du contre-plaqué recouvert de chaume fait office de toiture pour les deux structures. Nous avons opté ce système pour limiter la quantité de flux de chaleur transmise vers l'intérieur de la cellule à travers le toit.

V.1.2.1 - La cellule de mesure en brique d'argile cuite (CBAC)

Elle est formée principalement par des briques d'argile cuite. Les murs ont été érigés selon les techniques de construction couramment utilisées à Madagascar. Ils peuvent être donc revêtus d'enduits de mortier de ciment sur l'une des deux faces ou sur les deux à la fois. Ainsi, les quatre murs de la CBAC se présentent comme suit :

- La surface intérieure des parois 1 et 3 est couverte de 1cm de mortier de ciment ;
- Les surfaces de la paroi 2 est recouverte de 1cm de mortier de ciment sur les deux à la fois ;
- La paroi 4 ne présente aucun revêtement.

La cellule CBAC ainsi que leurs parois sont respectivement représentées à l'aide des figures 27 et 28 suivantes. Leurs propriétés thermophysiques sont données sur le tableau 15 ci-après.

Tableau 15 : Caractéristiques des parois de la cellule CBAC.

Parois	Matériaux	Epaisseurs [cm]	Masse volumique [$kg.m^{-3}$]	Conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	Chaleur spécifique [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
<i>Parois 1 et 3</i>	Brique d'argile cuite	33	1400	0,54	900
	Mortier de ciment	1	1860	0,98	840
<i>Paroi 2</i>	Mortier de ciment	1	1860	0,98	840
	Brique d'argile cuite	33	1400	0,54	900
	Mortier de ciment	1	1860	0,98	840
<i>Paroi 4</i>	Brique d'argile cuite	33	1400	0,54	900

La masse volumique et les propriétés thermiques des murs sont ceux obtenus dans le paragraphe IV (détermination et estimation des propriétés thermophysiques des murs).



Figure 27 : Cellule de mesure CBAC.

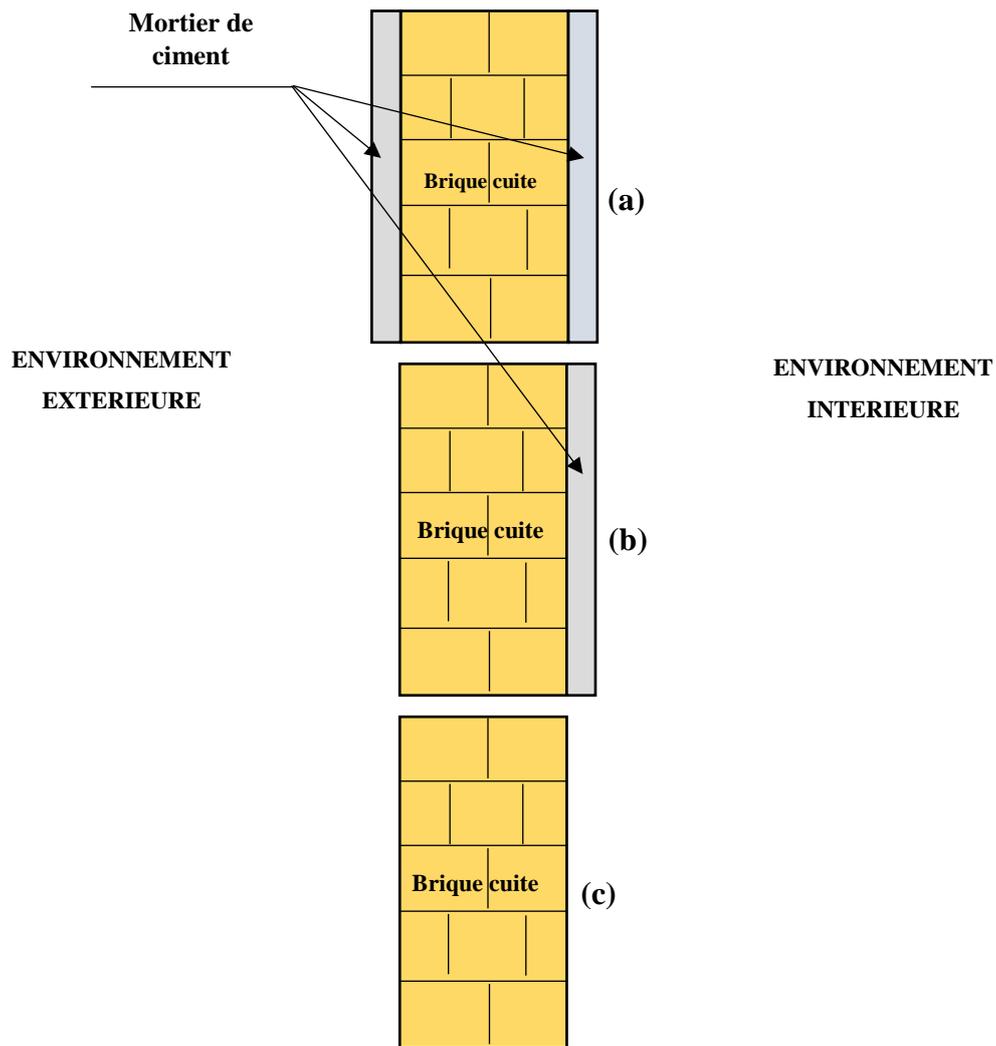


Figure 28 : (a) Structure de la paroi 2 ; (b) Structure de la paroi 1 et 3 ; (c) Structure de la paroi 4

V.1.2.2 - La cellule de mesure en terre crue battue (CTCB)

Elle est formée principalement par des parois en terre crue battue. L'épaisseur exacte de chaque paroi est de 40cm. La touche finale de cette construction consiste à enduire les parois avec un mortier de terre crue même (figure 29).



Figure 29 : Cellule de mesure CTCB.

Les dimensions intérieures et extérieures des deux cellules de mesure sont données sur le tableau ci-après.

Tableau 16 : Dimensions des deux cellules de mesure.

Cellules	Intérieures		Extérieures		Hauteur [m]	Epaisseur [cm]
	<i>Long.</i> [m]	<i>Larg.</i> [m]	<i>Long.</i> [m]	<i>Larg.</i> [m]		
<i>CBAC</i>	1	1	1,60	1,60	1	33
<i>CTCB</i>	1	1	1,87	1,87	1	40

V.1.3 - Justification du choix des trois structures murales de la CBAC

La touche finale des constructions en brique d'argile cuite consiste à enduire les parois avec du mortier de ciment sur l'une des deux faces ou sur les deux à la fois. Ce concept a été adopté afin de comparer distinctement le comportement thermique de chaque paroi. En effet, après des enquêtes auprès de plusieurs constructions en brique d'argile cuite, il existe plusieurs structures mais les plus courants pour la maison d'habitation sont celles des parois 2 et 1-3 (figure 28). C'est-à-dire qu'il y a des murs où les deux faces sont revêtues de mortier de ciment. Il y a aussi des murs où seulement la face intérieure est couverte et que des jointures en ciment sur la face extérieure. L'étude de la structure en brique monocouche (paroi 4) est nécessaire puisque c'est l'élément fondamental de la cellule.

Nous sommes obligés de rassembler ces trois structures sur une seule cellule de mesure à cause de l'insuffisance d'espace du site expérimental. Mais il est préférable de construire plusieurs cellules avec des parois de même structure pour bien mener l'étude. En effet, l'emplacement et l'orientation des parois de la cellule déterminent la durée d'ensoleillement et l'action du vent sur les faces extérieures.

V.1.4 - Conditions d'expérimentations

Réalisées sur un site en plein air, les deux cellules sont soumises aux conditions climatiques réelles. Aucun masque solaire se trouve dans l'environnement immédiat des cellules. Les interactions avec les constructions environnantes sont supposées faibles. L'une placée à côté de l'autre, la distance qui sépare les deux cellules vaut 2m.

V.1.5 - Présentation des instrumentations de mesure utilisées

La détermination expérimentale de l'inertie thermique des murs peut s'effectuer par la mesure dans un même plan des températures de surfaces et ambiante intérieure. Ce qui implique l'utilisation d'instruments de mesure appelés capteurs thermiques. Ils sont associés à une centrale d'acquisition (ou microcontrôleur) permettant de relever les bilans des températures ambiante et en surfaces intérieure et extérieure de la paroi.

V.1.5.1 - Capteurs de température

Les capteurs sont les éléments indispensables à la mesure des températures. Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable. Notre travail porte sur l'étude des transferts thermiques. Comme les sollicitations peuvent être de nature aléatoire en conditions réelles, les mesures simultanées de la température et du flux de chaleur sont possibles par l'utilisation des sondes de température ou des thermocouples et de capteur de flux (fluxmètre). Pour notre cas, seulement les températures en surfaces de la paroi et de l'ambiance intérieure de la cellule sont relevées. En effet, on ne dispose pas de fluxmètre pour mesurer les bilans fluxmétriques. Les mesures de températures ont été réalisées à l'aide de sondes de température de type transistor DS18B20 pour les températures de surface et avec un DHT11 pour la température ambiante à l'intérieure des cellules de mesure.

V.1.5.1.1 - La sonde de température DS18B20

Il existe plusieurs types de sonde de température. Tous sont utilisés pour une gamme précise allant de quelques degrés à quelques milliers de degrés. Nous avons utilisé le type DS18B20 étanche (figure 30). Le choix a été dicté par leur existence sur le marché et de leur avantage. En effet, l'avantage de ce capteur est sa fiabilité, son faible encombrement et sa facilité de mise en œuvre.

Le capteur DS18B20 du fabricant Maxim (anciennement Dallas Semi-conducteur) est déjà pré-câblé et étanche ; pratique pour mesurer une température dans un endroit éloigné ou dans un environnement humide. C'est un capteur de température numérique intégrant tout le nécessaire requis pour faire la mesure : capteur analogique, convertisseur analogique/numérique, électronique de communication et alimentation.

Il communique via un bus 1-Wire et possède une résolution numérique de 12 bits (programmable) avec une plage de mesure de -55°C à $+125^{\circ}\text{C}$. La précision analogique de ce capteur est de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (entre -10°C et $+85^{\circ}\text{C}$) directement à partir du convertisseur analogique/numérique, ce qui le rend très intéressant pour une utilisation normale. Le DS18B20 est utilisable avec des tensions de 3,0 à 5,5 V. Il est composé de trois fils : un fil de masse (fil noir), un fil d'alimentation (fil rouge) et un fil de données (fil jaune). Un seul composant externe est nécessaire pour faire fonctionner un bus 1-Wire : une simple résistance de 4,7Kohms en résistance de tirage à l'alimentation sur la broche de données.



Figure 30 : Sondes de température DS18B20.

Chacun des capteurs possède un identifiant unique de 64 bits (gravé dans le capteur à l'usine) pour les différencier les uns des autres.

V.1.5.1.2 - Le capteur DHT11

Le capteur numérique de température et d'humidité DHT11 est un capteur composite qui contient une sortie de signal numérique étalonnée de la température et de l'humidité. Il est doté d'une technologie de collecte de modules numériques dédiée et d'une technologie de détection de la température et de l'humidité, qui lui permet de garantir une fiabilité élevée et une excellente stabilité à long terme.

Ce capteur comprend un composant de mesure d'humidité de type résistif et un composant de mesure de température NTC, et se connecte à un microcontrôleur 8 bits haute performance, offrant une excellente qualité, une réponse rapide, une capacité anti-ingérence et une rentabilité élevée. Chaque élément DHT11 est strictement calibré en laboratoire, ce qui est extrêmement précis lors du calibrage de l'humidité et de la température. Les coefficients d'étalonnage sont stockés sous forme de programmes dans la mémoire OTP, qui sont utilisés par le processus de détection de signal interne du capteur.

L'interface série monofil rend l'intégration du système rapide et facile. Sa petite taille, sa faible consommation électrique et sa transmission des signaux jusqu'à 20 mètres en font le meilleur choix du DHT11 pour diverses applications, y compris les plus exigeantes. On peut l'utiliser dans les HVAC, séchoir, équipement d'essai et d'inspection, biens de consommation courante, automobile, contrôle automatique, enregistreurs de données, stations météorologiques, appareils électroménagers, régulateur d'humidité, appareils de mesure et de contrôle de l'humidité, médicaux et autres. Le composant est un boîtier de couleur bleu avec une rangée emballée avec quatre rangées de broches (figure 31), ce qui rend la connexion très pratique.

Ses spécifications techniques sont données sur le tableau suivant :

Tableau 17 : Spécifications techniques du capteur DHT11.

Source de courant	3 – 5,5V
Signal de sortie	Signal numérique via un bus
Plage de mesure	<ul style="list-style-type: none"> • Humidité : 20 – 100% RH • Température : 0 – 50°C
Précision	<ul style="list-style-type: none"> • Humidité : ±4% RH • Température : ±2°C
Résolution ou sensibilité	<ul style="list-style-type: none"> • Humidité : 1% RH • Température : 0,1°C
Répétabilité	<ul style="list-style-type: none"> • Humidité : ±1% RH • Température : ±1°C
Dimensions	12*15,5*5,5mm

Le DHT11 est relativement simple à utiliser, mais nécessite un minutage méticuleux pour récupérer les données. Le seul inconvénient de ce capteur est qu'on ne peut obtenir de nouvelles données qu'une fois toutes les 2 secondes.

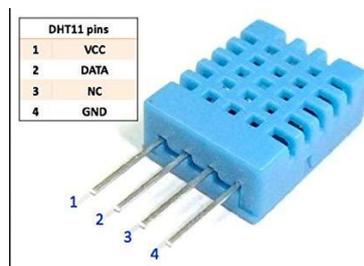


Figure 31 : Capteur de température ambiante et d'humidité DHT11.

V.1.5.2 - Le central d'acquisition des données

Les capteurs DS18B20 et DHT11 fonctionnent parfaitement avec des microcontrôleurs dotés d'une simple broche numérique. Les mesures in situ sont donc commandées à l'aide d'une

centrale d'acquisition ou microcontrôleur (figure 32) de mesure autonome formée par les éléments suivants :

- Une carte Arduino UNO (et son câble USB),
- Une résistance de 4,7Kohms, code couleur : jaune – violet – rouge,
- Un module RTC (Real Time Clock),
- Un module micro-SD,
- Un écran LCD,
- Une plaque d'essai,
- Des fils pour câbler le montage.

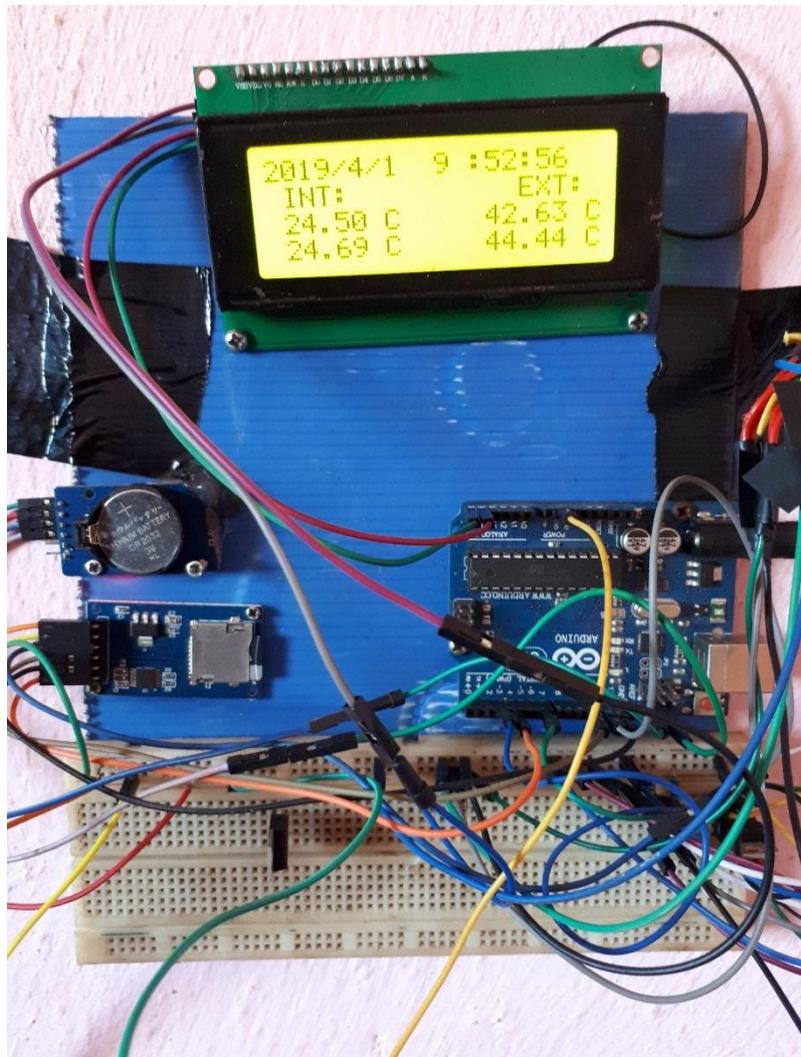


Figure 32 : Central d'acquisition des données expérimentales.

La rapidité et la facilité de branchement permet de mettre en place le dispositif expérimental dans un temps relativement court. Le microcontrôleur est autonome et permet la lecture des

températures en temps réel directement sur l'écran d'affichage. Cependant, les données relevées sont enregistrées dans une carte micro-SD par l'intermédiaire du module micro-SD et récupérées à la fin des mesures.

Les capteurs sont contrôlés par la carte arduino UNO (figure 33), dans laquelle tous les programmes de commande sont enregistrés. Le module RTC est une horloge numérique autonome permettant d'implémenter précisément le temps réel (date et heure) relatif à chaque valeur de température captée par les capteurs DS18B20 et DHT11.

La source d'énergie employée est une batterie accumulateur de courant 12V. Un régulateur de tension 5V est donc utilisé afin d'imposer une tension fixe 5V pour alimenter tous les instruments (capteurs et microcontrôleur).

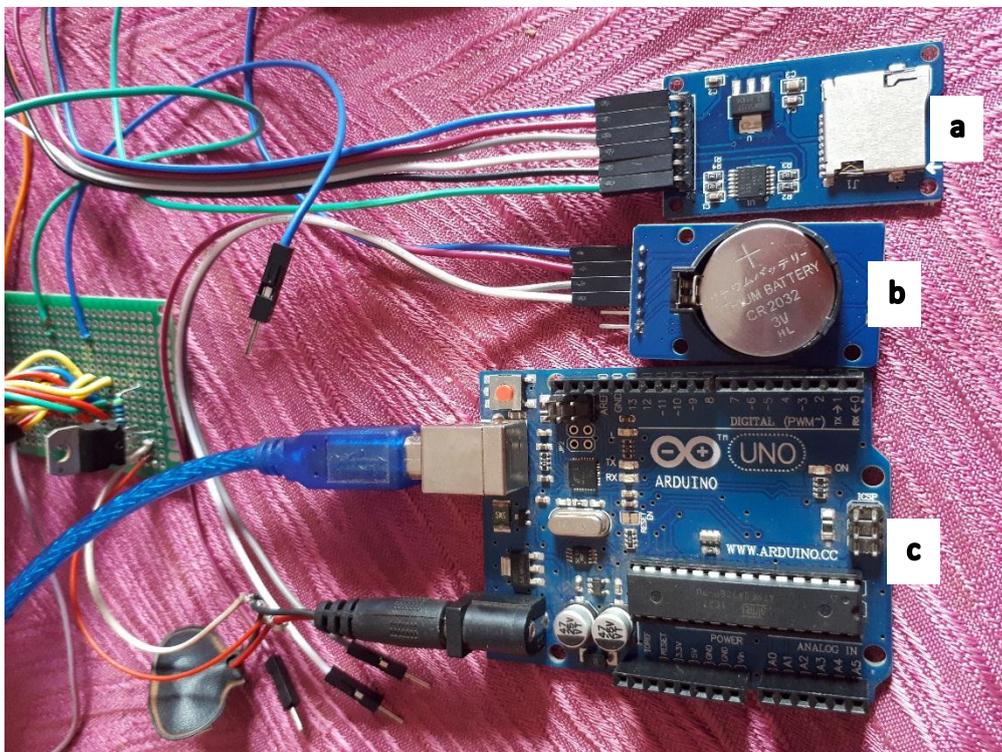


Figure 33 : (a) Module micro-SD ; (b) Module RTC ; (c) Carte arduino UNO.

V.1.6 - Etalonnage des capteurs de température en surface utilisés

Pour mener une étude homogène, il est nécessaire de bien connaître le comportement des capteurs placés dans le contexte de la mesure. Une procédure d'étalonnage est donc indispensable. Cette procédure est nécessaire pour vérifier l'uniformité des données recueillies par les capteurs DS18B20 employés. Ils sont groupés en deux dont l'un est pour mesurer la température de surface extérieure et l'autre pour celle de l'intérieure. Un groupe contient quatre capteurs qui sont placés sur une même surface pendant 12 heures pour y prendre la température.

Ensuite, les écarts moyens entre les valeurs données par les capteurs sont calculés. Une comparaison de ces résultats avec la précision prescrite par le constructeur nous permet d'évaluer les incertitudes de mesure.

Le protocole d'étalonnage est identique pour les deux groupes. Les paragraphes suivants nous montrent plus de détail le concernant.

V.1.6.1 - Vérification des capteurs du groupe à l'extérieur

Le principe est de placer les quatre capteurs sur la surface extérieure recevant la même quantité de flux de chaleur. Chaque capteur est collé sur la surface (figure 34), lié au microcontrôleur et prend les valeurs de température en une journée pour les répertoriées dans la carte micro-SD. Ce type de démarche a été choisi pour savoir aussi l'uniformité de la répartition de la température à la surface.

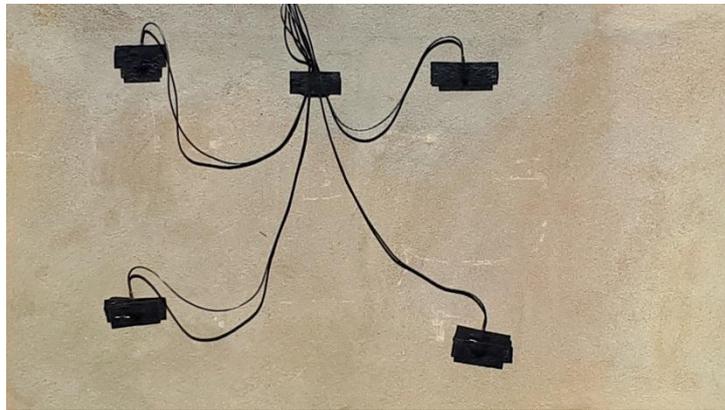


Figure 34 : Emplacement lors de l'étalonnage des capteurs DS18B20 à l'extérieur.

V.1.6.2 - Vérification des capteurs du groupe à l'intérieur

L'idée et le principe est identique à la vérification des capteurs extérieurs sauf que les capteurs sont ici placés à la surface intérieure.



Figure 35 : Emplacement lors de l'étalonnage des capteurs DS18B20 à l'intérieur.

Sur ces deux figures, on voit qu'il y a huit capteurs dont quatre sont à l'extérieure et quatre à l'intérieure. Ils sont numérotés de 1 à 4 selon leur identité dans la ligne de programmation pour les distinguer. A l'aide du tableau 18 ci-après, un extrait de données de température reçues lors de l'étalonnage des capteurs est présenté.

Tableau 18 : Extrait de données de températures prises lors de l'étalonnage des capteurs.

Date et heures	T° du groupe intérieur [°C]				T° du groupe extérieur [°C]			
	Capt. 1	Capt. 2	Capt. 3	Capt. 4	Capt. 1	Capt. 2	Capt. 3	Capt. 4
01/04/2019 9 : 52 : 56	24,37	24,50	24,50	24,69	42,63	42,49	42,70	42,70
01/04/2019 10 : 7 : 54	24,19	24,25	24,19	24,44	41,63	41,56	41,32	41,34
01/04/2019 10 : 22 : 52	24,25	24,19	24,12	24,44	41,10	41,56	41,25	41,25
01/04/2019 10 : 37 : 50	24,25	24,19	24,12	24,44	40,75	40,80	40,36	40,30
01/04/2019 10 : 52 : 48	24,37	24,31	24,25	24,56	44,81	44,78	44,56	44,56
01/04/2019 18 : 6 : 50	26,62	26,69	26,87	26,94	26,19	26,44	26,56	26,60
01/04/2019 18 : 21 : 48	26,69	26,69	26,87	27,00	25,75	26,06	26,19	25,85
01/04/2019 18 : 36 : 46	26,75	26,69	26,75	27,06	25,44	25,75	25,94	25,00
01/04/2019 18 : 51 : 44	26,75	26,75	26,75	27,12	25,12	25,44	25,62	24,69
01/04/2019 19 : 6 : 42	26,75	26,75	26,81	27,12	24,50	24,81	25,06	24,73

...

V.1.7 - Principe de mise en place des instrumentations lors des mesures in situ

Les capteurs de températures sont placés sur les faces extérieure et intérieure de la paroi. Huit capteurs DS18B20 et un DHT11 ont été employés au cours de l'expérimentation. Les capteurs DS18B20 sont plaqués uniformément à la paroi à l'aide d'un film de colle époxy en dessous duquel un isolant en silicone est placé. Une pièce en carton de dimension (100 * 70 * 5) mm, fixé par des clous, couvre l'ensemble pour le serrer très fort et pour l'immobiliser (voir figure 36). La surface de contact entre la paroi et les capteurs est bien sculptée pour avoir la forme des capteurs permettant de bien poser ces derniers. Ce concept de mise en place est adopté non seulement pour réduire la résistance de contact thermique entre la surface du mur et le capteur, mais aussi pour isoler le capteur contre les perturbations engendrées par le milieu extérieur.

Ceci dans le but de recevoir une quantité de signal suffisante de la part de la surface étudiée. Le capteur DHT11 est placé au milieu de l'environnement intérieur de la cellule afin de suivre l'évolution de la température ambiante dans cette zone. Ces capteurs sont reliés au central d'acquisition et les valeurs captées sont sauvegardées à un pas d'acquisition de 15mn et conservées dans la carte micro-SD sous forme de fichier texte (.txt).

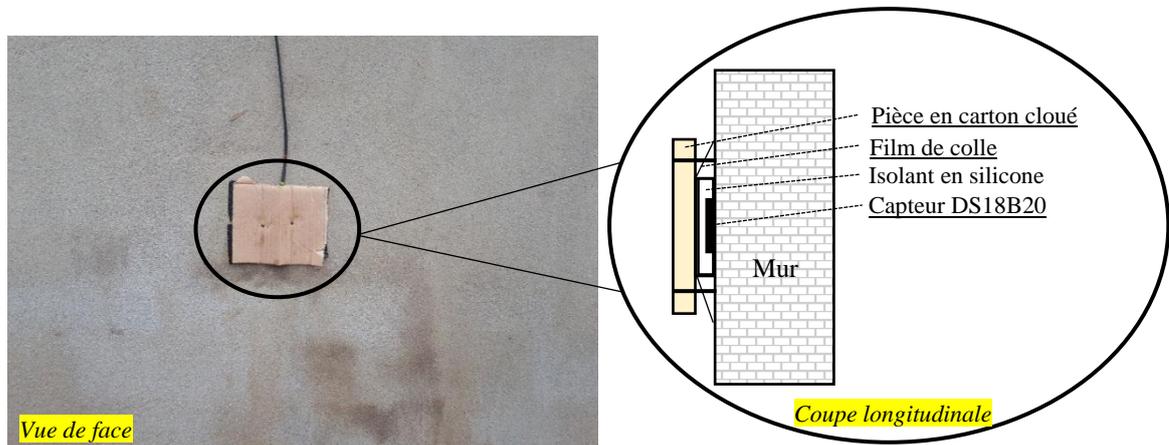


Figure 36 : Principe de mise en place du capteur DS18B20 sur la surface.

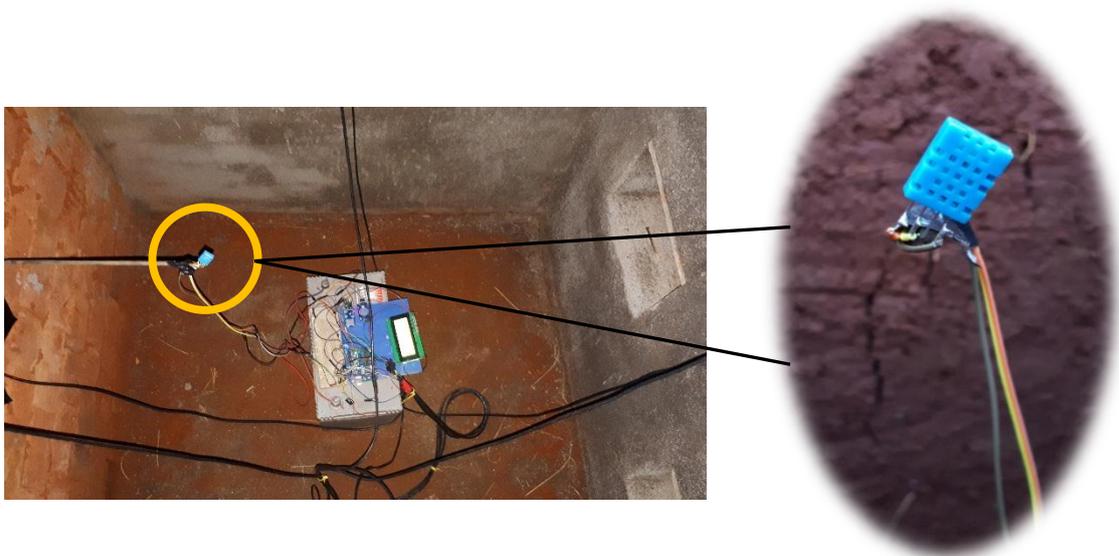


Figure 37 : Positionnement du DHT11 à l'intérieur de la cellule.

V.2 - MESURE DES TEMPERATURES IN SITU

V.2.1 - Mesure des températures de la cellule CBAC

Ce paragraphe consiste en une description lors de la mesure proprement dite des températures sur les points suivants : en surfaces externe et interne des parois ; et à l'intérieure de la cellule.

V.2.1.1 - Mesure des températures de surface des parois

Ceci concerne la mesure proprement dite de la température de surface des quatre parois de la cellule de mesure construit avec des briques d'argile cuites.

V.2.1.1.1 - Orientation des parois

L'emplacement de chaque paroi est comme suit : la face 1 est orientée vers l'Est, la face 2 est dirigée vers le Nord, la face 3 est vers l'Ouest et la dernière face se trouve au sud. Suite à cette configuration, le temps d'ensoleillement de chaque face est donc différent.

V.2.1.1.2 - Positionnement des capteurs DS18B20 sur la surface

Un capteur est plaqué sur les faces de chaque paroi (intérieure et extérieure). Il est positionné au milieu de la face comme le montre la figure 38 suivante. On adopte cet emplacement suivant l'hypothèse que la répartition de la température sur la surface est uniforme. En effet, d'après les résultats lors de l'étalonnage des capteurs interne et externe, on voit que la répartition des températures superficielles d'une paroi est uniforme. La numérotation des capteurs correspond à la numérotation de la surface sur laquelle il est placé.

V.2.1.1.3 - Calendrier de mesures

Deux séries de mesure sont effectuées sur la cellule en brique d'argile cuite. Une série a duré sept jours et sept nuits. La première série de mesure a commencé le 04 mai 2019 jusqu'au 11 mai 2019. Et la deuxième se déroule le 14 au 21 décembre 2019. Il est intéressant de suivre le comportement des parois sur une longue durée pour étudier l'évolution de ses caractéristiques thermiques. En effet, un résultat pour une seule journée ne suffit pas de prédire l'inertie thermique journalière de la paroi. De plus, la fiabilité dans le temps et la résistance aux intempéries font partie des qualités nécessaires à un protocole expérimental.

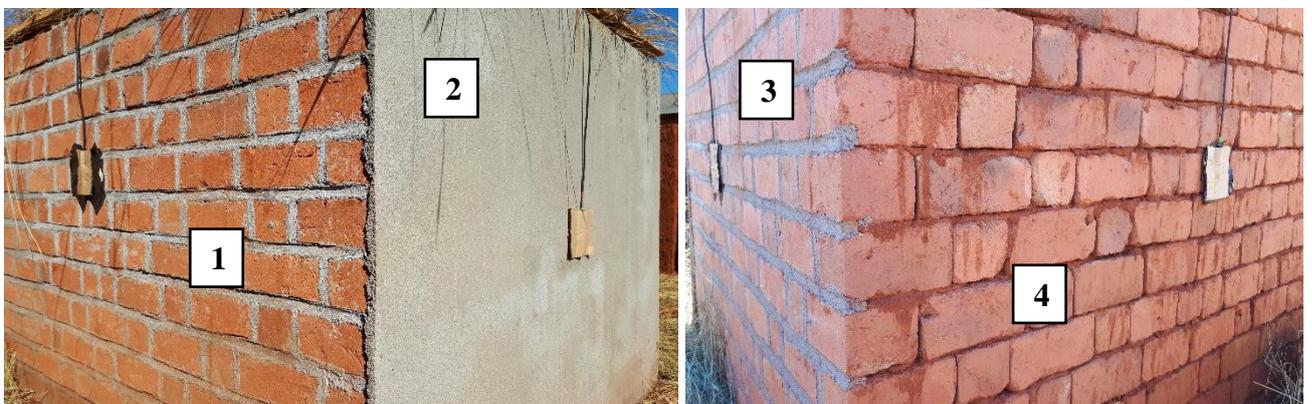


Figure 38 : Positionnement des capteurs sur les faces extérieures de la cellule CBAC.

V.2.1.1.4 - *Exemples de données relevées*

Sur le tableau 19 suivant, il est présenté des exemples de valeurs relevées in situ.

Tableau 19 : Extrait de données de température enregistrée sur les parois de la CBAC.

Date et heures	Paroi 1		Paroi 2		Paroi 3		Paroi 4	
	T° _{int} [°C]	T° _{ext} [°C]						
05/05/2019 08 : 02 : 12	19	22,62	19,06	25,87	24,75	18,12	18,56	17,12
05/05/2019 08 : 17 : 09	18,94	23,31	19	27,56	24,69	18,5	18,5	17,56
05/05/2019 08 : 32 : 06	18,94	24,06	19	28,69	24,69	18,81	18,5	17,94
05/05/2019 08 : 47 : 02	18,87	24,44	18,94	29,75	24,62	19,12	18,44	18,31
05/05/2019 09 : 01 : 59	18,87	24,62	18,94	30,81	24,62	19,44	18,44	18,69
05/05/2019 16 : 20 : 51	20	22,36	20,56	26,45	25,87	32,19	19,16	22,04
05/05/2019 16 : 35 : 42	20,07	22,3	20,68	25,94	26,06	31,72	19,2	21,82
05/05/2019 16 : 50 : 54	20,07	22,28	20,68	25,06	26,06	29,96	19,24	21,06
05/05/2019 17 : 07 : 24	20,12	22,25	20,81	24,81	26,06	28	19,31	20,75
05/05/2019 17 : 22 : 49	20,19	21,81	20,94	24,31	26,12	26,81	19,37	20,37

...

V.2.1.2 - *Mesures de la température ambiante à l'intérieur*

Rappelons que la paroi verticale extérieure est utilisée principalement comme une protection. Elle est une barrière thermique qui limite les échanges de chaleur entre l'extérieure et l'intérieure d'une pièce. Étudié son inertie conduit aussi donc à suivre l'évolution de la température ambiante de l'air en contact avec la surface interne. C'est pour cette raison qu'on a suivi la variation de la température interne de la cellule par l'utilisation du capteur DHT11. Le tableau 20 suivant montre un exemple des valeurs retenues dans la carte micro-SD au cours de la 1^{ère} série de mesure. Les mesures se déroulent simultanément avec les mesures des températures de surface.

Tableau 20 : Extrait de données de la température ambiante à l'intérieur de la cellule CBAC.

Date et heures	T° ambiante [°C]
05/05/2019 08 : 02 : 12	19
05/05/2019 08 : 17 : 09	19
05/05/2019 08 : 32 : 06	19
05/05/2019 08 : 47 : 02	19
05/05/2019 09 : 01 : 59	19
05/05/2019 16 : 20 : 51	19
05/05/2019 16 : 35 : 42	19
05/05/2019 16 : 50 : 54	20
05/05/2019 17 : 07 : 24	20
05/05/2019 17 : 22 : 49	20

...

V.2.2 - Mesure des températures de la cellule de mesure CTCB

Ce paragraphe concerne la mesure in situ des températures de la cellule édifiée en terre crue. Comme pour le cas de la cellule composée de brique d'argile cuite, les démarches expérimentales sont identiques. Les mesures effectuées sont donc celles de la température en surface des parois et l'évolution de la température ambiante à l'intérieure de la cellule.

V.2.2.1 – Mesure des températures de surface de la paroi

V.2.2.1.1 – Orientation de la paroi et emplacement des capteurs

Pour cette cellule, une paroi a été étudiée. On a fait le choix de la face où la durée ensoleillement est la plus longue. En effet, la structure des quatre parois est identique. L'analyse d'une seule paroi est donc suffisante. L'emplacement des sondes est analogue à celui de la cellule de mesure CBAC précédente. Deux capteurs DS18B20 sont plaqués au milieu des faces dont l'une à l'extérieure et l'autre à l'intérieure. Les capteurs sont couverts de poussières pour atténuer la résistance de contact avec le mur. Leur fixation est décrite dans le paragraphe V.1.7 précédent. Le dispositif est illustré sur la figure 39 suivante.



Figure 39 : Positionnement des capteurs DS18B20 sur la CTCB.

V.2.2.1.2 – Calendrier de mesure

Comme sur la cellule en brique cuite, deux séries de mesure sont effectuées sur la CTCB. Une série a duré 08 jours et 08 nuits. Les mesures ont commencé le 12 au 19 mai 2019 pour la première série. Et le 07 au 14 décembre 2019 pour la deuxième.

V.2.2.1.3 - Exemples de données relevées in situ

Le tableau 21 suivant nous donne un extrait des données récoltées durant la 1^{ère} série de mesure sur la paroi de la cellule en terre crue battue.

Tableau 21 : Extrait de données de température enregistrée sur la paroi de la CTCB.

Date et heures	T ^o _{ext} [°C]	T ^o _{int} [°C]
13/05/2019 07 : 37 : 36	22,94	19,81
13/05/2019 07 : 52 : 32	24,75	19,75
13/05/2019 08 : 07 : 29	24,87	19,75
13/05/2019 08 : 22 : 40	24,91	19,75
13/05/2019 08 : 37 : 44	27,06	19,75
13/05/2019 18 : 05 : 47	23,19	19,81
13/05/2019 18 : 20 : 44	23	19,81
13/05/2019 18 : 35 : 41	22,62	19,87
13/05/2019 18 : 50 : 38	22,19	19,87
13/05/2019 19 : 05 : 34	21,87	19,87

...

V.2.1.2 - Mesures de la température ambiante à l'intérieur

La variation de la température ambiante interne de cette cellule est suivie par un capteur DHT11 placé au milieu. Le tableau 22 suivant montre un exemple des valeurs retenues au cours de la 1^{ère} série de mesure dans la carte micro-SD. Les mesures se déroulent simultanément avec les mesures des températures de surface.

Tableau 22 : Extrait de données de la température ambiante à l'intérieur de la cellule CTCB.

Date et heures	T° ambiante [°C]
13/05/2019 08 : 07 : 29	19
13/05/2019 08 : 22 : 40	19
13/05/2019 08 : 37 : 44	19
13/05/2019 08 : 52 : 41	19
13/05/2019 09 : 07 : 38	19
13/05/2019 19 : 50 : 26	18
13/05/2019 20 : 05 : 23	18
13/05/2019 20 : 20 : 20	18
13/05/2019 20 : 35 : 17	18
13/05/2019 21 : 05 : 10	18

...

V.3 - CALCULS DES DEPHASAGES ET DES AMORTISSEMENTS THERMIQUES

Ces deux paramètres sont les plus généralement pris en compte dans la construction afin d'évaluer l'inertie thermique d'une paroi. Leur détermination est l'objectif final de la recherche durant la phase expérimentale. Ils sont entrepris avec les valeurs des températures de surface enregistrées quotidiennement. Les résultats obtenus feront ensuite l'objet d'une comparaison avec ceux de la norme ISO 13786 pour visualiser leur différence et valider leur recevabilité.

V.3.1 - Calcul des déphasages de l'onde thermique

D'une manière générale, le déphasage thermique sera égal à l'intervalle de temps entre le moment où le maximum d'une sollicitation thermique extérieure impacte de façon équivalente l'intérieur d'un bâtiment. Cette grandeur caractérise la capacité d'un matériau à retarder les variations de réponses thermiques.

Pour notre cas, il s'agit de l'intervalle de temps entre l'apparition de la température maximale sur les surfaces extérieure et intérieure de la paroi en une journée. Noté Δt , il est donc obtenu par la relation suivante :

$$\Delta t = t_{T_{int}^{max}} - t_{T_{ext}^{max}} \text{ [mn]} \quad (V-1)$$

V.3.2 - Calcul des facteurs d'amortissement de l'onde thermique

Le facteur d'amortissement est défini comme étant le rapport des amplitudes des fluctuations des températures des surfaces intérieure et extérieure. Il est obtenu suivant la relation suivante :

$$f = \frac{\Delta T_{int}}{\Delta T_{ext}} = \frac{T_{int}^{max} - T_{int}^{min}}{T_{ext}^{max} - T_{ext}^{min}} \quad [\%] \quad (V-2)$$

CONCLUSION

Ce chapitre consiste particulièrement en une évaluation de l'inertie thermique des murs à l'aide des mesures in situ des températures de surfaces et de l'ambiance intérieure. Les analyses bibliographiques sur la méthode de détermination expérimentale de l'inertie thermique nous ont permis d'établir les protocoles entrepris dans ce chapitre. Ils commencent par la construction sur site des cellules expérimentales, l'identification des paramètres à mesurer, la création des instruments nécessaires, la mise en place de ces appareils et les mesures proprement dites. Les expérimentations menées in situ sur les cellules de mesure ont abouti à l'obtention du déphasage thermique et du facteur d'amortissement, paramètres généralement pris en compte pour décrire l'inertie thermique, entre les profils de température de surfaces intérieures et extérieures des parois. Les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre VII.

CHAPITRE VI – CARACTERISATION DES MURS SUIVANT LA NORME ISO 13786

INTRODUCTION

Ce chapitre est dédié à l'application des démarches de calcul préconisées par la norme internationale ISO 13786. La première série de calculs portent donc sur deux types de mur monocouche, le premier érigé en terre crue battue et le second en brique d'argile cuite. L'application de revêtement d'enduits de mortier de ciment sur l'une et/ou les deux faces de ce dernier type de mur est une pratique courante à Madagascar. On est alors en présence de murs multicouches sur lesquels se focalisent la deuxième série de calculs. Dans ces deux volets, les démarches de calculs sont effectuées avec comme valeurs limites, les températures obtenues lors des expérimentations expérimentalement.

VI.1- CONCEPTION D'UN OUTIL DE CALCULS

VI.1.1- Généralités

Dans les démarches de la norme ISO 13786, les paramètres décrivant l'inertie thermique à déterminer sont nombreux, les calculs longs et fastidieux. Il s'avère alors nécessaire de concevoir un outil de calculs approprié. Il est élaboré sous environnement Excel. C'est une application informatisée des démarches de calcul des sept caractéristiques thermiques dynamiques des composants plans de bâtiment. Il peut s'appliquer à des murs ou parois, planchers, plafonds, toitures de différentes dimensions. Il a pour objectif d'aider les ingénieurs ou les constructeurs de bâtiment. La première partie de ce chapitre est consacré à la présentation de cet outil.

VI.1.2- Outil de conception

L'environnement Excel (version 2016) est choisi pour la conception de cet outil de calculs grâce à sa simplicité d'utilisation. L'intérêt réside sur le fait qu'il peut être exécuté par tous les utilisateurs ayant accès aux outils de Microsoft Office, version 2007 et plus. Outre les fonctions mathématiques présentes dans Excel, nous avons aussi créé d'autres formules afin d'exécuter automatiquement les séquences de calculs, du début jusqu'à la fin pour un type de composant.

VI.1.3- Mise en œuvre de l'outil de calculs

La mise en œuvre de l'outil de calculs des caractéristiques thermiques dynamiques des composants plans de bâtiment suivant les démarches de la norme ISO 13786 est très simple.

VI.1.3.1- Choix du composant ou élément d'un composant

Après son lancement, il faut choisir sur quel composant ou élément(s) d'un composant de bâtiment on veut appliquer les démarches. Les étapes à suivre sont : cliquer sur le bouton « COMPOSANT/ELEMENTS » et la liste sur la figure 40 suivante apparaît. Ensuite, choisir le composant en cliquant sur chaque bouton.



Figure 40 : Choix du composant/éléments dans l'outil de calcul.

VI.1.3.2- Choix de la structure du composant

Après, on définit la structure du composant/élément choisi. C'est-à-dire, choisir le nombre de couche qui constitue ce dernier. On clique donc sur l'un des boutons de la figure 41 suivante.



Figure 41 : Choix du nombre de couche du composant.

Dans cet outil de calcul, le nombre de couche maximale du composant est limité à six (06) couches. Après le choix du nombre de couche, une représentation schématique du composant apparaîtra en bas sur laquelle on choisira le matériau constitutif à l'aide d'une liste déroulante située en dessus de chaque couche (figure 42).

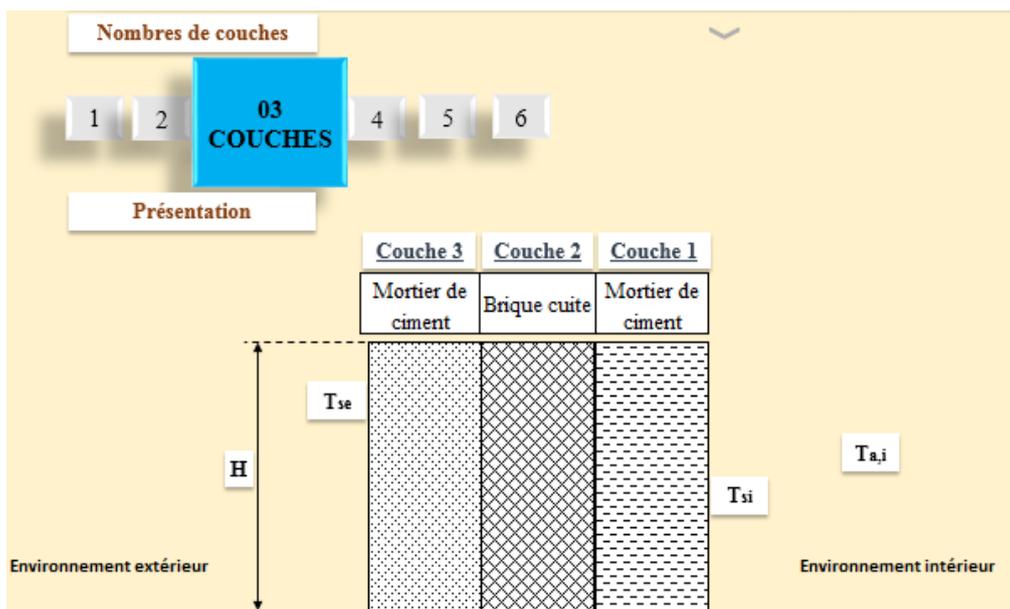


Figure 42 : Représentation de la structure du composant dans l'outil de calcul.

VI.1.3.3- Insertion des données pour les calculs

En dessous du schéma de présentation se trouve le bouton **DONNEES** qui sert à insérer les données requises pour les calculs. En cliquant sur ce bouton, on aboutit sur les champs de la figure 43 suivante.

03 COUCHES

Insérer les conditions aux limites

Tai [C]	Tse [C]	Ta,i [C]	Vvent [m/s]	σ_0 [W/m ² K ⁴]	ϵ_i	ϵ_e	Δr	H [m ²]
22,06	23,76	21,6	1,03	5,67E-08	0,9	0,9	0,46	1

Insérer les données de la couche n°1

Type de Matériau	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Cp [J/kgK]	d [m]	δ	ξ	A	B
rtier de ciment	1860	0,98	840	0,01	0,131373863	0,076118642	0,067027	7,45962689

Insérer les données de la couche n°2

Type de Matériau	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Cp [J/kgK]	d [m]	δ	ξ	A	B
Brique cuite	1400	0,54	900	0,33	0,108593456	3,03885715	0,100549	4,972675336

Insérer les données de la couche n°3

Type de Matériau	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Cp [J/kgK]	d [m]	δ	ξ	A	B
rtier de ciment	1860	0,98	840	0,01	0,131373863	0,076118642	0,067027	7,45962689

Insérer la période de variation

P [s]
86400

Rugosité		Rugueuse
m	n	p
1,09	0,23	1

hci	0,35947
hce	10,6021
hri	5,24344
hre	5,3346
hi	5,60291
he	15,9367
Rsi	0,17848
Rse	0,06275
Rth	0,87275
U	1,14581

Figure 43 : Champs d'insertion des données dans l'outil de calcul.

On trouve les champs d'insertion des conditions aux limites du composant. A savoir les données de température, la vitesse du vent, etc.

Il y a aussi les champs d'entrée des données thermophysiques de chaque couche qui commence par la première couche et ainsi de suite. Rappelons qu'elle est la couche la plus interne.

Sans oublier le champ d'insertion de la période de variation pour laquelle l'étude est réalisée. Et aussi celle des coefficients (m , n , et p) liés à la rugosité du composant pour calculer le coefficient d'échange convectif à l'extérieur.

Les cases à fond blanc signifient champ d'insertion et celles à fond gris sont des résultats de calculs.

VI.1.3.4- Affichage des résultats de calculs

En appuyant sur le bouton **CALCULS**, on obtient les résultats de calcul des caractéristiques thermiques dynamiques du composant suivant les démarches de calcul de la norme ISO 13786.

Admittances thermiques		Propriétés dynamiques de transfert thermique				
Yii [W/m ² K]	Yee [W/m ² K]	Yie [W/m ² K]	ΔtYie [s]	K1 [J/m ² K]	K2 [J/m ² K]	f [%]
3,503277567	5,504451445	0,209197475	42697,9567	50939,71119	78210,12773	18,257627



Figure 44 : Affichage des résultats dans l'outil de calcul.

Pour revenir aux champs d'insertion des données, on appuie sur le bouton « Accueil ». Pour revenir au menu précédent, cliquer sur le bouton représenté par , et pour aller au menu principal, appuyer sur le bouton .

VI.2 – MISE EN ŒUVRE SUR LES PAROIS MONOCOUCHE

VI.2.1 - Données requises pour les calculs

Elles comprennent les données relatives aux murs et à ses environnements. Il y a aussi la période de variation pour laquelle l'étude et les calculs sont effectués.

VI.2.1.1 - Données relatives aux parois monocouches étudiées

Les parois étudiées sont des murs plans monocouches, formés chacun d'un seul type de matériau. Il s'agit ici de la paroi 4 de la CBAC formée simplement de brique d'argile cuite et la paroi en terre crue battue. Les dimensions ainsi que les propriétés thermophysiques de ces parois constituent ces données. Les propriétés thermophysiques utilisées ici sont celles des matériaux obtenus dans le chapitre IV précédent (tableau 14). Leurs épaisseurs sont données sur le tableau 23 suivant.

Tableau 23 : Epaisseurs des parois monocouches utilisées lors des calculs dans ISO 13786.

Matériaux	Types de mur	Epaisseurs [cm]
Terre crue	Battue	40
Argile cuite	Brique cuite	33

VI.1.2.2 - Données microclimatiques

Les calculs sont lancés par les données réelles mesurées. C'est-à-dire que les données de température mesurées expérimentalement sont les paramètres d'entrée dans l'outil de calcul. Au cours des protocoles expérimentaux, on a procédé à deux séries de mesure. Les températures moyennes de surfaces interne et externe de chaque paroi sont visibles sur les tableaux suivants, pour une journée.

Tableau 24 : Températures moyennes journalières de la paroi 4 de CBAC.

Série de mesure	Date	Températures moyennes de surface		Température ambiante interne [°C]
		Extérieure [°C]	Intérieure [°C]	
1 ^{ère} série	05/05/2019	20,40	19,24	19,41
	06/05/2019	19,86	19,51	19,64
	07/05/2019	20,00	19,50	19,68
	08/05/2019	18,72	18,67	18,77
	09/05/2019	19,38	19,05	19,06
	10/05/2019	20,15	19,31	19,32
	11/05/2019	19,97	20,04	19,77
2 ^{ème} série	14/12/2019	25,54	24,04	21,19
	15/12/2019	24,54	23,82	21,14
	16/12/2019	22,99	23,19	21,89
	17/12/2019	22,13	22,98	21,18
	18/12/2019	21,35	22,52	20,97
	19/12/2019	21,88	22,23	21,11
	20/12/2019	22,54	22,64	21,60

Tableau 25 : Températures moyennes journalières de la paroi en terre crue battue.

Série de mesure	Date	Températures moyennes de surface		Température ambiante interne [°C]
		Extérieure [°C]	Intérieure [°C]	
1 ^{ère} série	13/05/2019	27,21	19,85	18,82
	14/05/2019	26,99	20,46	18,94
	15/05/2019	28,04	21,24	19,58
	16/05/2019	26,85	21,67	20
	17/05/2019	25,83	21,17	20
	18/05/2019	28,18	21,10	19,07
2 ^{ème} série	07/12/2019	27,46	21,84	21,20
	08/12/2019	26,51	22,03	21,39
	09/12/2019	24,71	21,72	21,42
	10/12/2019	23,74	21,22	20,95
	11/12/2019	25,07	20,87	20,36
	12/12/2019	25,50	20,97	20,49
	13/12/2019	24,80	20,82	20,46

Ces valeurs sont insérées dans l'équation (II-45) pour calculer les coefficients d'échanges par rayonnement sur la paroi. Et les valeurs des coefficients d'échanges convectifs sur les faces interne et externe des parois sont déterminées à l'aide des formules (I-4) et (I-5), proposées respectivement par *Churchill* et par *McAdams* (paragraphe I.1.2.1). Notons que la température ambiante interne représente la moyenne des températures ambiantes à l'intérieur de la cellule de mesure.

La vitesse moyenne du vent est déterminée à l'aide de l'échelle de *Beaufort* [144]. Dans notre cas, nous avons constaté au cours des jours de mesure que le vent est souvent calme pendant la deuxième série de mesure. Et pendant la première série, il est de petite brise.

D'après l'échelle de *Beaufort*, on peut prendre donc une vitesse moyenne égale à $4,4 \text{ m.s}^{-1}$ durant la première série de mesure et $1,03 \text{ m.s}^{-1}$ pendant la deuxième.

VI.2.2 – Calcul de la transmittance thermique U

Elle est calculée conformément à la norme ISO 6946 [84] sans tenir compte des ponts thermiques sur le composant pour la cohérence avec le calcul des caractéristiques thermiques dynamiques selon ISO 13786. En régime permanent, la transmittance thermique U est donnée par la formule suivante :

$$U = \frac{1}{R_{th}} \quad (\text{VI-1})$$

Où R_{th} est la résistance thermique du composant donnée par la formule (VI-2) suivante, selon la norme ISO 6946 [84] pour un composant homogène monocouche d'épaisseur d .

$$R_{th} = \frac{1}{h_i} + \frac{d}{\lambda_{\acute{e}q}} + \frac{1}{h_e} \quad (\text{VI-2})$$

VI.3 – MISE EN ŒUVRE SUR LES PAROIS MULTICOUCHES

D'après la méthodologie de la norme internationale ISO 13786, les démarches de calculs sont aussi d'application sur des composants plans multicouches des bâtiments. Cette partie est donc une application des démarches de la norme sur les enveloppes multicouches de la cellule en brique cuite.

VI.3.1 - Données requises pour les calculs

Comme dans la mise en œuvre sur les parois monocouches, elles comprennent les données relatives aux murs, les données de température et la période de variation pour laquelle l'étude et les calculs sont effectués. Les données requises pour effectuer les calculs sont celles relatives aux différentes couches de l'enveloppe et celles des conditions aux limites.

VI.3.1.1 - Données relatives aux parois multicouches étudiées

Les composants étudiés sont des murs plans verticaux formés de plusieurs couches différentes. Il s'agit ici des parois en brique d'argile cuite avec des couches de mortier de ciment.

Elles sont composées plus d'une couche de matériaux qu'on peut les considérer comme des parois multicouches. Les données requises pour effectuer les calculs sont celles relatives aux différentes couches de chaque mur. Elles comprennent donc l'épaisseur et les propriétés

thermophysiques de chaque couche, données sur le tableau 26 suivant. La longueur caractéristique de chaque mur est égale à 1m^2 .

Tableau 26 : Données des parois multicouches utilisées lors des calculs dans ISO 13786.

Matériaux	Epaisseurs [cm]	Masse volumique [kg.m^{-3}]	Conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]	Chaleur spécifique [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
Mortier de ciment	1	1860	0,98	840
Argile cuite	33	1400	0,54	900

VI.3.1.2 - Données microclimatiques

Les valeurs des températures de surfaces et de l'ambiance intérieure insérer dans l'outil de calcul ISO 13786, pour les trois parois multicouches, sont affichées sur les tableaux suivants.

Tableau 27 : Températures moyennes journalières de la paroi 1 de CBAC.

Série de mesure	Date	Températures moyennes de surface		Température ambiante interne [°C]
		Extérieure [°C]	Intérieure [°C]	
1 ^{ère} série	05/05/2019	20,41	19,74	19,41
	06/05/2019	20,61	20,16	19,64
	07/05/2019	20,08	20,23	19,68
	08/05/2019	18,82	19,36	18,77
	09/05/2019	18,83	19,50	19,06
	10/05/2019	18,91	19,69	19,32
	11/05/2019	19,79	20,17	19,77
2 ^{ème} série	14/12/2019	28,79	24,09	21,19
	15/12/2019	25,36	23,24	21,14
	16/12/2019	24,89	22,72	21,89
	17/12/2019	25,12	22,89	21,18
	18/12/2019	22,88	22,40	20,97
	19/12/2019	24,45	21,54	21,11
	20/12/2019	24,65	22,95	21,60

Tableau 28 : Températures moyennes journalières de la paroi 2 de CBAC.

Série de mesure	Date	Températures moyennes de surface		Température ambiante interne [°C]
		Extérieure [°C]	Intérieure [°C]	
1 ^{ère} série	05/05/2019	23,23	20,37	19,41
	06/05/2019	24,67	21,04	19,64
	07/05/2019	24,77	21,63	19,68
	08/05/2019	22,95	20,87	18,77
	09/05/2019	21,55	20,71	19,06
	10/05/2019	22,01	20,39	19,32
	11/05/2019	24,95	21,27	19,77

Série de mesure	Date	Températures moyennes de surface		Température ambiante interne [°C]
		Extérieure [°C]	Intérieure [°C]	
2 ^{ème} série	14/12/2019	26,95	22,69	21,19
	15/12/2019	25,60	22,22	21,14
	16/12/2019	24,94	21,65	21,89
	17/12/2019	24,82	21,58	21,18
	18/12/2019	23,58	21,61	20,97
	19/12/2019	23,68	21,82	21,11
	20/12/2019	23,76	22,06	21,60

Tableau 29 : Températures moyennes journalières de la paroi 3 de CBAC.

Série de mesure	Date	Températures moyennes de surface		Température ambiante interne [°C]
		Extérieure [°C]	Intérieure [°C]	
1 ^{ère} série	05/05/2019	22,06	26,00	19,41
	06/05/2019	22,08	26,52	19,64
	07/05/2019	20,98	26,69	19,68
	08/05/2019	20,35	25,78	18,77
	09/05/2019	20,87	26,23	19,06
	10/05/2019	21,67	26,23	19,32
	11/05/2019	23,18	26,95	19,77
2 ^{ème} série	14/12/2019	25,14	23,38	21,19
	15/12/2019	24,36	22,70	21,14
	16/12/2019	23,15	22,51	21,89
	17/12/2019	22,46	22,26	21,18
	18/12/2019	21,55	21,86	20,97
	19/12/2019	22,12	21,77	21,11
	20/12/2019	23,38	22,25	21,60

Elles représentent les moyennes au cours des jours de campagne de mesure. Elles permettent d'obtenir les coefficients d'échanges convectifs ainsi que les coefficients d'échanges par rayonnement sur les surfaces de la paroi par l'utilisation des équations (I-4), (I-5) et (II-45).

La vitesse moyenne du vent prise est égale à 4,4 m.s⁻¹ et 1,03 m.s⁻¹ respectivement durant la première et la deuxième série de mesure, comme dans la mise en œuvre sur les composants monocouches.

VI.3.2 – Calcul de la transmittance thermique U

Selon ISO 6946 [84], les transmittances thermiques U en régime permanent des parois multicouches sont données par les formules suivantes :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_m}{\lambda_m} + \frac{d}{\lambda_{\text{éq}}} + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{VI-3})$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_m}{\lambda_m} + \frac{d}{\lambda_{\epsilon q}} + \frac{d_m}{\lambda_m} + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{VI-4})$$

Où les relations (VI-3) et (VI-4) correspondent respectivement à la transmittance thermique des parois à deux couches et la paroi à trois couches. d_m et λ_m sont respectivement l'épaisseur et la conductivité thermique du mortier de ciment.

CONCLUSION

Dans le chapitre II précédent, nous avons présenté différentes méthodes d'étude du comportement thermique dynamique d'une paroi de bâtiment parmi lesquelles la norme internationale ISO 13786 a été développée. Des démarches de calculs sont exigées par cette norme pour arriver aux caractéristiques relatives au comportement thermique d'un composant de bâtiment qui permettent d'interpréter son inertie. Ici, le présent chapitre consistait à leurs mises en œuvre sur les parois des deux cellules de mesure expérimentales constituées principalement en terre crue battue (CTCB) et en brique d'argile cuite (CBAC). L'application se fait sur des composants mono et multicouches selon la structure des parois de la cellule. Les calculs ont été lancés avec les données réelles de températures de surfaces et ambiante des deux cellules au cours des jours des deux séries de mesure. Les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE VII – RESULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS

INTRODUCTION

Ce chapitre concerne la présentation des résultats ainsi que leurs analyses et discussions. Il est divisé en trois sections : la première nous montre les résultats obtenus après les mesures expérimentales. La deuxième comprend les résultats et rapports de calcul de la norme ISO 13786. Une analyse comparative des résultats expérimentaux et théoriques clôt ce chapitre dans la troisième section.

VII.1 – RESULTATS DE MESURES EXPERIMENTALES

Les travaux d'investigations entrepris lors du protocole expérimental pour réaliser les mesures in situ de l'inertie thermique journalière de quelques parois sont déjà présentés dans le chapitre V précédent. Maintenant, on va présenter l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

VII.1.1 - Conformité des données relevées par les capteurs

Après la vérification et l'étalonnage des huit capteurs DS18B20, pendant une durée de douze heures, on a obtenu les résultats illustrés par les figures suivantes.

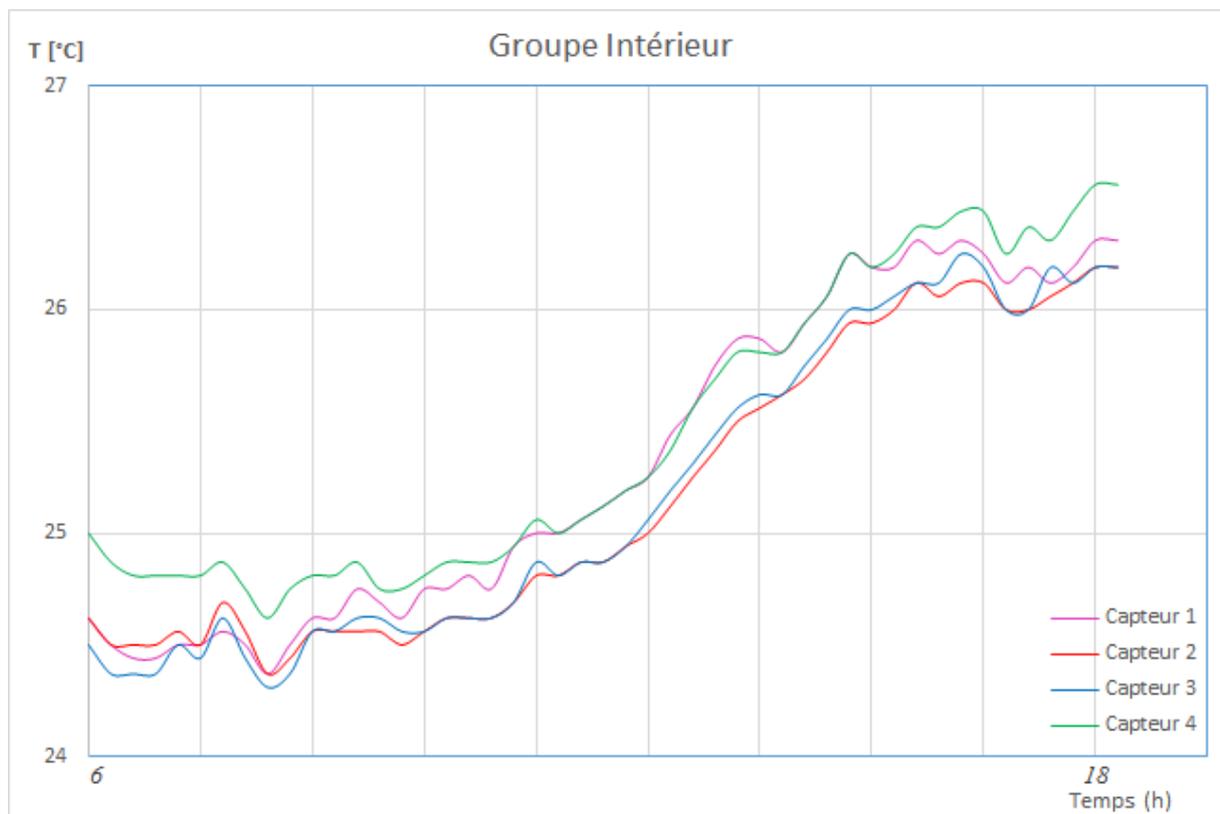


Figure 45 : Résultats de l'étalonnage des capteurs du groupe intérieur.

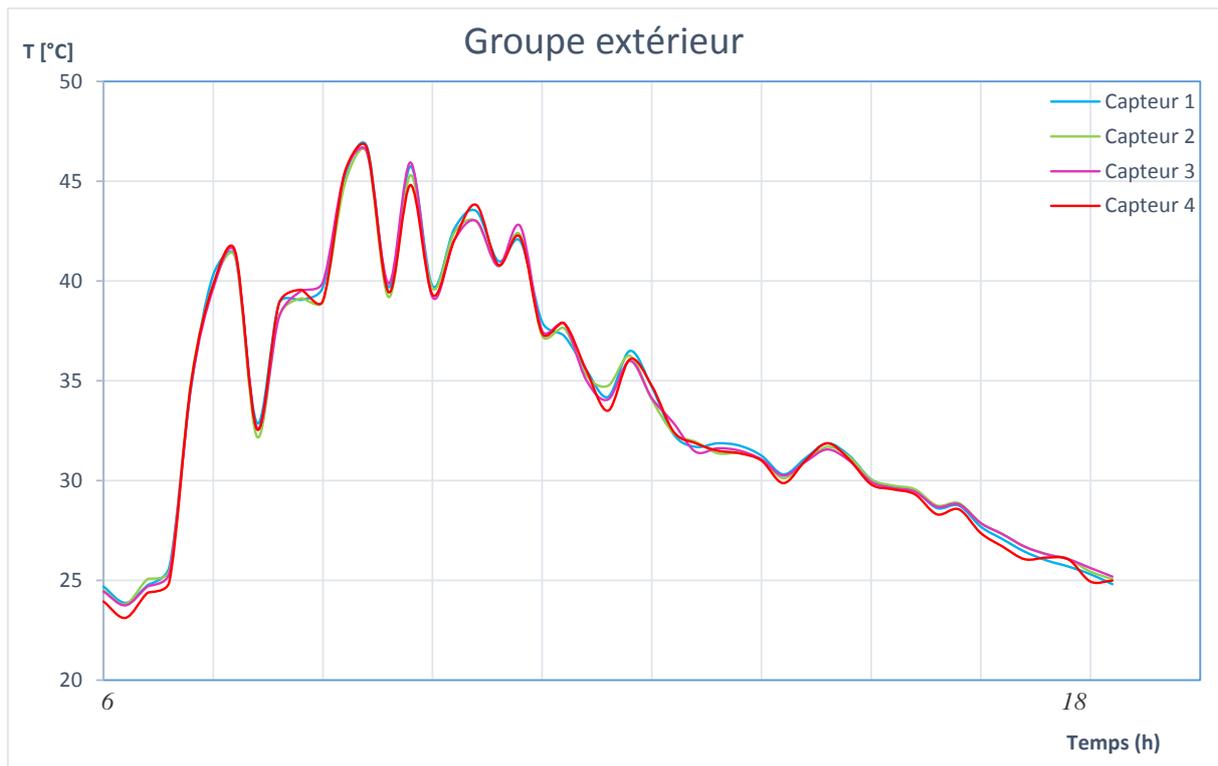


Figure 46 : Résultats de l'étalonnage des capteurs du groupe extérieur.

Les deux figures 45 et 46 représentent l'évolution de la température lors de l'étalonnage des capteurs DS18B20, respectivement sur les faces intérieure et extérieure d'une paroi de bâtiment. Les courbes nous montrent que les valeurs recueillies par les capteurs du même groupe ne sont pas exactement égaux. La précision analogique du capteur DS18B20 est principalement à l'origine de cette différence. Cependant, l'allure des courbes suit la même dynamique. Nous avons donc calculé les écarts moyens entre les valeurs obtenues puis comparé ces derniers avec la précision prescrite par le constructeur de ce type de sonde (figure 47).

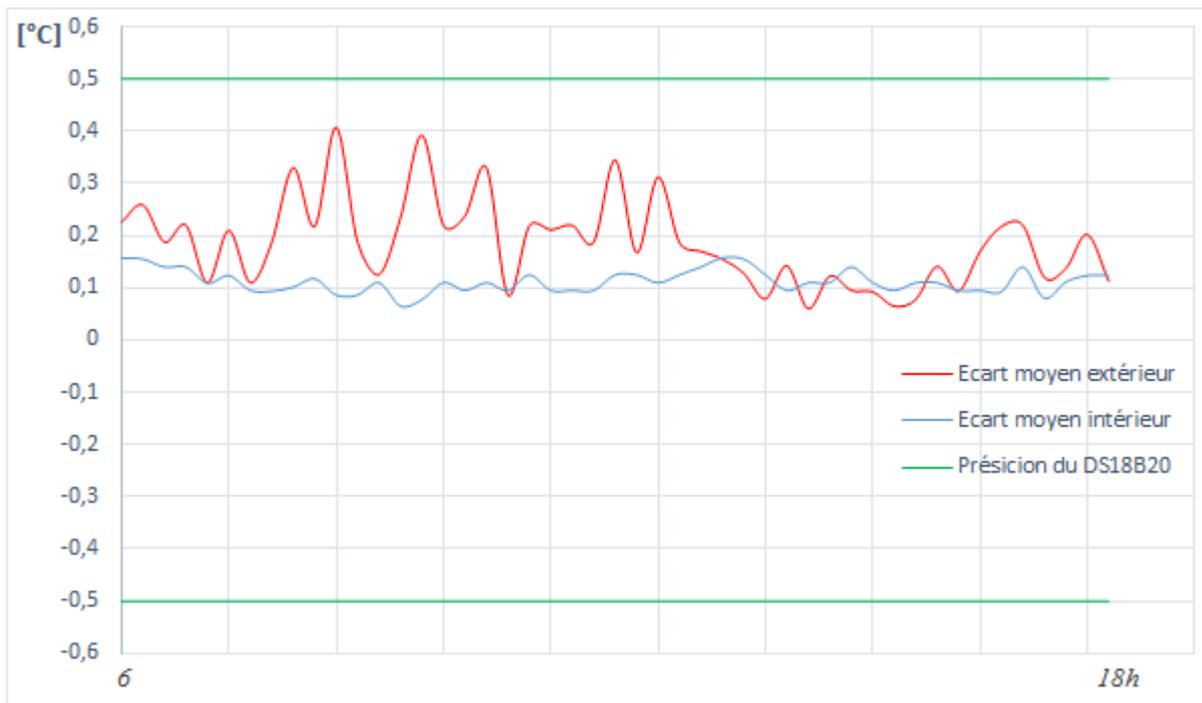


Figure 47 : Ecart moyen des résultats lors de l'étalonnage du DS18B20.

L'étude des écarts moyens entre les valeurs enregistrées par les capteurs nous permet d'évaluer les incertitudes de mesure. Les deux courbes, en bleue et rouge, de la figure 47 nous montrent les variations des écarts entre les valeurs prises par les capteurs respectivement du groupe intérieur et extérieur. Elles sont faibles pour le groupe intérieur, comprises entre 0,065 à 0,16°C, par rapport à celles du groupe extérieur qui varient de 0,06 à 0,41°C. Ceci est dû aux effets convectifs engendrés par l'environnement extérieur sur les capteurs, qui sont plus significatifs à la surface extérieure qu'à l'intérieure. Pourtant, on relève que les écarts moyens de températures enregistrées à l'intérieure et à l'extérieure n'excèdent pas la précision du dispositif indiquée qui est de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ pour une plage de température entre -10°C à $+85^\circ\text{C}$. Il n'est pas donc nécessaire de procéder à des corrections aux valeurs enregistrées par l'un quelconque des capteurs.

VII.1.2 – Courbes de variation des températures de surfaces

Voici les courbes qui représentent la variation journalière des températures de surfaces (intérieures et extérieures) des parois des cellules CTCB et CBAC au cours des campagnes de mesure.

VII.1.2.1 – Température de surfaces de la cellule de mesure CBAC

Les résultats pour les deux séries de mesure sont affichés sur les différentes figures suivantes. Rappelons qu'elle est formée de quatre parois distinctes, nous avons donc quatre figures.

VII.1.2.1.1 - Sur la paroi 1

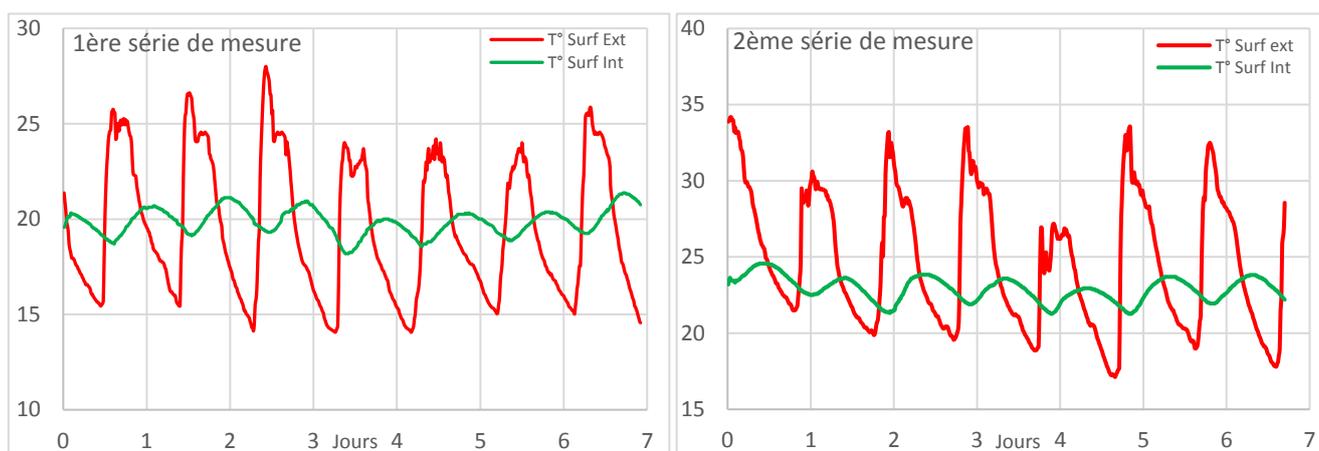


Figure 48 : Courbes de températures de surfaces de la paroi 1 de CBAC.

Un revêtement de 1cm de mortier de ciment est appliqué sur la surface intérieure de cette paroi. Elle reçoit le rayonnement solaire durant la matinée. Tous les jours, sa température extérieure commence à monter vers 06h 15mn, atteint la maximale vers 10 à 11h 30mn et commence à chuter vers midi. Les valeurs maximales et minimales de températures externe et interne dans la première série de mesure sont inférieures à celles de la deuxième série. Elles oscillent respectivement dans les fourchettes [24°C , 28°C] et [14°C , 16°C] sur l'extérieur et [20°C , 21°C] et [18°C , 19,5°C] sur l'intérieur.

VII.1.2.1.2 - Sur la paroi 2

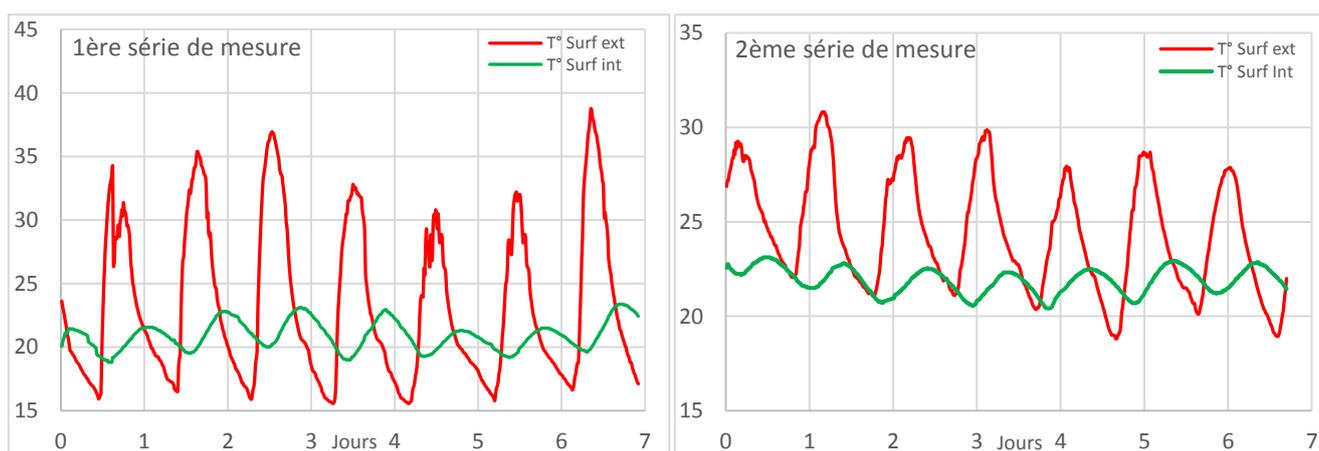


Figure 49 : Courbes de températures de surfaces de la paroi 2 de CBAC.

Cette paroi est couverte de mortier de ciment, de 1cm d'épaisseur, sur les deux faces. Pendant la première série de mesure, sa température maximale extérieure est élevée car elle est la plus longtemps exposée au rayonnement de soleil. Chaque jour, elle commence à monter vers 06h 15mn environ la matinée et ne descend qu'à partir de 15h l'après-midi. Au cours des jours de

campagne de mesure, les valeurs maximales enregistrées à l'extérieur sont élevées dans la première série par rapport à la deuxième. Et inversement pour les valeurs minimales. On constate également que les valeurs extrémales de température intérieure sont différentes. Elles oscillent dans les fourchettes de [22°C à 23°C] et [20,5°C à 21,5°C] dans la deuxième série si entre [21°C à 22°C] et [18,8°C à 20°C] dans la première.

VII.1.2.1.3 - Sur la paroi 3

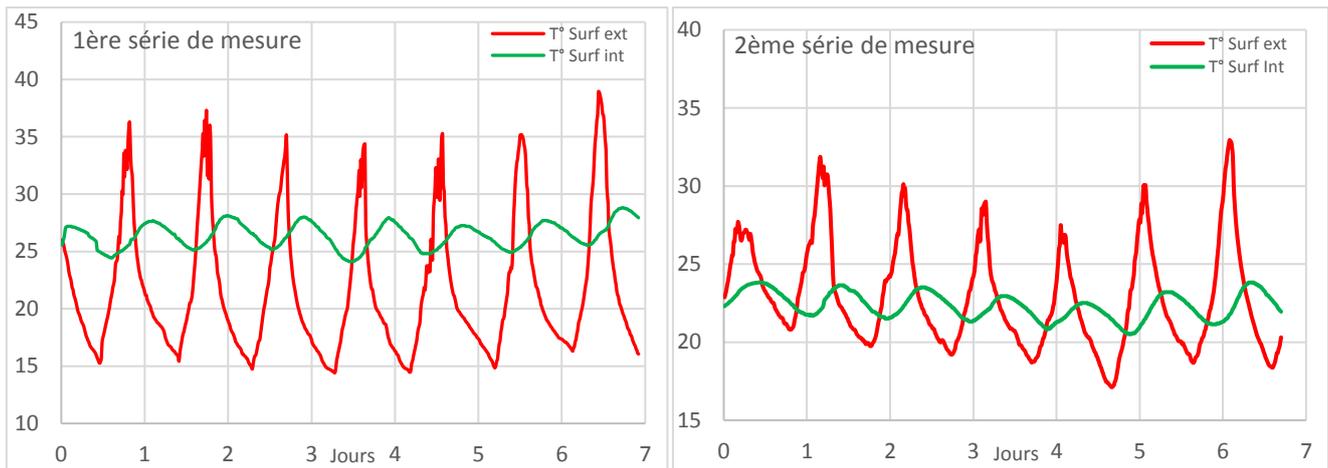


Figure 50 : Courbes de températures de surfaces de la paroi 3 de CBAC.

La paroi 3 est identique à la paroi 1, une couche de 1cm de mortier est posée sur la face interne. Du fait de son emplacement, sa face extérieure ne reçoit le rayonnement solaire qu'à partir du midi. Sa température commence à augmenter à environ 13h et descend vers 16h 30mn du soir après avoir atteint la valeur maximale. Une différence entre les extrémums est constatée dans les deux séries de mesure. La première série de mesure est caractérisée par des valeurs maximales élevée mais minimales faible à l'extérieur. Contrairement à la paroi 2, les températures maximales et minimales de la surface intérieure dans la deuxième série de mesure sont inférieures par rapport à la première.

VII.1.2.1.4 - Sur la paroi 4

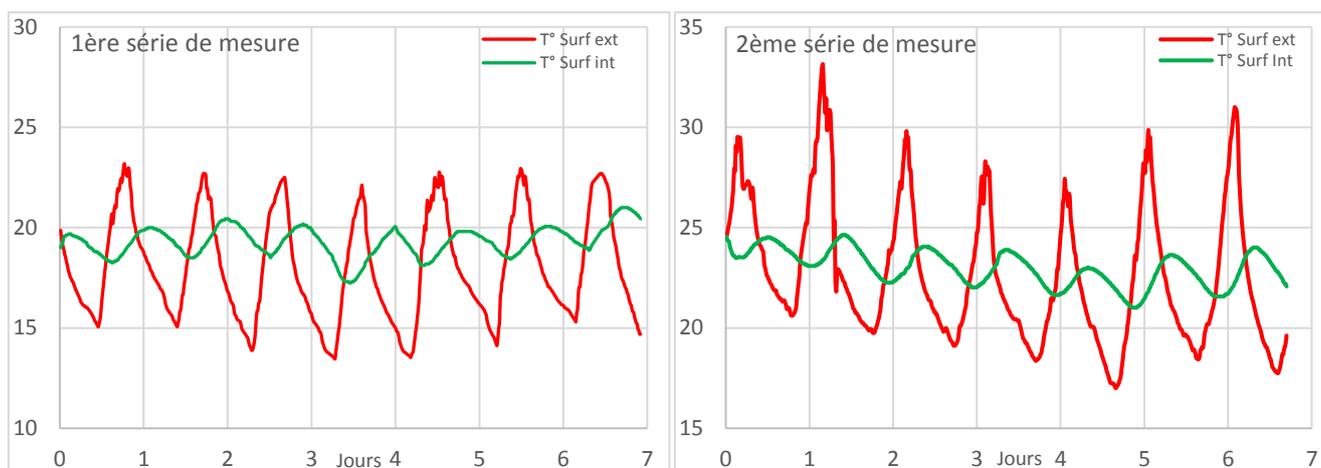


Figure 51 : Courbes de températures de surfaces de la paroi 4 de CBAC.

Contrairement à la paroi 2, la paroi 4 ne dispose aucun revêtement sur ses deux faces. Durant la première série de mesure, elle est la paroi qui reçoit le plus faible rayonnement solaire. En effet, à cause de son emplacement, elle n'est jamais exposée au soleil toute la journée. Les valeurs maximales de sa température extérieure n'atteignent que 21,7°C à 23°C au cours des jours de mesure. Et c'est pourquoi la température minimale de sa surface extérieure atteint une valeur très basse par rapport à celles des autres parois. Dans la deuxième série de mesure, les températures maximales extérieure ont augmenté. Ses valeurs oscillent entre 26,8°C à 33°C. Par conséquent on voit clairement l'augmentation de celles de l'intérieure qui varient entre 21°C à 24,4°C. Les valeurs de la température minimale extérieure ont augmenté par rapport à la première série.

VII.1.2.2 - *Température de surfaces de la cellule de mesure CTCB*

On présente dans ce paragraphe la variation de la température sur les faces d'une paroi de la cellule construit avec de la terre crue battue (figure 52). Cette cellule de mesure est formée de quatre parois de même épaisseur, de même constitution et de même structure, alors une seule paroi a été utilisée pour mener les mesures. La paroi de même emplacement que la paroi 2 de la cellule CBAC a été prise en compte. Elle est longtemps exposée au soleil donc elle reçoit beaucoup plus de rayonnement solaire. Des fortes valeurs maximales de la température externe sont enregistrées à chaque journée durant les deux séries de mesure, dans les fourchettes [28°C à 38°C]. Cependant, on constate que la température de la surface intérieure présente une très faible amplitude. Elle est presque aplatie, ce qui traduit des écarts minimes entre les

températures extrémales. Ceci tranche avec ce qu'on observe dans le cas des parois 2 et 4 de la CBAC. Il y a donc une forte atténuation de la température de la surface extérieure.

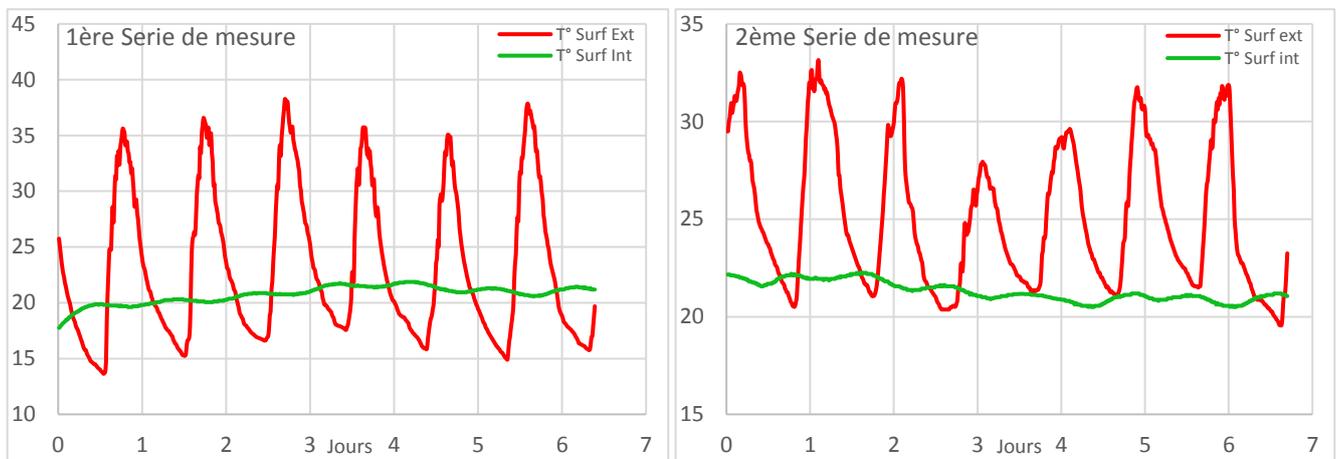


Figure 52 : Courbes de températures de surfaces de la paroi de CTCB.

L'allure des courbes représentant les variations de la température de surfaces extérieures et intérieures des parois des deux cellules, en fonction du temps, dénote un régime périodique établi. Pour les surfaces externes, les fluctuations des extrema sont directement induites par les variations des valeurs minimales et maximales de la température ambiante au cours des jours de campagne de mesure. Ainsi, les valeurs enregistrées varient différemment sur chaque paroi à chaque journée. On relève également de différence entre les temps séparant les maxima chaque jour. Il y a aussi un déphasage et un amortissement en amplitude entre les valeurs maximales de température des faces externe et interne de chaque paroi qu'on déterminera dans le paragraphe suivant.

VII.1.3 - Courbes de variation de la température ambiante intérieure

Les valeurs mesurées par le capteur DHT11, pour les deux cellules au cours des deux séries de mesure, sont représentées dans ce paragraphe.

VII.1.3.1 - Température ambiante à l'intérieur de la cellule de mesure CBAC

Au cours des jours de campagne de mesure, la variation de la température ambiante T_a à l'intérieur de cette cellule peut être assimilée à une fonction en escalier présentant des paliers qui ne s'étalent que sur une demi-journée (figure 53). Les paliers de température ambiante intérieure du CBAC sont respectivement 18°C à 22°C dans la première série ; et de 20°C à 22,5°C dans la deuxième.

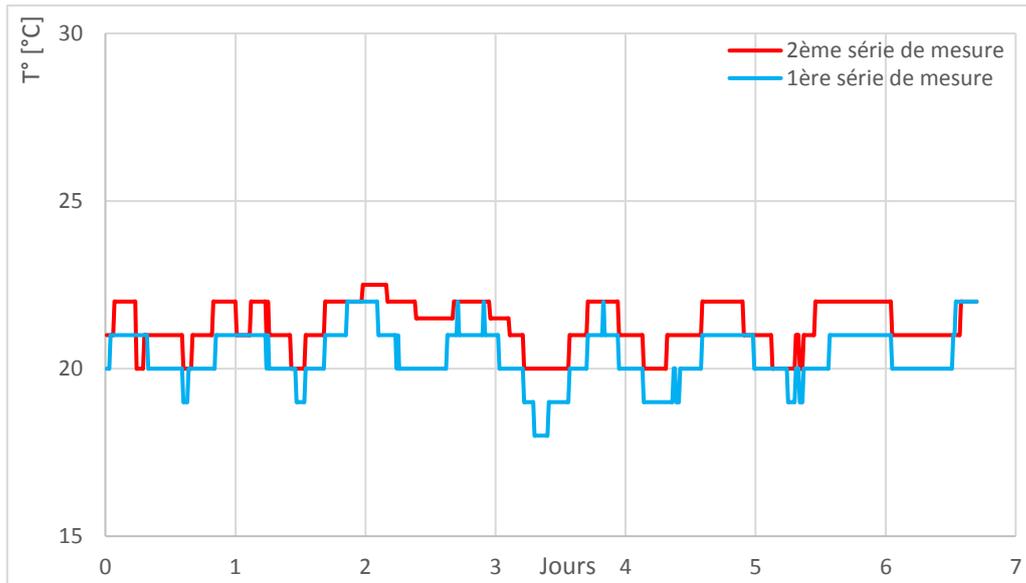


Figure 53 : Courbes de température ambiante à l'intérieur de la cellule CBAC.

VII.1.3.2 - Température ambiante à l'intérieur de la cellule de mesure CTCB

L'ensemble des données collectées est donné sur les deux courbes de la figure 54 suivante.

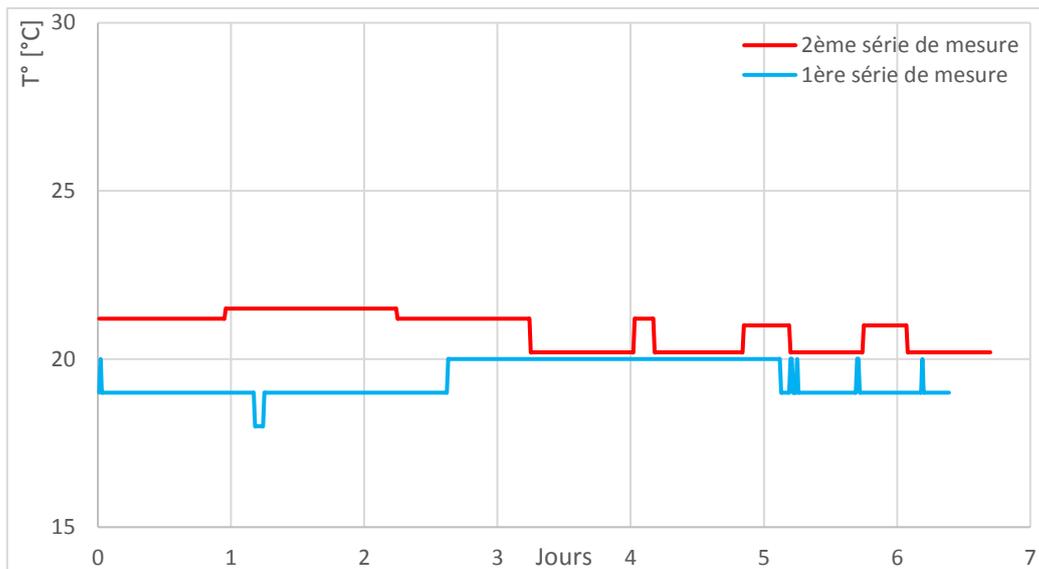


Figure 54 : Courbes de température ambiante à l'intérieur de la cellule CTCB.

Contrairement à la CBAC, la température ambiante à l'intérieur de la CTCB est approximativement stable au cours des périodes de mesure avec des phases décalées des pics de jour. La variation peut être assimilée à une fonction en escalier présentant des paliers constants par tranche de temps de deux jours et demi à trois jours sur la période de mesure. Dans la première série de mesure, les paliers sont de 19°C et de 20°C. Dans la deuxième série, ils sont de 20,2°C et 21,5°C.

Dans chaque cellule de mesure, la variation de la température ambiante intérieure est directement affectée par la variation des températures de surface interne des parois. Les paliers de la variation à l'intérieur de la CTCB sont inférieurs à celle de la CBAC. On en déduit que la température ambiante interne de la CBAC moins stable dans le temps, est plus impactée par les fluctuations extérieures que celle de la CTCB. C'est-à-dire que la variation de la température interne dans la CTCB est moins ressentie que dans la CBAC.

VII.1.4 – Valeurs du déphasage thermique

Compte tenu des deux séries de mesure, on présente sur les figures suivantes les déphasages thermiques journaliers des parois durant les jours de campagne de mesure.

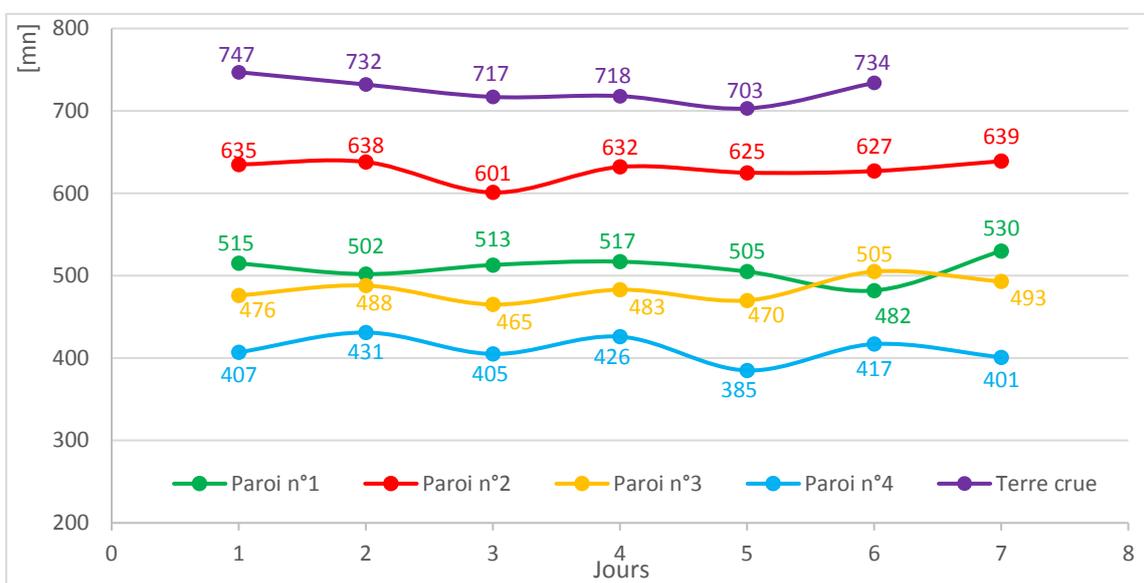


Figure 55 : Déphasages thermiques journaliers lors de la 1ère série de mesure.

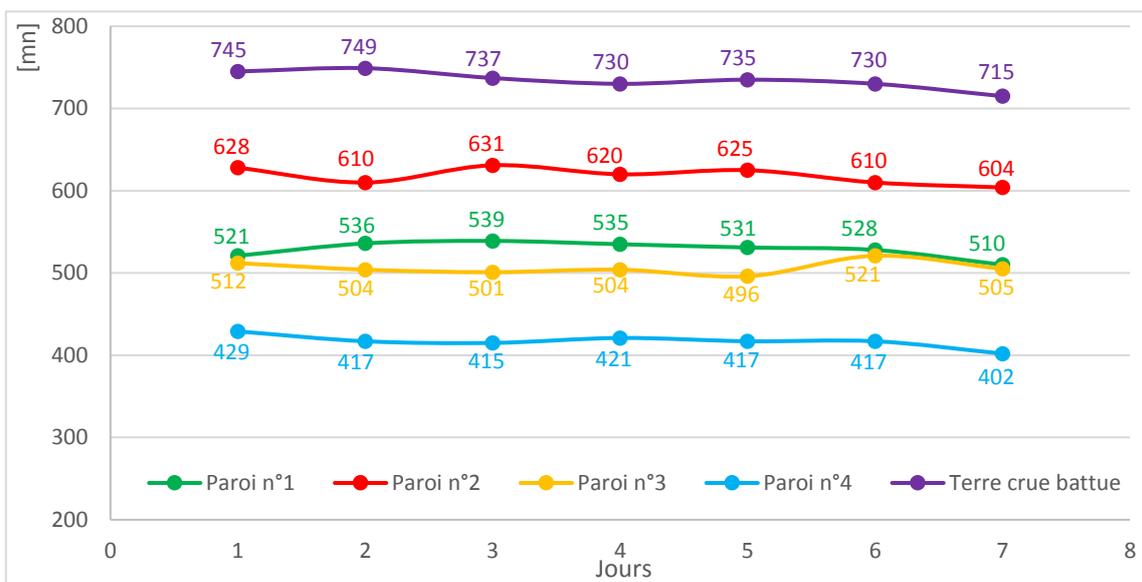


Figure 56 : Déphasages thermiques journaliers lors de la 2ème série de mesure.

La différence de temps d'apparition des maxima de température de surface extérieure et celle de l'intérieure au cours des jours de campagne de mesure sont l'origine probable de la variation des valeurs du déphasage thermique sur chaque paroi étudiée. On trouve que dans les deux séries de mesure, le classement des parois suivant les valeurs de leurs déphasages thermiques journaliers est égal. Rappelons que les valeurs indiquées sur les courbes représentent l'intervalle de temps (en minute) séparant le moment où la température des surfaces extérieure et intérieure de la paroi est maximale. Plus elle est grande, plus le temps d'apparition du maximum de température sur la surface intérieure est long. Il y a donc un retard important.

VII.1.5 – Valeurs du facteur d'amortissement

Les figures 57 et 58 suivantes nous montrent les facteurs d'amortissement journaliers des parois au cours des deux séries de mesure. Ils sont obtenus directement à partir des valeurs extrémales journalières des températures de surfaces.

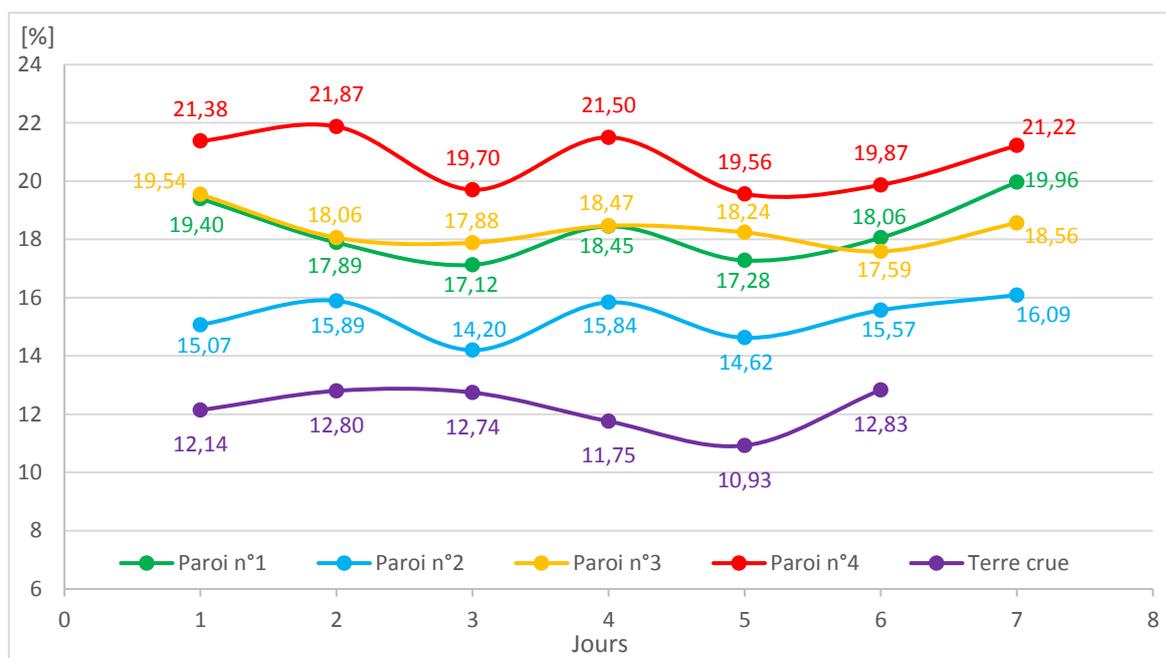


Figure 57 : Facteurs d'amortissement journaliers lors de la 1ère série de mesure.

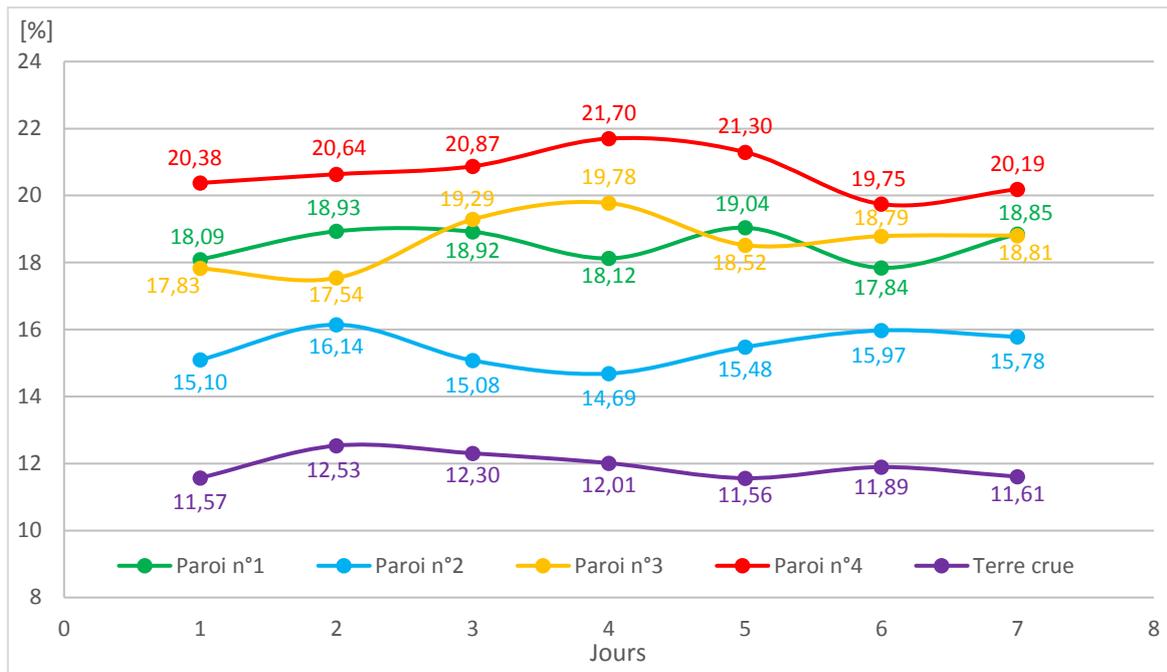


Figure 58: Facteurs d'amortissement journaliers lors de la 2ème série de mesure.

Les valeurs indiquées sur les figures représentent le taux des fluctuations thermiques extérieures transmis à la surface intérieure du mur. Alors, plus il est faible, plus la température transmise à l'intérieure est aussi faible. Une grande quantité de chaleur est donc atténuée ou amortie par l'enveloppe extérieure.

Comme celui du déphasage thermique, la variation des valeurs du facteur d'amortissement journalier est aussi affectée par la variation journalière des températures maximale et minimale de surfaces intérieure et extérieure de la paroi.

VII.1.6 – Moyennes du déphasage et du facteur d'amortissement thermique

Au cours des deux séries de mesure, on a calculé différentes valeurs à partir des données journalières. Maintenant, on peut en déduire les moyennes du déphasage et du facteur d'amortissement thermique sur chaque paroi. Elles sont données à l'aide du tableau 30 suivant.

Tableau 30 : Déphasage thermique et facteur d'amortissement thermique moyens.

Cellules	Parois	Type de revêtement	Revêtement interne	Revêtement externe	Δt [h]	f [%]
CTCB	Terre crue battue	Mortier de terre crue	0,5cm	0,5cm	12,17	12,09
CBAC	Paroi 1	Mortier de ciment	1cm	---	8,57	18,43
	Paroi 2		1cm	1cm	10,40	15,39
	Paroi 3		1cm	---	8,36	18,49
	Paroi 4		---	---	7,00	20,71

A partir des valeurs moyennes de Δt et de f sur ce tableau, on peut évaluer l'inertie thermique des parois qui caractérise leur comportement thermique dynamique.

VII.1.7 - Analyses et discussions des résultats

Tout d'abord, on remarque que l'enveloppe ayant un déphasage thermique élevé présente un facteur d'amortissement faible. Et inversement un déphasage faible est associé à un facteur d'amortissement f grand (Cf. Tableau 30). Nos résultats, comme tous ceux rapportés dans la littérature, concordent avec cette corrélation directe entre les deux paramètres, corrélation reconnue universellement [64] [94] [140].

La paroi en terre crue battue de 40cm d'épaisseur présente un déphasage thermique de 12,17h et un facteur d'amortissement journalier égal à 12,09%. Ceci signifie que la température de la surface intérieure est maximale 12 heures après que les pics de température de la face extérieure aient été atteints. Ces derniers ont été relevés entre 12h30mn et 13h30mn au cours des jours de mesure. Ceux de la surface intérieure sont enregistrés entre 00h à 02h du matin. À ces instants, l'amplitude de la température de la face interne ne représente que 12,09% de celle de la face externe de la paroi, une réduction significative.

Les murs en briques d'argile cuite d'épaisseur 33cm se caractérisent par des retards nettement moins importants et, donc, des facteurs d'amortissement plus conséquents. Seul celui enduit sur les deux faces présente des valeurs proches de celles du mur en terre crue battue. L'épaisseur et la masse volumique des matériaux mis en œuvre sont probablement à l'origine de cette différence. En effet, ces deux grandeurs sont très fortement liées à l'inertie thermique d'une paroi et plusieurs auteurs l'ont attesté. La plus probante est une corrélation linéaire. En outre, il a été prouvé que l'épaisseur est plus déterminante que la nature même du matériau du composant [95] [96] [97] [100].

L'effet de la masse a été démontré lors des calculs du déphasage thermique et le facteur d'amortissement pour deux enveloppes de bâtiment de masse volumique différente mais de résistance thermique égale [64]. Ils en ont déduit que la paroi légère atténue moins les variations des fluctuations thermiques extérieures que la paroi lourde.

Les enduits de mortier de ciment ont augmenté les épaisseurs totales des murs de la CBAC. Les valeurs obtenues (Cf. Tableau 30) prouvent bien que le déphasage augmente avec l'épaisseur. Par ailleurs, les masses des parois se trouvent accrues avec les revêtements. L'effet conjugué d'une épaisseur et d'une masse moins importantes explique pourquoi la paroi 4 transmet rapidement les pics de températures qui seront faiblement amortis.

Nous regroupons dans le tableau 31 quelques résultats d'études conduites sur des murs de différentes épaisseurs assortis des méthodes de détermination.

Tableau 31: Déphasage et facteur d'amortissement de quelques exemples de murs

Références Site – Saison	Nature des matériaux	Épaisseur des murs	(Δt ; f)	Méthode de détermination
(Asan H., 1998) [69].	Brique d'argile cuite	20cm	(7h ; 15%)	Résolution numérique par différences finies de l'équation de transfert de chaleur
(Fayçal F. et al., 2015) Nord de la France – Été [97]	Brique d'argile non cuite	40cm	(10h ; 20%)	Relevés de températures des surfaces externes et internes d'un bâtiment expérimental
(Toure P. et al., 2019) Sénégal [141]	Brique de terre stabilisée avec du ciment	14cm	(6h ; 40%)	Mesure de températures sur une cellule de mesure de 1m ³

Bien que les matériaux ne soient pas de même nature et les méthodes de détermination différentes, il ressort de l'analyse globale des tableaux 30 et 31 qu'effectivement, l'épaisseur prime sur d'autres considérations, une valeur élevée étant synonyme de déphasage important. Seule la paroi 4 épaisse de 33cm de notre cellule expérimentale CBAC semble infirmer cette règle. Son déphasage est identique à celui des murs de briques d'argile cuite de 20cm sur lesquels *Asan* [69] a entrepris des travaux d'investigation. Dans notre cas, les briques sont fabriquées de façon artisanale, donc moins denses que les briques produites industriellement. Par ailleurs, les écarts entre les paramètres d'inertie thermique de nos murs en terre crue battue et ceux en brique d'argile non cuite pourtant de même épaisseur 40cm, sont relativement importants. Les masses volumiques des matériaux ainsi les dispositifs pourraient être à l'origine de ces décalages.

L'effet de l'emplacement d'une couche de revêtement ou d'isolation sur une paroi massive en brique ou béton a été déjà démontré [69] [106] [142] [143]. Dans notre cas, les résultats montrent que l'application d'une couche de 1cm de mortier de ciment sur l'une des faces et sur les deux à la fois améliore considérablement l'inertie thermique du mur en brique cuite. Dans le tableau 30, l'inertie thermique la plus faible relève que la paroi 4 en brique cuite sans aucun revêtement présente une inertie thermique la plus faible par rapport aux trois autres. Cela signifie que les pics de température de l'extérieur seront rapidement transmis à l'intérieur de cette paroi.

VII.2 – RESULTATS DES DEMARCHES DE LA NORME ISO 13786

VII.2.1 - Rapports et résultats des calculs pour les parois monocouches

VII.2.1.1 – Description du composant et identification des matériaux

Les calculs ont été effectués conformément aux procédures de calcul stipulés par la norme internationale ISO 13786 (paragraphe II.3.3). Les composants étudiés sont des murs plans verticaux, enveloppe extérieure de cellules de mesure dont ses faces sont en contact avec des perturbations thermiques sinusoïdales à l'extérieur et à l'intérieur. Les travaux d'investigation se portent sur deux types de mur constitués par les matériaux suivants : la terre crue battue et les briques d'argile cuite. Chaque mur est constitué d'une seule couche de matériau dont les caractéristiques physiques et thermiques ainsi que leurs épaisseurs sont données respectivement dans les tableaux 14 et 23 précédents. La longueur caractéristique H des deux murs est égale à $1m^2$.

VII.2.1.2 - La période de variation choisie

La période de variation considérée est de $P = 24h = 86400s$. En effet, on veut calculer les caractéristiques thermiques dynamiques journalières des parois. Au cas où les calculs sont effectués pour plusieurs périodes, il faut bien afficher les résultats fournis pour chaque période.

VII.2.1.3 - Les quatre éléments de la matrice de transfert de chaleur Z

Les quatre éléments de la matrice de transfert Z obtenus pour chaque mur sont affichés dans les tableaux suivants. Ils sont représentés par leurs modules et leurs arguments.

Tableau 32 : Eléments de la matrice de transfert pour la paroi 4 de CBAC.

Série de mesure	Date	Eléments de la matrice de transfert de chaleur Z							
		Z_{ii}		Z_{ie}		Z_{ei}		Z_{ee}	
		Mod	Arg	Mod	Arg	Mod	Arg	Mod	Arg
1 ^{ère} série	05/05/2019	11,64	3,14	3,59	-0,34	73,26	0,68	22,66	-2,79
	06/05/2019	11,64	3,14	3,59	-0,34	73,26	0,68	22,70	-2,79
	07/05/2019	11,64	3,14	3,58	-0,34	73,26	0,68	22,60	-2,79
	08/05/2019	11,64	3,14	3,62	-0,33	73,26	0,68	22,87	-2,79
	09/05/2019	11,64	3,14	3,64	-0,33	73,26	0,68	23,01	-2,79
	10/05/2019	11,64	3,14	3,64	-0,33	73,26	0,68	22,98	-2,79
	11/05/2019	11,64	3,14	3,54	-0,34	73,26	0,68	22,36	-2,80
2 ^{ème} série	14/12/2019	14,34	-3,00	3,63	-0,27	73,26	0,68	18,61	-2,87
	15/12/2019	14,35	-3,00	3,66	-0,26	73,26	0,68	18,77	-2,86
	16/12/2019	14,37	-3,00	3,98	-0,23	73,26	0,68	20,39	-2,83
	17/12/2019	14,39	-3,00	3,87	-0,24	73,26	0,68	19,78	-2,84
	18/12/2019	14,40	-3,00	3,94	-0,23	73,26	0,68	20,12	-2,84

	19/12/2019	14,39	-3,00	4,06	-0,22	73,26	0,68	20,72	-2,82
	20/12/2019	14,38	-3,00	4,07	-0,22	73,26	0,68	20,80	-2,82

Tableau 33 : Eléments de la matrice de transfert pour la paroi en terre crue battue.

Série de mesure	Date	Eléments de la matrice de transfert de chaleur Z							
		Z_{ii}		Z_{ie}		Z_{ei}		Z_{ee}	
		Mod	Arg	Mod	Arg	Mod	Arg	Mod	Arg
1 ^{ère} série	13/05/2019	16,19	-2,82	4,12	0,02	132,24	0,98	33,72	-2,46
	14/05/2019	16,19	-2,82	3,95	0,01	132,24	0,98	32,33	-2,48
	15/05/2019	16,18	-2,82	3,90	0,002	132,24	0,98	31,87	-2,48
	16/05/2019	16,19	-2,82	3,88	0,001	132,24	0,98	31,78	-2,48
	17/05/2019	16,19	-2,82	4,04	0,01	132,24	0,98	33,10	-2,47
	18/05/2019	16,18	-2,82	3,80	0,01	132,24	0,98	31,07	-2,49
2 ^{ème} série	07/12/2019	21,15	-2,65	5,51	0,20	132,24	0,98	34,46	-2,46
	08/12/2019	21,18	-2,65	5,51	0,20	132,24	0,98	34,42	-2,46
	09/12/2019	21,22	-2,65	5,71	0,21	132,24	0,98	35,57	-2,45
	10/12/2019	21,26	-2,65	5,75	0,21	132,24	0,98	35,78	-2,44
	11/12/2019	21,21	-2,65	5,62	0,20	132,24	0,98	35,07	-2,45
	12/12/2019	21,21	-2,65	5,63	0,21	132,24	0,98	35,15	-2,45
	13/12/2019	21,23	-2,65	5,71	0,21	132,24	0,98	35,57	-2,45

Les valeurs des modules et arguments de l'élément de la matrice de transfert de chaleur Z_{ei} ne changent pas suivant la variation des températures. En effet, elles restent constantes au cours des deux séries de mesure (Cf. tableau 32 et 33). De même pour les valeurs des arguments de l'élément de la matrice Z_{ii} . Issus de ces quatre éléments de la matrice de transfert de chaleur, les caractéristiques relatives au comportement thermique dynamique de chaque mur sont obtenues.

VII.2.1.4 - Les sept caractéristiques relatives au comportement thermique dynamique des parois monocouches

Les calculs ont été faits pour les jours de campagne de mesure expérimentale. Les sept caractéristiques sont divisées en deux catégories distinctes données par les différents tableaux suivants.

VII.2.1.4.1- Admittances thermiques des parois monocouches

L'admittance thermique représente la variation d'amplitude du flux de chaleur sur une face résultant d'une variation unitaire de l'amplitude de température sur la même face, lorsque la température de l'autre face est maintenue constante.

Plus elle est grande, plus la variation du flux de chaleur résultant de la variation de l'amplitude de température de la surface est importante.

Les résultats obtenus par l'utilisation de l'outil de calcul sont affichés sur les tableaux suivants.

Tableau 34 : Admittances thermiques de la paroi 4 de CBAC.

Série de mesure	Date	Y_{ii} [W.m ⁻² K ⁻¹]	Y_{ee} [W.m ⁻² K ⁻¹]
1 ^{ère} série	05/05/2019	3,24	6,32
	06/05/2019	3,24	6,31
	07/05/2019	3,25	6,31
	08/05/2019	3,21	6,31
	09/05/2019	3,19	6,31
	10/05/2019	3,20	6,31
	11/05/2019	3,28	6,32
2 ^{ème} série	14/12/2019	3,95	5,13
	15/12/2019	3,91	5,12
	16/12/2019	3,60	5,11
	17/12/2019	3,72	5,11
	18/12/2019	3,65	5,10
	19/12/2019	3,55	5,11
	20/12/2019	3,53	5,11

Tableau 35 : Admittances thermiques de la paroi en terre crue battue.

Série de mesure	Date	Y_{ii} [W.m ⁻² K ⁻¹]	Y_{ee} [W.m ⁻² K ⁻¹]
1 ^{ère} série	13/05/2019	3,98	8,18
	14/05/2019	4,09	8,18
	15/05/2019	4,15	8,18
	16/05/2019	4,17	8,18
	17/05/2019	4,00	8,18
	18/05/2019	4,26	8,18
2 ^{ème} série	07/12/2019	3,84	6,26
	08/12/2019	3,84	6,25
	09/12/2019	3,72	6,23
	10/12/2019	3,70	6,22
	11/12/2019	3,77	6,24
	12/12/2019	3,76	6,24
	13/12/2019	3,72	6,23

Le module de l'amplitude du flux de chaleur sur la surface interne de la paroi en terre crue est 3,98 fois celle de sa température le 13/05/2019.

Pour les deux parois, on constate que les valeurs des admittances thermiques trouvées dans la première série de mesure sont différentes à celles de la deuxième série. Notamment pour Y_{ie} , elle est largement supérieure dans la première série que dans la deuxième.

VII.2.1.4.2- Propriétés dynamiques de transfert thermique des parois monocouches

Elles regroupent les cinq caractéristiques données sur les tableaux suivants.

Tableau 36 : Propriétés dynamiques de transfert thermique de la paroi 4 de CBAC.

Série de mesure	Date	Y_{ie} [W.m ⁻² K ⁻¹]	Δt_{Yie} [s]	K_1 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	K_2 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	f [%]
1 ^{ère} série	05/05/2019	0,28	27568	48,47	90,49	23,73
	06/05/2019	0,28	27578	48,38	90,48	23,58
	07/05/2019	0,28	27557	48,58	90,50	23,60
	08/05/2019	0,28	27616	48,01	90,43	23,75
	09/05/2019	0,27	27643	47,73	90,42	23,54
	10/05/2019	0,27	27634	47,80	90,43	23,57
	11/05/2019	0,28	27506	49,12	90,55	23,98
2 ^{ème} série	14/12/2019	0,28	27533	53,11	74,21	23,91
	15/12/2019	0,28	27597	54,57	74,09	23,76
	16/12/2019	0,28	28070	53,01	73,63	23,35
	17/12/2019	0,27	27913	54,65	73,68	23,43
	18/12/2019	0,28	28014	53,71	73,55	23,37
	19/12/2019	0,28	28168	52,14	73,48	23,34
	20/12/2019	0,27	28180	51,95	73,51	23,30

Tableau 37 : Propriétés dynamiques de transfert thermique de la paroi en terre crue battue.

Série de mesure	Date	Y_{ie} [W.m ⁻² K ⁻¹]	Δt_{Yie} [s]	K_1 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	K_2 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	f [%]
1 ^{ère} série	13/05/2019	0,24	44968	57,18	115,12	15,05
	14/05/2019	0,24	44787	59,65	115,26	15,08
	15/05/2019	0,25	44721	60,51	115,34	15,13
	16/05/2019	0,25	44710	60,68	115,32	15,24
	17/05/2019	0,24	44890	58,26	115,16	15,06
	18/05/2019	0,25	45604	62,07	115,43	15,16
2 ^{ème} série	07/12/2019	0,24	45423	55,03	88,00	15,41
	08/12/2019	0,24	45428	55,09	87,90	15,24
	09/12/2019	0,24	45578	53,32	87,61	14,73
	10/12/2019	0,24	45611	52,99	87,48	14,53
	11/12/2019	0,25	45518	54,07	87,68	14,98
	12/12/2019	0,24	45522	53,96	87,73	14,94

Série de mesure	Date	Y_{ie} [W.m ⁻² K ⁻¹]	Δt_{Yie} [s]	K_1 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	K_2 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	f [%]
	13/12/2019	0,24	45577	53,31	87,62	14,95

Les cinq paramètres affichés sur ces deux tableaux désignent les propriétés dynamiques de transfert thermique qui relient les grandeurs thermiques sur une face de la paroi à celles présentes à l'autre face. La transmittance thermique périodique Y_{ie} indique la variation de l'amplitude de flux de chaleur sur la face intérieure résultant d'une variation unitaire de l'amplitude de température de la face extérieure. Si elle est élevée, une variation de la température de la surface extérieure entraîne une variation importante du flux de chaleur sur la face interne. Le module de l'amplitude du flux de chaleur sur la surface interne de la paroi en terre crue est environ 0,24 fois celle de la température de sa surface extérieure.

La valeur de Δt_{Yie} représente l'intervalle de temps pendant laquelle un cycle de température sur le côté extérieur atteint le côté intérieur tout en traversant le mur. Elle est équivalente au déphasage thermique déterminé dans la mesure expérimentale. Comme Y_{ie} , sa valeur est presque constante aux cours des jours de mesure pour chaque paroi. Lorsqu'elle est grande, la chaleur met beaucoup de temps pour traverser la paroi.

Les valeurs de K_1 et K_2 renseignent sur l'aptitude d'une unité de surfaces interne et externe de la paroi à stocker de la chaleur. Plus elles sont élevées, plus les surfaces du mur absorbent une grande quantité de chaleur. Sur les deux tableaux, les capacités thermiques surfaciques externes des murs sont plus grandes que celles de l'intérieure. La surface extérieure des murs peut stocker donc davantage la chaleur. On constate qu'elles sont fortement influencées par la variation des températures à l'intérieure et à l'extérieure de la paroi, particulièrement pour K_2 . En effet, ses valeurs sont largement différentes dans les deux séries de mesure.

Le facteur f exprime le taux des fluctuations thermiques extérieures transmis à la surface intérieure de la paroi. S'il est petit, alors la température transmise à l'intérieure est aussi faible. Il est égal au facteur d'amortissement f déterminé dans la mesure expérimentale.

Les tableaux 34, 35, 36, et 37 précédents nous renseignent les caractéristiques thermiques dynamiques stipulées par la norme ISO 13786 pour les murs monocouches : la paroi 4 de la CBAC et la paroi en terre crue battue. Elles sont calculées selon les données de température enregistrées au cours des jours de campagne de mesure expérimentale.

VII.2.1.5 - Valeurs de la transmittance thermique U des parois monocouches

Les résultats pour chaque type de mur sont regroupés dans les tableaux suivants.

Tableau 38 : Résistance et transmittance thermique de la paroi 4 de CBAC.

Série de mesure	Date	R _{th} [m ² .K.W ⁻¹]	U [W.m ⁻² K ⁻¹]
1 ^{ère} série	05/05/2019	0,82	1,22
	06/05/2019	0,82	1,22
	07/05/2019	0,82	1,22
	08/05/2019	0,82	1,22
	09/05/2019	0,83	1,20
	10/05/2019	0,83	1,20
	11/05/2019	0,82	1,22
2 ^{ème} série	14/12/2019	0,81	1,23
	15/12/2019	0,81	1,23
	16/12/2019	0,84	1,19
	17/12/2019	0,83	1,20
	18/12/2019	0,83	1,20
	19/12/2019	0,84	1,19
	20/12/2019	0,84	1,19

Tableau 39 : Résistance et transmittance thermique de la paroi en terre crue battue.

Série de mesure	Date	R _{th} [m ² .K.W ⁻¹]	U [W.m ⁻² K ⁻¹]
1 ^{ère} série	13/05/2019	0,69	1,45
	14/05/2019	0,68	1,47
	15/05/2019	0,68	1,47
	16/05/2019	0,67	1,49
	17/05/2019	0,69	1,45
	18/05/2019	0,67	1,49
2 ^{ème} série	07/12/2019	0,74	1,35
	08/12/2019	0,74	1,35
	09/12/2019	0,75	1,33
	10/12/2019	0,75	1,33
	11/12/2019	0,75	1,33
	12/12/2019	0,75	1,33
	13/12/2019	0,75	1,33

VII.2.2 - Résultats et rapports des calculs pour les parois multicouches

VII.2.2.1 - Description du composant et identification des matériaux

Les calculs sont effectués conformément aux procédures de calcul stipulés par la norme internationale ISO 13786 pour les composants multicouches. Les composants considérés sont des murs verticaux extérieurs, enveloppes de la cellule expérimentale en brique d'argile cuite.

Les matériaux qui les composent sont des briques d'argile cuite et une couche de mortier de ciment sur ses faces. Il s'agit des parois suivantes :

- Les parois 1 et 3 formées de brique d'argile cuite et un revêtement en mortier de ciment sur la surface intérieure. Ce sont des parois à deux couches.
- La paroi 2 qui est recouverte de mortier de ciment sur les deux faces à la fois. C'est donc un composant à trois couches.

Leur représentation est donnée sur la figure 59 suivante. D'après les données de température mesurées in situ, les surfaces limites de ces parois sont soumises à des fluctuations thermiques sinusoïdales à l'extérieur et à l'intérieur. Ces murs sont constitués de plus d'une couche de matériaux dont les caractéristiques physiques et thermiques ainsi que leurs épaisseurs sont déjà données précédemment.

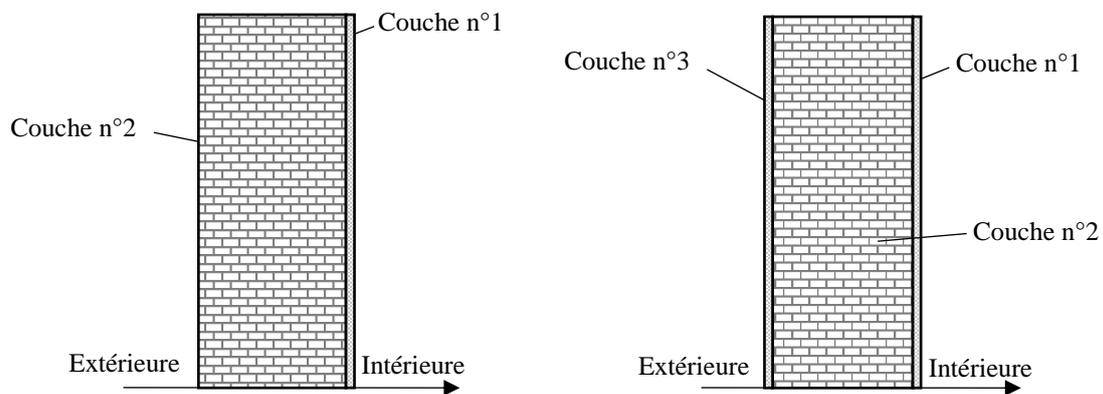


Figure 59 : Représentation des parois multicouches.

Cette figure permet de représenter les murs à deux couches et à trois couches considérées. La norme ISO 13786 exige, pour un composant multicouche enveloppe d'une maison, que le côté 1 doit être celui de la couche la plus interne. Ainsi, dans notre travail la couche n°1 est la couche la plus interne constituée d'un mortier de ciment de 1cm d'épaisseur. Ensuite la couche n°2 qui représente la brique en argile cuite. Et enfin la couche externe ou la couche n°3 est aussi un revêtement en mortier de ciment de 1cm d'épaisseur pour la paroi tricouche. Les calculs sont donc établis suivant cette numérotation de la liste des couches.

VII.2.2.2 - La période de variation choisie

La période de variation considérée est identique au cas précédent égale à $P = 24h = 86400s$. Nous obtenons donc des caractéristiques thermiques dynamiques journalières des parois multicouches.

VII.2.2.3 - Les quatre éléments de la matrice de transfert Z des parois multicouches

Les quatre éléments de la matrice de transfert Z obtenus pour ces parois sont affichés dans les tableaux ci-après. Ils sont représentés par leurs modules et leurs arguments.

Tableau 40 : Eléments de la matrice de transfert pour la paroi 1 de CBAC.

Série de mesure	Date	Eléments de la matrice de transfert de chaleur Z							
		Z_{ii}		Z_{ie}		Z_{ei}		Z_{ee}	
		Mod	Arg	Mod	Arg	Mod	Arg	Mod	Arg
1 ^{ère} série	05/05/2019	13,78	-2,99	4,02	-0,20	82,12	0,79	24,06	-2,70
	06/05/2019	13,78	-2,99	3,95	-0,21	82,12	0,79	23,62	-2,71
	07/05/2019	13,78	-2,99	3,94	-0,21	82,12	0,79	23,55	-2,71
	08/05/2019	13,78	-2,99	3,94	-0,21	82,12	0,79	23,59	-2,71
	09/05/2019	13,78	-2,99	4,00	-0,20	82,12	0,79	23,87	-2,70
	10/05/2019	13,78	-2,99	4,02	-0,20	82,12	0,79	23,98	-2,70
	11/05/2019	13,78	-2,99	4,00	-0,20	82,12	0,79	23,86	-2,70
2 ^{ème} série	14/12/2019	15,71	-2,91	3,80	-0,19	82,12	0,79	19,90	-2,78
	15/12/2019	15,77	-2,90	3,99	-0,17	82,12	0,79	20,85	-2,75
	16/12/2019	15,77	-2,90	4,36	-0,13	82,12	0,79	22,74	-2,72
	17/12/2019	15,77	-2,90	4,10	-0,15	82,12	0,79	21,38	-2,74
	18/12/2019	15,80	-2,90	4,19	-0,14	82,12	0,79	21,82	-2,74
	19/12/2019	15,88	-2,90	4,53	-0,12	82,12	0,79	23,61	-2,71
	20/12/2019	15,78	-2,90	4,19	-0,14	82,12	0,79	21,88	-2,73

Tableau 41 : Eléments de la matrice de transfert pour la paroi 2 de CBAC.

Série de mesure	Date	Eléments de la matrice de transfert de chaleur Z							
		Z_{ii}		Z_{ie}		Z_{ei}		Z_{ee}	
		Mod	Arg	Mod	Arg	Mod	Arg	Mod	Arg
1 ^{ère} série	05/05/2019	14,53	-2,93	4,02	-0,15	92,04	0,90	25,53	-2,61
	06/05/2019	14,52	-2,93	3,88	-0,17	92,04	0,90	24,65	-2,62
	07/05/2019	14,52	-2,93	3,74	-0,18	92,04	0,90	23,73	-2,64
	08/05/2019	14,53	-2,93	3,72	-0,18	92,04	0,90	23,58	-2,64
	09/05/2019	14,54	-2,93	3,83	-0,17	92,04	0,90	24,28	-2,63
	10/05/2019	14,54	-2,93	3,99	-0,15	92,04	0,90	25,32	-2,61
	11/05/2019	14,53	-2,93	3,85	-0,17	92,04	0,90	25,46	-2,63
2 ^{ème} série	14/12/2019	16,69	-2,83	4,40	-0,07	92,04	0,90	24,30	-2,63
	15/12/2019	16,72	-2,82	4,55	-0,06	92,04	0,90	25,07	-2,62
	16/12/2019	16,73	-2,82	4,87	-0,03	92,04	0,90	26,86	-2,59
	17/12/2019	16,73	-2,82	4,81	-0,03	92,04	0,90	26,51	-2,60
	18/12/2019	16,74	-2,82	4,72	-0,04	92,04	0,90	26,00	-2,60
	19/12/2019	16,75	-2,82	4,69	-0,04	92,04	0,90	25,82	-2,61
	20/12/2019	16,75	-2,82	4,78	-0,04	92,04	0,90	26,31	-2,60

Tableau 42 : Eléments de la matrice de transfert pour la paroi 3 de CBAC.

Série de mesure	Date	Eléments de la matrice de transfert de chaleur Z							
		Z_{ii}		Z_{ie}		Z_{ei}		Z_{ee}	
		Mod	Arg	Mod	Arg	Mod	Arg	Mod	Arg
1 ^{ère} série	05/05/2019	13,77	-2,99	2,87	-0,35	82,12	0,79	17,18	-2,85
	06/05/2019	13,77	-2,99	2,84	-0,36	82,12	0,79	17,00	-2,85
	07/05/2019	13,77	-2,99	2,85	-0,35	82,12	0,79	17,04	-2,85
	08/05/2019	13,78	-2,99	2,84	-0,36	82,12	0,79	16,98	-2,85
	09/05/2019	13,78	-2,99	2,82	-0,36	82,12	0,79	16,89	-2,86
	10/05/2019	13,77	-2,99	2,84	-0,36	82,12	0,79	17,01	-2,85
	11/05/2019	13,77	-2,99	2,82	-0,36	82,12	0,79	16,86	-2,86
2 ^{ème} série	14/12/2019	15,77	-2,90	3,97	-0,17	82,12	0,79	20,73	-2,76
	15/12/2019	15,78	-2,90	4,14	-0,15	82,12	0,79	21,61	-2,74
	16/12/2019	15,80	-2,90	4,44	-0,12	82,12	0,79	23,13	-2,71
	17/12/2019	15,81	-2,90	4,30	-0,13	82,12	0,79	22,37	-2,73
	18/12/2019	15,82	-2,90	4,37	-0,13	82,12	0,79	22,73	-2,72
	19/12/2019	15,81	-2,90	4,45	-0,12	82,12	0,79	23,15	-2,71
	20/12/2019	15,79	-2,90	4,44	-0,12	82,12	0,79	23,11	-2,71

Les valeurs du module et argument de l'élément Z_{ei} restent constantes au cours des jours de campagne de mesure. Les caractéristiques relatives au comportement thermique dynamique du mur sont obtenues à partir des quatre éléments de la matrice de transfert de chaleur.

VII.2.2.4 - Les sept caractéristiques thermiques dynamiques des parois multicouches

VII.2.2.4.1- Admittances thermiques des parois multicouches

L'outil de calcul donne les résultats suivants pour les valeurs des admittances thermiques journalières des murs multicouches, regroupées sur le tableau suivant.

Tableau 43 : Admittances thermiques des enveloppes multicouches.

Série de mesure	Date	Y_{ii} [W.m ⁻² K ⁻¹]			Y_{ee} [W.m ⁻² K ⁻¹]		
		Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3
		1 ^{ère} série	05/05/2019	3,42	3,61	4,80	5,98
06/05/2019	3,49		3,74	4,85	5,98	6,35	5,99
07/05/2019	3,50		3,89	4,84	5,98	6,35	5,98
08/05/2019	3,49		3,91	4,85	5,97	6,35	5,98
09/05/2019	3,45		3,80	4,88	5,97	6,34	5,98
10/05/2019	3,43		3,64	4,85	5,97	6,35	5,99
11/05/2019	3,45		3,77	4,89	5,97	6,35	5,99
2 ^{ème} série	14/12/2019	4,14	3,79	3,97	5,24	5,52	5,22

Série de mesure	Date	Y_{ii} [W.m ⁻² K ⁻¹]			Y_{ee} [W.m ⁻² K ⁻¹]		
		Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3
	15/12/2019	3,95	3,68	3,81	5,22	5,51	5,21
	16/12/2019	3,62	3,43	3,56	5,22	5,51	5,21
	17/12/2019	3,85	3,48	3,68	5,22	5,51	5,21
	18/12/2019	3,77	3,55	3,62	5,21	5,50	5,20
	19/12/2019	3,48	3,57	3,55	5,22	5,50	5,20
	20/12/2019	3,76	3,50	3,56	5,22	5,50	5,21

Pour les parois 1 et 3, les valeurs de Y_{ee} sont quasiment identiques alors que Y_{ii} sont largement différentes. Mais comme pour les cas des parois monocouches, Y_{ee} sont toujours supérieures dans la première série que dans la deuxième.

VII.2.2.4.2- Propriétés dynamiques de transfert thermique des parois multicouches

Elles sont données sur les tableaux suivants.

Tableau 44 : Propriétés dynamiques de transfert thermique de la paroi 1 de CBAC.

Série de mesure	Date	Y_{ie} [W.m ⁻² K ⁻¹]	Δt_{yie} [s]	K_1 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	K_2 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	f [%]
1 ^{ère} série	05/05/2019	0,26	32638	50,46	85,31	21,37
	06/05/2019	0,26	32545	51,40	85,39	21,62
	07/05/2019	0,27	32532	51,55	85,38	21,88
	08/05/2019	0,27	32543	51,47	85,35	21,63
	09/05/2019	0,26	32602	50,86	85,30	21,58
	10/05/2019	0,27	32627	50,62	85,29	21,58
	11/05/2019	0,26	32597	50,89	85,33	21,65
2 ^{ème} série	14/12/2019	0,26	32819	60,46	75,48	21,43
	15/12/2019	0,25	33129	59,67	75,04	21,37
	16/12/2019	0,27	33215	58,87	74,68	21,34
	17/12/2019	0,25	32877	59,23	74,92	21,57
	18/12/2019	0,26	33009	59,08	74,69	21,48
	19/12/2019	0,26	33415	58,90	74,52	21,21
	20/12/2019	0,26	33011	58,93	74,80	21,47

Tableau 45 : Propriétés dynamiques de transfert thermique de la paroi 2 de CBAC.

Série de mesure	Date	Y_{ie} [W.m ⁻² K ⁻¹]	Δt_{Yie} [s]	K_1 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	K_2 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	f [%]
1 ^{ère} série	05/05/2019	0,25	39617	53,05	90,29	18,93
	06/05/2019	0,25	39424	54,94	90,47	19,11
	07/05/2019	0,25	39209	57,09	90,63	19,22
	08/05/2019	0,25	39180	57,44	90,61	19,31
	09/05/2019	0,25	39349	55,79	90,45	19,18
	10/05/2019	0,25	39577	53,49	90,29	19,08
	11/05/2019	0,25	39380	55,38	90,51	19,16
2 ^{ème} série	14/12/2019	0,26	39746	50,17	78,72	18,77
	15/12/2019	0,25	39928	50,47	78,51	18,74
	16/12/2019	0,26	40292	49,89	78,23	18,30
	17/12/2019	0,26	40227	50,55	78,27	18,38
	18/12/2019	0,25	40138	51,56	78,23	18,65
	19/12/2019	0,25	40105	51,90	78,24	18,73
	20/12/2019	0,26	40198	50,94	78,21	18,63

Tableau 46 : Propriétés dynamiques de transfert thermique de la paroi 3 de CBAC.

Série de mesure	Date	Y_{ie} [W.m ⁻² K ⁻¹]	Δt_{Yie} [s]	K_1 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	K_2 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]	f [%]
1 ^{ère} série	05/05/2019	0,26	32377	70,77	86,96	21,59
	06/05/2019	0,26	32300	71,50	87,01	21,77
	07/05/2019	0,26	32322	71,32	86,97	21,72
	08/05/2019	0,26	32295	71,59	86,98	21,79
	09/05/2019	0,27	32254	71,97	87,02	21,89
	10/05/2019	0,27	32306	71,46	87,00	21,76
	11/05/2019	0,26	32235	72,09	87,09	22,02
2 ^{ème} série	14/12/2019	0,25	32896	53,01	75,05	21,93
	15/12/2019	0,26	32642	51,64	74,83	21,73
	16/12/2019	0,26	33019	51,96	74,50	21,40
	17/12/2019	0,26	32849	53,72	74,57	21,84
	18/12/2019	0,26	32941	52,87	74,45	21,44
	19/12/2019	0,25	33032	51,92	74,42	21,37
	20/12/2019	0,26	33013	52,01	74,52	21,44

Les valeurs de Y_{ie} , Δt_{ie} et f ne présentent pas une grande différence au cours des deux séries de mesure. Par contre, les capacités thermiques surfaciques sont largement différentes d'une série de mesure à une autre. Pour notre cas, on trouve que les valeurs de K_1 et K_2 dans la première série sont toujours supérieures à celles de la deuxième. Sauf pour les valeurs de K_1 de la paroi

1. Comme pour les valeurs déterminées expérimentalement, on trouve également une variation du déphasage thermique et du facteur d'amortissement journaliers des composants.

VII.2.2.5 - Valeurs de la transmittance thermique U des parois multicouches

Les résultats pour chaque composant sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau 47 : Résistance et transmittance thermique des enveloppes multicouches.

Série de mesure	Date	R_{th} [m ² .K.W ⁻¹]			U [W.m ⁻² K ⁻¹]		
		Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3
1 ^{ère} série	05/05/2019	0,84	0,83	0,75	1,19	1,20	1,34
	06/05/2019	0,83	0,82	0,75	1,20	1,21	1,34
	07/05/2019	0,83	0,81	0,75	1,20	1,22	1,34
	08/05/2019	0,83	0,81	0,75	1,20	1,22	1,34
	09/05/2019	0,84	0,82	0,74	1,19	1,21	1,35
	10/05/2019	0,84	0,83	0,75	1,19	1,20	1,34
	11/05/2019	0,84	0,82	0,74	1,19	1,21	1,35
2 ^{ème} série	14/12/2019	0,81	0,85	0,83	1,22	1,18	1,20
	15/12/2019	0,83	0,86	0,84	1,20	1,17	1,19
	16/12/2019	0,85	0,88	0,85	1,17	1,14	1,17
	17/12/2019	0,83	0,87	0,85	1,20	1,15	1,17
	18/12/2019	0,84	0,87	0,85	1,19	1,15	1,17
	19/12/2019	0,86	0,87	0,86	1,16	1,15	1,16
	20/12/2019	0,84	0,87	0,86	1,19	1,15	1,16

VII.2.3 – Caractéristiques thermiques dynamiques moyennes

Les valeurs de toutes les caractéristiques thermiques calculées par l'application de la norme ISO 13786 ne sont pas constantes au cours d'une série de mesure. La différence entre le gradient des températures moyennes extérieure et intérieure de la paroi est l'origine probable de la variation de ces valeurs. On peut donc déterminer leurs moyennes au cours de chaque série de mesure.

VII.2.3.1 – Admittances thermiques moyennes

Elles sont données sur les deux tableaux suivants.

Tableau 48 : Admittances thermiques internes moyennes des parois de CBAC et CTCB.

Série de mesure	Y_{ii} [W.m ⁻² K ⁻¹]				
	Terre crue	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 4
1 ^{ère} série	4,11	3,46	3,77	4,85	3,23
2 ^{ème} série	3,76	3,80	3,57	3,68	3,70

Tableau 49 : Admittances thermiques externes moyennes des parois de CBAC et CTCB.

Série de mesure	Y_{ee} [W.m ⁻² K ⁻¹]				
	Terre crue	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 4
1 ^{ère} série	8,18	5,97	6,35	5,98	6,31
2 ^{ème} série	6,24	5,22	5,51	5,21	5,11

VII.2.3.2 – Propriétés dynamiques moyennes

Les moyennes des valeurs journalières des propriétés dynamiques obtenues lors d'une série de mesure sont réparties dans les tableaux 50 à 54.

Tableau 50 : Transmittances thermiques périodiques moyennes des parois de CBAC et CTCB.

Série de mesure	Y_{ie} [W.m ⁻² K ⁻¹]				
	Terre crue	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 4
1 ^{ère} série	0,25	0,26	0,25	0,26	0,28
2 ^{ème} série	0,24	0,26	0,26	0,26	0,28

Tableau 51 : Déphasages thermiques moyens des parois de CBAC et CTCB.

Série de mesure	Δt_{yie} [s]				
	Terre crue	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 4
1 ^{ère} série	44974	32583	39391	32298	27586
2 ^{ème} série	45522	33068	40091	32913	27925

Tableau 52 : Capacités thermiques internes moyennes des parois de CBAC et CTCB.

Série de mesure	K_1 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]				
	Terre crue	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 4
1 ^{ère} série	59,73	51,04	55,31	71,53	48,30
2 ^{ème} série	53,97	59,31	50,78	52,45	53,31

Tableau 53 : Capacités thermiques externes moyennes des parois de CBAC et CTCB.

Série de mesure	K_2 [kJ.m ⁻² K ⁻¹]				
	Terre crue	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 4
1 ^{ère} série	115,27	85,34	90,46	87,00	90,47
2 ^{ème} série	87,72	74,88	78,34	74,62	73,74

Tableau 54 : Facteurs d'amortissement moyens des parois de CBAC et CTCB.

Série de mesure	f [%]				
	Terre crue	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 4
1 ^{ère} série	15,12	21,62	19,14	21,79	23,68
2 ^{ème} série	14,97	21,41	18,60	21,59	23,49

VII.2.3.3 – Transmittances thermiques moyennes

Les valeurs moyennes de la transmittance thermique U des parois, en régime permanent, sont données sur le tableau suivant.

Tableau 55 : Transmittances thermiques moyennes des parois de CBAC et CTCB.

Série de mesure	U [W.m ⁻² K ⁻¹]				
	Terre crue	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 4
1 ^{ère} série	1,47	1,19	1,21	1,34	1,21
2 ^{ème} série	1,34	1,19	1,16	1,17	1,20

VII.2.3.4 - Analyses et discussions des résultats

Sur chaque tableau, des écarts sont constatés entre les valeurs trouvées au cours de la 1^{ère} série et de la 2^{ème} série de mesure. En général, les caractéristiques thermiques dynamiques du composant dépendent principalement des propriétés intrinsèques des matériaux qui le constituent tels que la conductivité thermique, la masse volumique, la chaleur spécifique et l'épaisseur [145]. Mais on peut aussi observer les effets des propriétés extrinsèques tels que les coefficients de transfert de chaleur par convection et rayonnement sur les caractéristiques thermiques superficielles de la paroi. C'est démontré par les valeurs des admittances et capacités thermiques sur les surfaces intérieure et extérieure de chaque mur.

Dans la littérature, la plupart des études révèlent que, pour retarder et réduire l'amplitude des fluctuations de température sur la surface intérieure par rapport à la surface extérieure, les murs doivent avoir les caractéristiques suivantes pour maintenir la température intérieure à une température relativement constante [43] [64] [106] [140] [145].

- Un déphasage thermique, une admittance et une capacité thermique surfacique internes plus élevés ;
- Un facteur d'amortissement et une transmittance thermique périodique faibles.

Ces deux caractéristiques conduisent généralement à une faible valeur de la transmittance thermique U qui caractérise l'isolation thermique du mur [145].

Si on regarde donc les valeurs sur les tableaux précédents, il est clair que la paroi en terre crue battue d'épaisseur 40cm présente les bonnes aptitudes à réduire les amplitudes de température de surface interne et atténuer la température interne du bâtiment, selon la norme ISO 13786. En effet, les valeurs de Y_{ii} , de Y_{ie} et de K_1 sont plus élevées ; et les valeurs de Y_{ie} et de f sont les plus faibles parmi les autres enveloppes. Elle a donc une forte inertie thermique par rapport aux parois en brique d'argile cuite. C'est-à-dire une bonne capacité à décaler et à atténuer le flux thermique qui le traverse sur une période de 24h.

La norme ISO 13786 considère la paroi 4 de CBAC comme enveloppe à très faible inertie thermique vues les valeurs de ses caractéristiques thermiques dynamiques.

La paroi 2 de CBAC est placée après la terre crue battue si nous examinons les valeurs sur les différents tableaux précédents.

Du point de vue isolation thermique, la paroi en terre crue présente un handicap majeur avec une valeur élevée de la transmittance thermique U . Elle n'est donc pas recommandée pour une isolation thermique élevée. Pourtant, elle surpasse les autres murs sur l'aptitude à réduire de manière significative l'impact des gains de chaleur de l'extérieure afin de maintenir stable la température interne du bâtiment.

Dans la plupart des pays avancés, la législation sur la performance énergétique des bâtiments attribue un seuil à respecter pour les valeurs des caractéristiques thermiques dynamiques de la norme ISO 13786 [43] [106]. Ce qui n'est pas encore prescrite dans la norme nationale de construction malgache. L'étude s'arrête donc seulement sur la comparaison des résultats pour les paroi-typiques à Madagascar.

VII.3 - COMPARAISON DES RESULTATS EXPERIMENTAUX AVEC LA NORME ISO 13786

VII.3.1- Introduction

Les deux méthodes de détermination ont donné des valeurs du retard thermique Δt et du facteur d'amortissement f des fluctuations thermiques entre les faces extérieure et intérieure de la paroi. Comparons donc ces résultats dans le but de valider les deux méthodes d'approches utilisées afin de confirmer la conformité des valeurs des caractéristiques décrivant l'inertie thermique des enveloppes extérieures étudiées.

VII.3.2 – Comparaison du déphasage thermique

Les valeurs présentées dans le tableau suivant représentent les moyennes du déphasage thermique calculé à partir des données journalières de température au cours des jours de campagne de mesure lors de la 1^{ère} et 2^{ème} série de mesure.

Tableau 56 : Déphasages thermiques expérimental et selon ISO 13786.

Parois	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 4	Terre crue battue
$\Delta t_{in situ}$ [h]	8,57	10,40	8,36	7,00	12,17
Δt_{ISO} [h]	9,12	11,04	9,06	7,71	12,57
Ecart [mn]	33	38	42	43	24

VII.3.3 – Comparaison du facteur d'amortissement

Comme pour le cas du déphasage thermique, les valeurs affichées sur le tableau suivant montrent les moyennes des résultats obtenus. Les résultats de la norme ISO sont obtenus en utilisant les données de température collectées expérimentalement.

Tableau 57 : Facteur d'amortissement expérimental et selon ISO 13786.

Parois	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 3	Paroi 4	Terre crue battue
$f_{in situ}$ [%]	18,43	15,39	18,49	20,71	12,09
f_{ISO} [%]	21,51	18,87	21,69	23,59	15,04
Ecart [%]	3,08	3,48	3,20	2,88	2,95

VII.3.4 – Analyses et discussions des résultats

La conductivité thermique et la chaleur spécifique réelles des parois sont inconnues alors nous avons lancé les calculs de la norme ISO avec des valeurs approximatives obtenues à partir des formules mathématiques. Ces valeurs sont prétendues les plus proches des valeurs réelles. L'incertitude sur les valeurs réelles des propriétés thermiques des parois affectent la précision des résultats issus de la norme. Les résultats montrent que les valeurs du déphasage et du facteur d'amortissement thermique données par la norme ISO 13786 sont en-dessus des résultats expérimentaux. Toutefois, les deux approches conduisent à des résultats similaires et donnent le même classement des types de murs.

Pour le retard thermique, des écarts compris entre une demi-heure à un trois-quarts d'heure de temps sont trouvés sur les parois de la cellule en brique d'argile cuite. Pour la paroi en terre crue battue, une différence de 24 minutes a été découvert. Sur le tableau 57, la différence entre les valeurs du facteur d'amortissement est strictement inférieure à 4%.

Dans le tableau 58 suivant, nous regroupons quelques résultats d'études conduites sur des murs de différentes épaisseurs par les deux méthodes de détermination.

Tableau 58: Déphasage et facteur d'amortissement de quelques murs.

Références-Site	Nature et épaisseur des murs	$(\Delta t ; f)_{in\ situ}$	$(\Delta t ; f)_{ISO}$	Ecart
(Gianpiero E. et al.) Catane-Italie. [50]	Mur en pierre de basalte (70cm)	(10h ; 02%)	(18,7h ; 02%)	(8,7h ; 0%)
(Tingting WU) Aisne-France [117]	Mur en pierre calcaire (20cm)	7,5h	7,3h	12mn

Pour les travaux de *Tingting WU*, bien que des valeurs mesurées en laboratoire sont insérées dans les calculs de ISO 13786 pour les propriétés thermiques du mur, un écart de 12 minutes a été relevé. Le déphasage thermique trouvé par la norme est inférieur à celui mesuré in situ, qui est inversement à la nôtre. *Gianpiero* a trouvé une valeur expérimentale de Δt bien inférieure à la valeur théorique déterminée par ISO 13786, tandis que f s'approche avec une meilleure approximation.

Bien qu'une différence se trouve entre les résultats des deux méthodes de caractérisation, il est montré que ces dernières donnent la même évaluation de l'inertie thermique des parois des constructions-typiques des hautes terres de Madagascar.

Enfin, l'inertie thermique optimale d'un mur ou d'une paroi correspond généralement à des valeurs de déphasage thermique autour de 12h et un facteur d'amortissement inférieur à 20% [97]. Ces valeurs sont suffisantes pour que les occupants du bâtiment ne ressentent pas les fluctuations du flux de chaleur externe. Par ailleurs, lorsqu'on compare les performances de plusieurs composants, la meilleure inertie thermique revient à celui présentant un déphasage élevé qui est toujours associé à un facteur d'amortissement faible. Ainsi, on peut affirmer que le mur en terre crue battue de 40cm d'épaisseur surclasse les autres types de murs de l'étude et ceux cités en référence. Il est donc classé parmi les meilleurs systèmes passifs de régulation de la température intérieure du bâtiment.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, les résultats obtenus par les deux méthodes de caractérisation sont présentés. D'une part, les mesures in situ des températures sur les deux cellules ont permis d'aboutir aux valeurs de déphasage thermique et facteur d'amortissement journalier. Nous avons pu identifier expérimentalement les structures les plus performantes parmi celles couramment mises en œuvre dans les constructions-typiques des hauts plateaux de Madagascar. Ainsi, les résultats expérimentaux ont montré que les murs en terre crue battue présentent une indiscutable

supériorité par rapport aux autres enveloppes extérieures de même fonction quant à leur capacité de résister aux fluctuations de flux de chaleur ou de températures externes.

D'autre part, sept caractéristiques thermiques dynamiques sont données par la norme ISO 13786 permettant d'estimer le degré d'inertie thermique des parois. Evidemment, nous avons identifié les structures les plus performantes parmi celles couramment mise en œuvre dans les construction-types des hautes terres Malgache. Après la comparaison des deux caractéristiques communes, le déphasage et le facteur d'amortissement thermique, on est parvenu à la même conclusion que celle de la partie expérimentale. Ainsi, il est confirmé par les deux types d'approches que les murs en terre crue battue sont révélés performants du point de vue aptitude à résister aux fluctuations de flux de chaleur ou de températures externes par rapport aux autres parois de même fonction. Et que l'application d'une couche de mortier de ciment sur les faces de la paroi en brique contribue de manière significative sur l'amélioration de son inertie. En plus, étant donné les écarts entre les résultats, il est important de minimiser l'incertitude sur les valeurs exactes des propriétés thermiques intrinsèques des parois. Le mieux est donc de procéder à des mesures réelles pour avoir des résultats plus précis.

CONCLUSION GENERALE

Madagascar est une île pleinement riche en ressources naturelles tant en matières végétales, animales, minérales, etc. Une grande partie de ces ressources sont destinées à l'édification de bâtiment d'habitation. On les retrouve sur les différents composants et/ou éléments constitutifs de ce dernier. L'enquête menée par l'Institut National de la Statistique en 2010 nous montre que la plupart des matériaux de construction utilisés pour les murs et parois sont conçus avec des matières premières peu transformées dont la terre, façonnés en briques ou non. A part de leurs disponibilités, ils sont choisis grâce à leurs caractéristiques physico-mécaniques qui leurs permettent de garantir une bonne stabilité de l'édifice. Encore, ils doivent aussi jouer le rôle de protecteur assurant une ambiance thermique confortable à l'intérieur du bâtiment. Pour cela, un bon comportement face aux perturbations thermiques agissant sur sa surface extérieure est inévitable. Cette réponse est caractérisée par l'inertie thermique qui décrit le comportement dynamique du transfert thermique à travers la paroi. Cette grandeur permet d'estimer si un habitat peut procurer un confort relatif mieux qu'un autre. Elle est aussi corrélée à l'intensité des besoins en climatisation. Aucune étude dans ce sens n'a été encore rapporté. D'où l'intérêt de la caractérisation thermique dynamique des parois typiques de la construction malgache, qui revient à la détermination de leur inertie. Conventionnellement, elle est décrite par le déphasage et le facteur d'amortissement entre les profils de température de surfaces intérieure et extérieure des parois. Ils représentent respectivement l'intervalle de temps entre l'apparition des températures maximales et le rapport des amplitudes des fluctuations des températures, sur les surfaces intérieure et extérieure de la paroi. Nous avons procédé suivant deux méthodes de caractérisation durant notre travail. Une étude expérimentale basée sur des mesures in situ des températures de surfaces et ambiante des deux cellules expérimentales en environnement naturel de mêmes dimensions. Elles sont construites avec du brique d'argile cuite et en terre crue battue et sont toutes les deux implantées sur un même site en plein air. Les mesures ont été effectuées en deux saisons différentes. La deuxième est une caractérisation suivant les démarches de calculs préconisés par la norme ISO 13786. Les deux méthodes sont parvenues à des résultats attirants, nous permettant d'atteindre notre objectif qui est de reconnaître la structure ayant une bonne aptitude à favoriser la régulation passive du climat intérieur de l'habitat, et ceci sans avoir recours à un système de chauffage ou de refroidissement conventionnel. La confrontation de leurs résultats nous permet de constater que les valeurs du déphasage thermique et de l'amortissement de l'onde thermique données par la norme sont en dessus de celles mesurées in situ. En effet, les démarches ISO sont lancées à partir des données approximatives de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique des matériaux étudiés.

Les incertitudes liées à cela sont probablement l'origine des erreurs sur la précision des résultats donnés par cette méthode. Mais n'empêche pas d'aboutir à des résultats proches de l'étude expérimentale. Ce qui signifie que l'utilisation des données précises est recommandée pour minimiser les erreurs sur les résultats. La mesure expérimentale est réalisée par l'utilisation de capteurs de températures de surfaces et ambiante sur les cellules de mesure. Son principe repose sur une approche globale qui consiste à établir des relations entrée-sortie, dans notre cas, face extérieure-face intérieure des murs, celles des parois d'une cellule de mesure. La compilation des données ainsi que l'analyse des courbes de température en entrée et en sortie permettent d'accéder aux paramètres caractérisant l'inertie thermique. On peut dire que les instrumentations proposées, basée sur l'utilisation des capteurs de température de type transistor et du type DHT, est fiable et adaptée aux conditions microclimatiques extérieures. Et que les résultats sont logiques et mettent en évidence un comportement évolutif du matériau constitutif de la paroi soumis à l'environnement climatique naturel.

Cet ouvrage est un ensemble de plusieurs connaissances, informations et éléments venant de différentes sources qui nous à aider à réaliser notre étude. Ils sont répartis dans deux parties interdépendantes dont la première comporte trois chapitres dans laquelle le premier parle des phénomènes physiques, notamment le mode de transfert de chaleur, agissant sur l'enveloppe verticale extérieure du bâtiment. Le second présente l'aspect dynamique du transfert de chaleur dans les matériaux et la notion d'inertie thermique ; suivi de quelques méthodes de caractérisation du comportement thermique dynamique des matériaux. Le dernier chapitre de cette partie nous permet de savoir les différents aspects des murs et habitats typiques des différentes régions à Madagascar. La deuxième partie de cet ouvrage concerne la caractérisation des murs typiques des régions des hautes terres malgaches. Divisée en quatre chapitres, elle commence par la détermination des propriétés thermophysiques des matériaux de construction du mur qui est indispensable pour l'application des démarches de la norme ISO 13786. Suivi par les protocoles expérimentaux des mesures in situ. Ils commencent par l'édification des deux cellules de mesure, l'assemblage et mise en place des instrumentations (capteurs et microcontrôleur), la mesure proprement dite des températures de surface de la paroi et de l'ambiance intérieure des cellules. La mise en œuvre des démarches de la norme ISO 13786 pour calculer les caractéristiques décrivant l'inertie thermiques des murs considérés est présentée dans le troisième chapitre. Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus ainsi que leurs analyses et discussions. Il comporte également la comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes citées.

Beaucoup de travaux ont montré le lien entre l'inertie thermique, le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments définie comme une combinaison imposant des besoins et des consommations d'énergie minimisés. La détermination des paramètres décrivant l'inertie thermique des murs est donc indispensable au même titre que leurs caractéristiques physiques et mécaniques. En effet, une bonne évaluation de l'inertie thermique peut conduire en une meilleure estimation du confort thermique et une limitation des besoins et des consommations d'énergie.

L'intérêt de la présente étude réside dans le fait que les expérimentations menées in situ et la mise en œuvre des démarches normalisées de calculs des caractéristiques thermiques dynamiques sur des cellules de mesure ont permis de comparer le comportement thermique dynamique des murs des constructions vernaculaires de Madagascar. Les résultats ont montré que les murs en terre crue battue surpassent les autres parois de même fonction quant à leur capacité de résister aux fluctuations de flux de chaleur ou de températures externes. On peut en déduire qu'un bâtiment construit avec un tel matériau assure un meilleur confort thermique intérieur en l'absence de système actif de climatisation. Dans le contexte de diversité climatique de la Grande Île en particulier, il procure un meilleur confort pendant la saison chaude sur les hautes terres bénéficiant d'un climat tropical d'altitude, et toute l'année dans les régions côtières, en offrant une température intérieure quasi stable. Ces résultats encourageants prouvent que les constructions traditionnelles en terre crue ont leur place dans la conception du bâtiment durable.

Pour compléter notre travail, une amélioration et/ou développement de l'outil de calcul élaboré sur Excel est encore nécessaire afin d'étudier différents types de composants de bâtiment.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] - *JANNOT Y.*, Cours de transferts thermiques, 154 pages, 2003.
- [2] - *LE HUNG N.*, Bétons de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale et modélisation numérique, Mémoire de thèse, Université de Cergy-Pontoise, 2013.
- [3] - *BORIES S. et al*, Transfert de chaleurs dans les milieux poreux : conduction, convection, rayonnement, Techniques de l'Ingénieur, Génie énergétique, R 8251, 2008.
- [4] - *ELANGO VAN R. et al.*, Thermal Performance of Building Envelops, Encyclopedia of Sustainable Technologies, Elsevier, pages 169 – 188, 2017.
(<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10192-7>)
- [5] - *CHURCHILL et al.*, A standardized procedure for the production of correlations in the form of a common empirical equation. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, volume 13, issue 1, pages 39 – 44, 1974.
(<http://dx.doi.org/10.1021/i160049a008>).
- [6] - *DEFRAEYE T. et al.*, Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling, Energy Conversion and Management, volume 52, issue 1, pages 512 – 522, 2011.
(<https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.07.026>).
- [7] - *AULINE R.*, Modélisation dynamique tridimensionnelle avec tache solaire pour la simulation du comportement thermique d'un bâtiment basse consommation, Mémoire de thèse, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2014.
- [8] - *VALENTINA T.*, Modélisation de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface pour un sol homogène avec relief, Mémoire de thèse, Université de Provence, 2004.
- [9] - *SERGE B. et al*, Transfert de chaleur dans les milieux poreux, Technique de l'Ingénieur, Génie énergétique, 2008.
- [10] - *NAITALI B.*, Elaboration, caractérisation et modélisation de matériaux poreux : Influence de la structure poreuse sur la conductivité thermique effective, Mémoire de thèse, Université de Limoges, 2005.
- [11] - *BRAKEL J.V.*, Capillary liquid transport in porous media, Mémoire de thèse, Technische Hogeschool, Delft, 1975.
- [12] - *BONACINA C. et al*, Analytical and experimental investigations on the heat transfert properties of light concrete, International Journal of Thermophysics, volume 24, issue 5, pages 1407-1414, 2003. (<http://dx.doi.org/10.1023/A:1026167505302>).
- [13] - *CLYNE T.W. et al*, Porous materials for thermal management under extreme conditions, Philosophical Transactions of the Royal Society, A Mathematical, Physical and Engineering Sciences, volume 364, pages 125-146, 2006.
(<https://dx.doi.org/10.1098/rsta.2005.1682>).
- [14] - *NASSIMA S.*, Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation, Mémoire de thèse, Université Mentouri-Constantine, 2010.
- [15] - *MATHIEU N.*, Modélisation du transfert thermique au sein de matériaux poreux multiconstituants, Mémoire de thèse, Université d'Orléans, 2012.

- [16] - *HILL F.B. et al*, Radiative and conductive heat transfert in a quiescent gas-solid bed of particles: Theory and experiment, *AIChE Journal*, volume 5, pages 486 - 496, 1959. (<https://dx.doi.org/10.1002/aic.690050416>).
- [17] - *HELTE A.*, Radiative and conductive heat transfer in porous media: Estimation of the effective thermal conductivity, *Journal of Applied Physics*, volume 73, pages 7167-7173, 1993. (<https://dx.doi.org/10.1063/1.352387>).
- [18] - *OCHS F. et al*, Effective of thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, volume 51, pages 539 - 552, 2008. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.005>).
- [19] - *GHOSH S.K. et al*, Theoretical analysis of radiative effects on transient free convection heat transfert past a hot vertical surface in porous media, *Nonlinear Analysis: Modeling and Control*, volume 13, pages 419-432, 2008.
- [20] - *AURELIE K.*, Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment, Mémoire de thèse, Université Henri Poincaré-Nancy, 2009.
- [21] - *DARYABEIGI K. et al*, Combined heat transfert in high-porosity high-temperature fibrous insulation: Theory and experimental validation, *Journal of thermophysics and heat transfert*, volume 25, pages 536-546, 2010.
- [22] - *EYGLUNENT B.*, Manuel de thermique, 2è édition, Hermès, 1997.
- [23] - *SHINDE S. L. et al*, High thermal conductivity materials, Springer, 2006.
- [24] - *FREDRIKSSON H. et al*, Physics of functional materials, John Wiley & Sons, 2008. (<http://dx.doi.org/10.1002/9780470725368>).
- [25] - *DRISS S.*, Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique, Mémoire de thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
- [26] - *Groupe Métrologie Thermique et Techniques Inverses*, Journée d'étude SFT : caractérisation thermique et échelle d'observation, 2010.
- [27] - *CENDRILLE F.*, Modélisation des écoulements et des transferts de masse et de chaleur dans la grotte de Lascaux, Mémoire de thèse, Université de Bordeaux I, 2003.
- [28] - *MARLE C.M.*, Écoulements monophasiques en milieu poreux, *Revue*, Institut Français du Pétrole, 1967.
- [29] - *KAVIANY M.*, Principles of heat transfer in porous media, Springer Verlag, 1991.
- [30] - *QUINTARD M. et al*, Transport in ordered and disordered porous media: volume-averaged equations, closure problems and comparisons with experiments, *Chemical Engineering Science*, volume 48, issue 14, pages 2537-2564, 1993. ([https://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(93\)80266-S](https://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(93)80266-S)).
- [31] - *CHERBLANC F.*, Etude du transport miscible en milieux poreux hétérogènes : Prise en compte du non-Equilibre, Mémoire de thèse, Université de Bordeaux I, 1999.
- [32] - *KHALED C.*, Thermographie active appliquée à la caractérisation in situ de parois de bâtiment, Mémoire de thèse, Université d'Artois, 2012.
- [33] - *RAJOMA Bernard*, Etude du comportement thermique des matériaux de construction : cas des murs mono et tricouches en maçonnerie de briques stabilisées, Mémoire de DEA, Université d'Antananarivo, 2008.

- [34] - BRAU J., INSA de Lyon, Département Génie Civil et Urbanisme, cours de transfert de chaleur par conduction, 2005-2006, 40pages.
- [W01] - http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/physique-2/d/conductivite-thermique_4647/.
- [35] - DEGIOVANI A., Diffusivité et méthode flash, In revue générale de thermique n° 185, France, 1977.
- [36] - INCROPERA F. *et al*, Fundamentals of heat and mass transfer, fifth edition, 2002.
- [37] - LAYAL C., Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments, Mémoire de thèse, Université de Grenoble, 2011.
- [38] - BIENVENUE R., Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques de bétons de pouzzolane, Mémoire de thèse, Université Paris 7, 1986.
- [39] - TAYLOR P. *et al.*, Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building, Energy and Buildings, volume 40, issue 5, pages 793 – 800, 2008. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.05.013>).
- [40] - STIJN V. *et al.*, Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use, Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 82, pages 2300 – 2318, 2018. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>).
- [41] - ANTONIO G. *et al*, Influence of natural ventilation on the thermal behavior of a massive building, 6th International Building Physics Conference, Energy Procedia, volume 78, pages 1287 – 1292, 2015. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.142>).
- [42] - MAZZEO D. *et al*, Dynamic thermal characteristics of opaque building components - A proposal for the extension of EN ISO 13786, 6th International building physics conference, Energy Procedia, volume 78, pages 3240 – 3245, 2015. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.787>).
- [43] - EMILIO S. *et al*, Thermal performance evaluation of a massive brick wall under real weather conditions via the conduction transfer function method, case studies in construction materials, volume 7, pages 56 – 65, 2017. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2017.04.003>).
- [44] - FAYCAL E. *et al.*, Thermal performance of unfired clay bricks used in construction in the north of France: Case study, case studies in construction materials, volume 3, pages 102 – 111, 2015. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2015.09.001>).
- [45] - TOMASZ K., Performance of building materials and whole enclosures in non-stationary thermal conditions, 7th Scientific-Technical conference material problems in civil engineering, Procedia Engineering, volume 108, pages 445 – 452, 2015. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.169>).
- [46] - JONATHAN K. *et al.*, A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structures, Energy and Buildings, volume 60, pages 146 – 151, 2013. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.017>).
- [47] - SAMBOU V., Transferts thermiques instationnaires : vers une optimisation de parois de bâtiments, Mémoire de thèse, Université de Toulouse, 2008.
- [48] - PFAFFEROTT J. *et al.*, Design of passive cooling by night ventilation: evaluation of a parametric model and building simulation with measurements, Energy and Buildings,

- volume 35, issue 11, pages 1129 - 1143, 2003.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.09.005>).
- [49] - *CARLOS J.*, An evaluation on the effect of night ventilation on thermal mass to reduce overheating in future climate scenarios, CISBAT International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale, Lausanne-Switzerland, Energy Procedia, volume 122, pages 1045 – 1050, 2017.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.476>).
- [50] - *GIANPIERO E. et al.*, Thermal inertia of heavyweight traditional buildings: experimental measurements and simulated scenarios, Mediterranean Conference of HVAC; Historical buildings retrofit in the Mediterranean area, Matera-Italy, Energy Procedia, volume 133, pages 42–52, 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.369>).
- [51] - *GIVONI, B.*, *L’homme, l’architecture et le climat*. Paris : Editions du Moniteur, 1978.
- [52] - *ANTONOPOULOS K. et al.*, On the dynamic thermal behaviour of indoor spaces, Applied Thermal Engineering, volume 21, issue 9, pages 929 - 940, 2001.
[http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00091-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00091-0)).
- [53] - *TSILINGIRIS P.*, Thermal flywheel effects on the time varying conduction heat transfer through structural walls, Energy and Buildings, volume 35, pages 1037 - 1047, 2003. ([https://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00053-7](https://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00053-7)).
- [54] - *KARIMA E. et al.*, Energy performance and thermal properties of three types of unfired clay bricks, International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies (CONNECT), Energy Procedia, volume 147, pages 495 – 502, 2018.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.059>).
- [55] - *EMANUELE H. et al.*, Definition of parameters useful to describe dynamic thermal behavior of hollow bricks, 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, Lecce-Italy, Energy Procedia, volume 126, pages 50 – 57, 2017. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.056>).
- [56] - *MAURIZIO C. et al.*, Simulating building thermal behavior: the case study of the School of the State Forestry Corp, 69th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, Energy Procedia, volume 81, pages 55 – 63, 2015.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.059>).
- [57] - *CARLINI M. et al.*, Simulating heat transfers through the building envelope: a useful tool in the economical assessment, Energy Procedia, volume 45, pages 395 - 404, 2014. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.043>).
- [58] - *JEAN LOUIS I.*, *L’inertie thermique dans le bâtiment*, Laboratoire ABC – ENSA Marseille, 2006.
- [59] - *LIEBARD A. et al.*, *traité d’architecture et d’urbanisme bioclimatique ; concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, édition du moniteur, 2005.
- [60] - *DE GRACIA A. et al.*, Dynamic thermal performance of alveolar brick construction system, Energy Conversion and Management, volume 52, issue 7, pages 2495 – 2500, 2011. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2011.01.022>).
- [61] - *BALARAS C.A.*, the role of thermal mass on the coolingload of building, An overview of computational methods, Energy and Buildings, volume 24, issue 1, pages 1 - 10, 1996. ([https://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00956-6](https://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(95)00956-6)).

- [62] - *NOREN A. et al.*, The effect of thermal inertia on energy requirements in a Swedish building results obtained with three calculation models, *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 1999.
- [63] - *MEDJELEKH et al.*, A field study of thermal and hygric inertia and its effects on indoor thermal comfort: Characterization of travertine stone envelope, *Building and Environment*, Volume 106, pages 57-77, 2016. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.010>).
- [64] - *ASTE N. et al.*, The influence of the external wall's thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, *Energy and Buildings*, volume 41, issue 11, pages 1181-1187, 2009. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.005>).
- [65] - *KOSSECKA E.*, Influence of insulation configuration on heating and cooling in a continuously used building, *Energy and Buildings*, volume 34, issue 4, pages 321 - 331, 2002. ([http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00121-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00121-9)).
- [66] - *TSILINGIRIS P.*, Parametric space distribution effects of wall heat capacity and thermal resistance on the dynamic thermal behavior of walls and structures, *Energy and Buildings*, volume 38, issue 10, pages 1200 – 1211, 2006. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.02.007>).
- [67] - *GAGLIANO A. et al.*, Assessment of the dynamic thermal performance of massive buildings, *Energy and Buildings*, volume 72, pages 361 – 370, 2014. (<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.060>).
- [68] - *STÉPHAN E. et al.*, Experimental assessment of thermal inertia in insulated and non-insulated old limestone buildings, *Building and Environment*, volume 80, pages 241 – 248, 2014. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.035>).
- [69] - *ASAN H. et al.*, Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, volume 28, issue 2, pages 159 – 166, 1998. ([https://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00007-3](https://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00007-3)).
- [70] - *ELANGO VAN R. et al.*, Thermal performance of building envelopes, *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, Elsevier, pages 169 – 188, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10192-7>).
- [71] - *LAYAL C.*, Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments, *Mémoire de thèse, Université de Grenoble*, 2011.
- [72] - *AHMED A.E.*, Performances thermiques du matériau terre pour un habitat durable des régions arides et semi-arides, *Mémoire de magister, Université de Mouloud Mammeri-Tizi Ouzou*, 2012.
- [73] - *EBEN S.*, Impact of thermal insulation location on building in hot dry climates, *Rapport de recherche Saudi Arabia King, Saudi University, Department of Architecture and Building sciences*, 1989.
- [74] - *BEN H. et al.*, Analyse bioclimatique de l'habitat traditionnel des régions nord sahariennes, *Rapport d'étude, Université de la Rochelle et l'institut USTO d'Oran*, 1995.
- [75] - *CHENG V. et al.*, Effect of envelope color and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate, *Solar Energy*, volume 78, issue 4, pages 528 - 534, 2005. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.05.005>).

- [76] - VAN DER MAAS *et al.*, Passive cooling by night ventilation, European Conference on Energy Performance and indoor Climate in Buildings, volume 2, pages 283 - 292, 1994.
- [77] - SHAVIV E. *et al.*, Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy, Renewable Energy, volume 24, issue 3-4, pages 445 – 452, 2001. ([http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00027-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00027-1)).
- [78] - AHMAD M., Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments, Mémoire de thèse, Université Joseph FOURIER, 2004.
- [79] - JACQUIN P., Le stockage massif de l'énergie, Panorama 2013, [En ligne], Disponible sur : <http://08-VF-Panorama-2013-Le-stockage-massif-de-l-energie.pdf>.
- [80] - LAGHZAOU I A., Stockage de chaleur : Energie solaire et autres applications, Etude bibliographique, Ecole des mines de Douai, 2010.
- [81] - ODRU P., Le stockage de l'énergie, 2^{ème} édition, Broché, 2013.
- [82] - HONGOIS S., Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle, Mémoire de thèse, INSA de Lyon, 2011.
- [83] - AKROUCHE A., Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase, Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, Ecole des mines de Nantes-France, 2011.
- [84] - ISO 6946, Building components and building elements, Thermal resistance and thermal transmittance, Calculation method, 2007.
- [85] - GUOBING Z. *et al.*, Performance of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside heat flux waves, Applied Energy, volume 88, issue 6, pages 2113 - 2121, 2011. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.016>).
- [86] - GUOBING Z. *et al.*, Thermal characteristics of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside temperature waves, Applied Energy, volume 87, issue 8, pages 2666 - 2672, 2010. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.001>).
- [87] - MAZZEO D. *et al.*, Dynamic parameters to characterize the thermal behavior of a layer subject to periodic phase changes, 71st Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, Turin-Italy, Energy Procedia, volume 101, pages 129 – 136, 2016. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.017>).
- [88] - AZHARY K. *et al.*, Energy efficiency and thermal properties of the composite material clay-straw, 4th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPESE, Berlin-Germany, Energy Procedia, volume 141, pages 160 – 164, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.030>).
- [89] - ISO 13786, Thermal performance of building components, Dynamic thermal characteristics, Calculation methods, 2007.
- [90] - JANNOT Y., Cours Transferts thermiques, 2^{ème} année Ecole des Mines Nancy, 2012.
- [91] - ITTERBEEK R., Dynamique des systèmes thermiques - Conduction unidirectionnelle en régime variable, 2016.
- [92] - PIERRE L., Comprendre les inerties thermiques dans les bâtiments, Centre de Ressources EnviroBat Méditerranée, 2010.

- [93] - ALBERTO M., HASHEM A., An index for the overall performance of opaque building elements subjected to solar radiation, *Energy and Building*, volume 157, pages 184 – 194, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.010>).
- [94] - CIANFRINI M. *et al.*, Thermal inertia of hollow wall blocks: actual behavior and myths, CISBAT, Lausanne-Switzerland, 2015.
- [95] - ASAN H., Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials, *Building and Environment*, volume 4, issue 5, pages 615–620, 2006. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.020>).
- [96] - LAKATOS, Investigation of heat transfer decrement of wall structures comparison of measurements and calculations, *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, volume 11, issue 1, pages 1 – 7, 2016. (ISSN 1790-5044).
- [97] - FAYÇAL F. *et al.*, Thermal performance of unfired clay bricks used in construction in the north of France: Case study, *Case Studies in Construction Materials*, volume 3, pages 102 – 111, 2015. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2015.09.001>).
- [98] - ARENDT K. *et al.*, Numerical analysis by FEM and analytical study of the dynamic thermal behavior of hollow bricks with different cavity concentration, *International Journal of Thermal Sciences*, volume 50, issue 8, pages 1543 - 1553, 2011. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.027>).
- [99] - ELANGO VAN R. *et al.*, Thermal performance of building envelopes, *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, Elsevier, volume 2, pages 169–188, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10192-7>).
- [100] - TZOULIS T. *et al.*, Thermal behaviour of concrete walls around all cardinal orientations and optimal thickness of insulation from an economic point of view, *International Conference on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale, SBE16, Procedia Environmental Sciences*, volume 38, pages 381 – 388, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.119>).
- [101] - ULGEN K., Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, *Energy and Buildings*, volume 34, issue 3, pages 273 – 278, 2002. ([http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00087-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00087-1)).
- [102] - ROBERZ F. *et al.*, Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass, *Energy and Building*, volume 138, pages 432 – 442, 2017. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.049>).
- [103] - GASPARELLA A. *et al.*, Thermal dynamic transfer properties of the opaque envelope: analytical and numerical tools for the assessment of the response to summer outdoor conditions, *Energy Build*, volume 43, pages 2509–2517, 2011. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.004>).
- [104] - ASTM C1371-15, Standard Test Method for Determination of emittance of materials near room temperature using portable emissometers, 2015.
- [105] - EN 15976, Flexible sheets for waterproofing, Determination of emissivity, 2011.
- [106] - Di PERNA C. *et al.*, Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads," *Energy and Buildings*, volume 43, issue 1, pages 200 – 206, 2010. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.007>).

- [107] - http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/
- [108] - CRAWLEY D. *et al.*, Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, *Building and Environment*, volume 43, issue 4, pages 661–673, 2008. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>).
- [109] - PERNIGOTTO G. *et al.*, Characterization of the dynamic thermal properties of the opaque elements through experimental and numerical tests, 6th International Building Physics Conference - IBPC, *Energy Procedia*, volume 78, pages 3234 – 3239, 2015. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.786>).
- [110] - ROBERTO B. *et al.*, The passive house in Mediterranean area: parametric analysis and dynamic simulation of the thermal behaviour of an innovative prototype, 70th Conference of the ATI Engineering Association, *Energy Procedia*, volume 82, pages 533 – 539, 2015. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.866>).
- [111] - FARAJI M., Numerical study of the thermal behavior of a novel Composite PCM/concrete wall, International Conference on Materials and Energy 2015, ICOME 15, Tetouan-Morocco, and the International Conference on Materials and Energy 2016, ICOME 16, La Rochelle-France, *Energy Procedia*, volume 139, pages 105 – 110, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.181>).
- [112] - LI ZHU *et al.*, Numerical study on the thermal performance of pipe-embedded PCM building envelope in the heating season, 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), Hong Kong-China, *Energy Procedia*, volume 158, pages 2663 – 2670, 2019. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.019>).
- [113] - RODRIGUEZ M. *et al.*, Thermal evaluation of a ventilated building using dynamic simulations, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2015), *Energy Procedia*, volume 91, pages 963 – 969, 2016. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.263>).
- [114] - GIANPIERO E. *et al.*, Thermal inertia of heavyweight traditional buildings: experimental measurements and simulated scenarios, Climamed 2017 – Mediterranean Conference of HVAC; Historical buildings retrofit in the Mediterranean area, Matera-Italy, *Energy Procedia*, volume 133, pages 42–52, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.369>).
- [115] - MAHDI A. *et al.*, Numerical investigations of the thermal behavior of a HAWT nacelle using ANSYS FLUENT, 4th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPES, Berlin-Germany, *Energy Procedia*, volume 141, pages 394–398, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.049>).
- [116] - HAOMIN W. *et al.*, Numerical investigations on the thermal performance of adaptive ETFE foil cushions, 10th International Conference on Applied Energy (ICAE), Hong Kong-China, *Energy Procedia*, volume 158, pages 3191 – 3195, 2019. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.1012>).
- [117] - TINGTING WU, Formalisme des impédances thermiques généralisées. Application à la caractérisation thermique de parois de bâtiments, Mémoire de thèse, Université d'Artois, 2011.
- [118] - GIORGIO B. *et al.*, Dynamic thermal properties of building components: Hot box experimental assessment under different solicitations, *Energy and Buildings*, volume 168, pages 1 – 8, 2018. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.001>).

- [119] - SALA J. *et al.*, Static and dynamic thermal characterization of a hollow brick wall: Tests and numerical analysis, *Energy Building*, volume 40, pages 1513 – 1520, 2008. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.011>).
- [120] - MARTIN K. *et al.*, Methodology for the calculation of response factors through experimental tests and validation with simulation, *Energy Building*, volume 42, pages 461– 467, 2010. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.015>).
- [121] - PERNIGOTTO G. *et al.*, Experimental characterization of the dynamic thermal properties of opaque elements under dynamic periodic solicitation. Proc. Of BSA, 2nd IBPSA, Bolzano-Italy, 2015.
- [122] - CUCUMO M. *et al.*, A method for the experimental evaluation in situ of the wall conductance, *Energy and Buildings*, volume 38, issue 3, pages 238–24, 2006. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.005>).
- [123] - PENG C. *et al.*, In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction, *Energy and Building*, volume 40, issue 11, pages 2076 – 2082, 2008. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.012>).
- [124] - SAID M. *et al.*, Monitoring of the building envelope of a heritage house: a case study, *Energy and Buildings*, volume 30, pages 211–219, 1998. ([http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00031-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00031-0)).
- [125] - FRANCESCO G. *et al.*, The ZEB Test Cell Laboratory. A facility for characterization of building envelope systems under real outdoor conditions, 11th Nordic Symposium on Building Physics, Trondheim-Norway, *Energy Procedia*, volume 132, pages 531 – 536, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.718>).
- [126] - CABEZA L. *et al.*, Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction, *Energy and Building*, volume 42, issue 5, pages 630 – 636, 2010. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.033>).
- [127] - MARINCIC I. *et al.*, Comparative analysis of the thermal behavior between cellular concrete blocks and stabilized earth blocks as wall materials, ISES Solar World Congress, *Energy Procedia*, volume 57, pages 1783 – 1791, 2014. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.167>).
- [128] - *Institut National de la Statistique*, Enquête auprès des ménages 2010 (EPM 2010). Antananarivo, Madagascar, 2016.
- [129] - ANDRIANIAINA H., Modélisation de l’habitat type tsipoy du trano gasy vaovao dans la région d’Antananarivo - recherche de solutions passives, Mémoire de thèse, Université d’Antananarivo, 2007.
- [130] - RANDRIANARISON M. P., Estimation de l’émission de CO₂ d’habitat typique à Madagascar par l’analyse de cycle de vie, Mémoire de thèse, Université d’Antananarivo, 2011.
- [131] - HAMMER J. P. *et al.*, A Madagascar : chez les Zafimaniry, ISBN 2-910728-41-2, Paris, 2004.
- [132] - ACQUIER J. L., Architecture de Madagascar. ISBN 2-7013-1207-8, Paris : Berger-Levrault, 1997.
- [133] - ANDRIANABELA O. T., Conception numérique du bâtiment type à Madagascar : application code de calcul codyma, Mémoire de DEA, Université d’Antananarivo, 2004.

- [134] - *La Cité des mille*, Histoire, architecture, urbanisme. Edition Tsipika, Antananarivo, Madagascar, 1997.
- [135] - *HERIMAMY R.*, Estimation de la conductivité thermique de bétons à partir de la mise en œuvre de modèles basés sur la masse volumique et le concept de matériaux à deux composants, Mémoire de DEA, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2015.
- [136] - *ASTM C177-85*, Standard test method for steady-state heatflux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded hot plate apparatus, Annual book of ASTM Standards, volume 4, issue 6, pages 21 – 42, 1992.
(<http://dx.doi.org/10.1520/C0177-85>).
- [137] - *ASTM C236-89*, Standard test method for steady-state thermal performance of building assemblies by means of guarded hot box, volume 4, pages 53 – 63, 1993.
(<http://dx.doi.org/10.1520/C0236-89R93E01>).
- [138] - *FOHAGUI F. et al*, The determination of the most economical combination between external wall and the optimum insulation material in Cameroonian's buildings, Journal of building engineering, volume 9, pages 155 – 163, 2017.
(<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.12.008>).
- [139] - *ASHRAE*, Handbook of fundamentals American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [140] - *SABOOR S. et al*, Effect of air space thickness within the external walls on the dynamic thermal behaviour of building envelopes for energy efficient building construction, Energy Procedia, volume 79, pages 766 – 771, 2015.
(<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.564>).
- [141] - *TOURE P. et al*, Experimental determination of time lag and decrement factor, Case study, case studies in construction materials, volume 11, 2019.
(<https://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00298>).
- [142] - *MERAL O.*, Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness, Energy and Buildings, volume 72, pages 288–295, 2014.
(<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.015>).
- [143] - *FERRARINI G. et al*, Periodic thermal behavior of walls: an experimental approach, 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference, pages 392 – 395, 2018.
(<http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2018.028>).
- [144] - *Echelle de Beaufort* sur <http://www.wikipédia.com>, visite en ligne le 08 août 2020.
- [145] - *BALAJI N. et al*, Dynamic thermal performance of conventional and alternative building wall envelopes, Journal of Building Engineering, volume 21, pages 373 – 395, 2019. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.11.002>).

ANNEXES 1 : MATERIAUX DE CONSTRUCTION IDENTIFIES AUX AUTRES COMPOSANTS DE BÂTIMENT

Les composants présentés ici sont autres que les murs et parois. Ce sont le plancher, le plafond, la toiture et la fondation.

A.1.1 - Pour le plancher

Les matériaux les plus utilisés par les ménages pour construire leur plancher sont généralement

- La terre battue ;
- Le bois ;
- Le ciment / béton et
- Les briques et pierres.

Le type de plancher le plus en usage dans les habitats des ménages malgaches est la terre battue. Il représente 44,1% des cas, au niveau national. On rencontre surtout ce type de plancher en milieu rural (47,4%), les paysans mettent sur le sol des nattes fabriquées à l'aide du roseau. Toutefois, il faut signaler que la proportion des ménages urbains qui ont la terre battue comme type de plancher est assez élevée (32,7%). Son utilisation est très fréquente dans la région d'Ihorombe, Melaky, Androy, Bongolava, Itasy, Betsiboka, Anosy, Sofia. Le plancher en bois tient aussi une place importante dans les ménages malagasy et est d'égale importance quel que soit le milieu (28,6% en milieu rural et 27,0% en milieu urbain). L'utilisation du bois comme plancher est prépondérante dans les régions de Vatovavy Fitovinany, Sava, Diana, Antsinanana, Atsimo Antsinanana. Le troisième matériau le plus utilisé est le ciment/béton avec près de 19% des ménages malgaches qui en ont recours. C'est dans les habitats en milieu urbain que l'on trouve ce type de plancher le plus fréquemment, avec une proportion de 36,0%, contre 14,1% en milieu rural. C'est dans les régions d'Analamanga, Alaotra Mangoro, Diana, Boeny que le ciment/béton est le plus utilisé. Le tableau 59 suivant nous récapitule le pourcentage du type des matériaux pour le plancher, par région.

Tableau 59 : Type de matériaux pour le plancher, par région.

Unité: %

Région	Terre battue	Bois	Pierre brique	Ciment béton	Autres	Total
Analamanga	32,0	24,7	0,4	42,6	0,3	100,0
Vakinankaratra	61,6	25,7	0,7	12,1	0,0	100,0
Itasy	71,9	13,1	0,6	14,4	0,0	100,0
Bongolava	75,8	5,1	0,8	18,0	0,3	100,0
Matsiatra Ambony	72,7	17,3	1,5	8,5	0,0	100,0
Amoron'i Mania	72,5	23,9	0,0	3,6	0,0	100,0
Vatovavy Fitovinany	14,9	79,2	0,1	4,0	1,9	100,0
Ihorombe	84,0	1,2	0,0	14,7	0,1	100,0
Atsimo Atsinanana	18,3	44,1	0,1	2,3	35,2	100,0
Atsinanana	4,2	52,2	0,3	9,5	33,9	100,0
Analanjirifo	1,1	30,3	0,5	7,2	60,8	100,0
Alaotra Mangoro	30,8	27,7	0,6	40,5	0,4	100,0
Boeny	63,5	6,4	0,0	29,7	0,4	100,0
Sofia	72,5	2,4	0,3	24,6	0,2	100,0
Betsiboka	75,8	0,1	0,5	23,0	0,5	100,0
Melaky	84,1	3,8	0,0	11,8	0,3	100,0
Atsimo Andrefana	74,4	0,3	0,0	25,3	0,0	100,0
Androy	75,1	20,0	0,0	4,5	0,3	100,0
Anosy	73,9	11,2	0,3	6,6	7,9	100,0
Menabe	66,6	4,8	0,0	28,5	0,2	100,0
DIANA	2,9	59,2	0,2	37,5	0,2	100,0
SAVA	1,0	70,8	1,3	6,9	20,1	100,0
Ensemble	44,1	28,2	0,4	18,9	8,3	100,0

Source: INSTAT/DSM/EPM 2010

A.1.2 - Pour le plafond

Le principal matériau utilisé par les ménages est le bois (plus précisément les voliges) avec 14,5% des habitats malgaches l'utilisent comme plafond. La proportion est plus élevée en milieu urbain qu'en milieu rural dont les pourcentages respectifs sont de 34,4% et 10,2%. L'écorce, feuille et tige tiennent la seconde place (6,5%). Ces types de matériaux se trouvent plus précisément dans les zones côtières de Madagascar. En effet, elles sont adaptées pour les maisons dans ces zones. On rencontre aussi d'autres types de matériaux pour le plafond comme la terre battue et torchis (6,2%) pour les maisons traditionnelles dans les hauts plateaux ; le ciment, parpaing, béton (1,2%) dans les habitats modernes. Le tableau 60 suivant présente le pourcentage du matériau utilisé en plafond par milieu de résidence.

Par contre, on constate que les maisons ne disposant pas de plafond pour leur logement sont très nombreux. Le pourcentage est de 60,5% en 2005 ; 67,3% en 2010 et 68,7% en 2013.

Tableau 60 : Type de matériaux du plafond, par milieu de résidence.

Milieu de résidence	Ecorce/ Feuille/ Tige	Terre battue/ Torchis	Bois (planche, contreplaqué)	Parpaing/ ciment/ béton	Natte	Sans plafond	Autre	Unité: %
								Total
Urbain	3,3	2,7	34,4	4,8	1,5	49,1	4,1	100
Rural	7,2	6,9	10,2	0,4	0,9	72,8	1,5	100
Total	6,5	6,2	14,5	1,2	1,0	68,7	2,0	100

SOURCE : INSTAT/ENSOMD/2012-2013

A.1.3 - Pour le toit

La nature du toit désigne le genre de matériaux utilisés pour la confection du toit. Les matériaux peuvent être de type végétal (chaume, écorce, feuille, tige, bambou), dérivés de l'argile (tuiles) et des matériaux comme le ciment et ses dérivés, tôles, planches. Au niveau national, les matériaux d'origine végétale sont les plus utilisés pour la confection du toit. Le chaume (43%) est utilisé par la majorité de population, suivi par les tiges, écorces et feuilles (29 %). Le recours à ces matériaux d'origine végétale est très fréquent en milieu rural du fait que l'environnement offre beaucoup plus de possibilité par rapport au milieu urbain. Dans les zones rurales des hautes terres malgaches, de très nombreuses maisons sont recouvertes de chaume. Les feuilles, écorces et les tiges sont caractéristiques des zones côtières surtout dans la partie orientale de la Grande Ile grâce à sa végétation dense et très variée. La toiture en tôle aussi est très utilisée dans les habitats avec une proportion de 21% au niveau national. Elle serait appréciée en tant que matériau léger, souple, plus résistant et que son utilisation ne tient pas compte des aléas climatiques (chaleur, pluie, ...). Elle est très fréquente en milieu urbain (surtout dans les GCU) qu'en milieu rural avec respectivement 49% et 5% des toits. Quant à l'usage des tuiles d'argiles cuites, on les rencontre principalement dans les régions des hauts-plateaux (7,3% dans la province d'Antananarivo et 2,1% dans la province de Fianarantsoa) où l'on trouve des terres argileuses. Dans les Grands Centres Urbains (GCU), ces chiffres deviennent plus importants (15,8% à Antananarivo, 17,7% à Antsirabe et 12,6% à Fianarantsoa).

Celles en béton sont en petite proportion par rapport à l'ensemble malgré la longue durée de vie de ce dernier. Ce fait est dû au prix élevé du béton par rapport à d'autres matériaux. Les autres couvertures comme les bardeaux en bois, ceux en feutres et ardoises sont très rares.

A.1.4 - Les fondations

Le choix des matériaux est déterminé par les caractéristiques du terrain : nature des roches, résistance mécanique, niveau d'assiette du sol, points singuliers (points durs, poches, excavations, ...), niveau de la nappe phréatique. A Madagascar, les gens utilisent des briques, des moellons ou du béton pour construire les fondations de leurs maisons d'habitation.

Ainsi, les différentes natures des matériaux les plus répandus dans les habitats, dans toute la Grande Ile, peuvent se résumer dans le tableau 61 ci-après. Nous pouvons constater que les terres battues, l'écorce, les feuilles, les tiges et les terres cuites restent les matériaux les plus utilisés par la grande partie de la population pour la construction de l'enveloppe verticale du bâtiment. Sur les hauts plateaux, la région de la côte Ouest et de la côte Sud-Ouest de la Grande Ile, l'utilisation de terres battues et de terres cuites prédomine avec des toitures en tôles.

Tableau 61 : Récapitulation des matériaux utilisés dans les habitats typiques Malgaches.

	Nature des Matériaux	Répartition
MUR ET PAROI	Terre battue (pisé, adobe, torchis, ...)	34,5% au niveau national (très fréquent en milieu rural)
	Ecorce, feuille, tige	31,4% au niveau national (très abondant dans la partie EST de Madagascar)
	Brique cuite	22,5% dans toute la Grande Ile (caractéristique des hautes terres malgaches et surtout en milieu urbain)
	Planche	7% en totalité (maximale dans la région Androy avec 46%)
	Parpaings, Tôles, pierres, fût, autres	Taux d'utilisation très bas (rarement utilisés)
PLANCHER	Terre battue	44,1% au niveau national (47,4% en milieu rural et 32,7% en milieu urbain)
	Bois	28,2% au niveau national (28,6% en milieu rural et 27% en milieu urbain)
	Ciment/béton	19% au total (fréquent en milieu urbain 36%)
	Pierre/brique	Rarement utilisés (0,4% au total)
PLAFOND	Bois (voliges)	Principal matériau utilisé avec 14,5% au niveau national (abondant en milieu urbain)
	Ecorce, feuille, tige	6,5% en totalité (typique des zones côtières de Madagascar)
	Terre battue (torchis)	6,2% des habitats traditionnelles des hautes terres (typique dans les zones rurales)
	Ciment, parpaing, béton	1,2% au niveau national (surtout dans les habitats modernes des GCU)
	Sans plafond	Très abondant (60,5% en 2005 ; 67,3% en 2010 et 68,7% en 2013)
TOITURE	Chaume	43% (utilisé par la majorité de la population en milieu rural des hautes terres malgaches)
	Ecorce, feuille, tige	Abondant dans la partie orientale de Madagascar (29% au niveau national)
	Tôle	21% au niveau national (fréquent dans les GCU)
	Tuiles	Typique des régions des haut-plateaux (15,8% à Antananarivo, 17,7% à Antsirabe et 12,6% à Fianarantsoa)
	Béton	En très petite proportion
FONDATEMENTS	Moellon, béton, brique	Utilisés par la majorité de la population Malgache dans toute l'Ile.

ANNEXES 2 : LIGNES DE COMMANDE SUR ARDUINO

Les programmes de commande des capteurs DS18B20, DHT11, des modules micro-SD et RTC sont enregistrés dans la carte arduino UNO. Ils sont donnés comme suit :

```
#include <OneWire.h>
```

```
#include <DallasTemperature.h>
```

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <SPI.h>
```

```
#include <SD.h>
```

```
#include "RTClib.h"
```

```
#include "DHT.h"
```

RTC_DS3231 rtc;

```
#define ONE_WIRE_BUS 7
```

```
#define ONE_WIRE_BUS1 3
```

```
#define DHTPIN 2
```

```
#define DHTTYPE DHT11
```

```
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

```
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
```

```
OneWire oneWire1(ONE_WIRE_BUS1);
```

```
DallasTemperature sensors(&oneWire);
```

```
DallasTemperature sensors1(&oneWire1);
```

```
File data;
```

```
char daysOfTheWeek[7][12] = {"Sunday", "Monday", "Tuesday", "Wednesday", "Thursday",  
"Friday", "Saturday"};
```

```
String x[4]={"capteur1:", "capteur2:", "capteur3:", "capteur4:"};
```

```
int nbdevice = sensors.getDeviceCount();
```

```
int nbdevice1 = sensors1.getDeviceCount();
```

```
void setup(void) {
```

```
  sensors.begin();
```

```
  sensors1.begin();
```

```
  dht.begin();
```

```

sensors.setResolution(12);
sensors1.setResolution(12);
Serial.begin(9600);
Wire.begin();
delay(3000); // wait for console opening
  if (! rtc.begin()) {
    Serial.println("Couldn't find RTC");
    while (1);
  }
Serial.println("Initializing SD card...");
if (!SD.begin(4)) {
  Serial.println("no sdcard");
  return;
}
//reglage date et heure:
// rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
// rtc.adjust(DateTime(2019,5,12, 16, 22 , 0));
  if (SD.exists("tempData.txt")) {
Serial.println("tempData.txt exists.");
  } else {
  Serial.println("tempData.txt not exists.");
  }
}
void loop() {
  float t = dht.readTemperature();//capteur de la temperature ambiante
  float h = dht.readHumidity();//capteur d'humidite
  DateTime now = rtc.now();//date et heure
  sensors.requestTemperatures();//Sonde de temperature interieur
  sensors1.requestTemperatures();//sonde de temperature exterieur

```

//***copie des donnees des capteurs à l'interieur vers SDCard*******

```
data=SD.open("tempData.txt",FILE_WRITE);
data.println("INTERIEUR :");
data.print(" ");
data.close();
for (int i=0 ; i<4 ; i++)
{
  data=SD.open("tempData.txt",FILE_WRITE);
if (data) {
  data.print(" ");
  data.print(x[i]);
  data.print(" ");
  data.print(sensors.getTempCByIndex(i));
  data.print(" - ");
  data.print(" ");
  data.print(now.year(), DEC);
  data.print('/');
  data.print(now.month(), DEC);
  data.print('/');
  data.print(now.day(), DEC);
  data.print(" (");
  data.print(daysOfTheWeek[now.dayOfTheWeek()]);
  data.print(") ");
  data.print(now.hour(), DEC);
  data.print(':');
  data.print(now.minute(), DEC);
  data.print(':');
  data.print(now.second(), DEC);
  data.println();
  data.println();
}
```

```
}  
data.close();  
}
```

*******copie des donnees des capteurs à l'exterieur vers SDCard*******

```
data=SD.open("tempData.txt",FILE_WRITE);  
data.println("EXTERIEUR :");  
data.print(" ");  
data.close();  
for (int a = 0 ; a<4 ; a++)  
{  
data=SD.open("tempData.txt",FILE_WRITE);  
if (data) {  
data.print(" ");  
data.print(x[a]);  
data.print(" ");  
data.print(sensors1.getTempCByIndex(a));  
data.print(" - ");  
data.print(" ");  
data.print(now.year(), DEC);  
data.print('/');  
data.print(now.month(), DEC);  
data.print('/');  
data.print(now.day(), DEC);  
data.print(" (");  
data.print(daysOfTheWeek[now.dayOfTheWeek()]);  
data.print(") ");  
data.print(now.hour(), DEC);  
data.print(':');  
data.print(now.minute(), DEC);  
data.print(':');
```

```

data.print(now.second(), DEC);

data.println();

data.println();

}

data.close();

}

*****copie des donnees du DHT11 vers SDCard*****

data=SD.open("tempData.txt",FILE_WRITE);

if(data)
{
    data.println("TEMPERATURE AMBIANTE et HUMIDITE:");
    data.print(" ");
    data.print("Temperature ambiante: ");
    data.print(t);
    data.println(" *C ");
    data.print(" ");
    data.print("Humidite: ");
    data.print(h);
    data.println(" %\t");
    data.println(" *|-----||-----|*");
    data.println();
}

data.close();

delay(895000);//attendre 15min

}

```

ANNEXE 3 : EXTRAIT DES DONNEES DE TEMPERATURE ENREGISTREES DANS LA CARTE MICRO SD

Un extrait est présenté ici pour voir la forme des données de température stockées dans la carte micro SD lors d'une mesure. Lors des mesures, un pas de temps de 15mn a été choisi et vue le nombre de jours de mesure, il y a donc une multitude de données que l'on ne peut pas toutes afficher ici. On va prendre comme exemple le cas lors des mesures sur la cellule en pisé qui s'est débuté le 12 mai 2019. On a utilisé deux capteurs à l'extérieur.

DONNEES DE TEMPERATURE LORS DES MESURE SUR LA CELLULE EN PISE

L'enregistrement dans la carte micro SD se présente comme suit :

CAPTEURS INTERIEURS:

capteur1: 27.19 - 2019/5/12 (Sunday) 16:55:11
capteur2: 25.00 - 2019/5/12 (Sunday) 16:55:11
capteur3: 23.31 - 2019/5/12 (Sunday) 16:55:11
capteur4: 19.62 - 2019/5/12 (Sunday) 16:55:11

CAPTEURS EXTERIEURS:

capteur1: 25.75 - 2019/5/12 (Sunday) 16:55:11
capteur2: 25.25 - 2019/5/12 (Sunday) 16:55:11

TEMPERATURE AMBIANTE et HUMIDITE :

Température ambiante : 19.00 *C
Humidité : 53.00 %

|-----||-----|

CAPTEURS INTERIEURS:

capteur1: 26.75 - 2019/5/12 (Sunday) 17:10:7
capteur2: 25.06 - 2019/5/12 (Sunday) 17:10:7
capteur3: 23.37 - 2019/5/12 (Sunday) 17:10:7
capteur4: 19.69 - 2019/5/12 (Sunday) 17:10:7

CAPTEURS EXTERIEURS:

capteur1: 25.06 - 2019/5/12 (Sunday) 17:10:7
capteur2: 24.62 - 2019/5/12 (Sunday) 17:10:7

TEMPERATURE AMBIANTE et HUMIDITE :

Température ambiante : 20.00 *C
Humidité: 54.00 %

|-----||-----|

CAPTEURS INTERIEURS:

capteur1: 26.31 - 2019/5/12 (Sunday) 17:25:4
capteur2: 25.12 - 2019/5/12 (Sunday) 17:25:4
capteur3: 23.44 - 2019/5/12 (Sunday) 17:25:4
capteur4: 19.81 - 2019/5/12 (Sunday) 17:25:4

CAPTEURS EXTERIEURS:

capteur1: 24.31 - 2019/5/12 (Sunday) 17:25:4
capteur2: 24.00 - 2019/5/12 (Sunday) 17:25:4

TEMPERATURE AMBIANTE et HUMIDITE :

Température ambiante : 19.00 *C
Humidité : 92.00 %

|-----||-----|

CAPTEURS INTERIEURS:

capteur1: 25.94 - 2019/5/12 (Sunday) 17:40:1
capteur2: 25.06 - 2019/5/12 (Sunday) 17:40:1
capteur3: 23.44 - 2019/5/12 (Sunday) 17:40:1
capteur4: 19.87 - 2019/5/12 (Sunday) 17:40:1

CAPTEURS EXTERIEURS:

capteur1: 23.69 - 2019/5/12 (Sunday) 17:40:1
capteur2: 23.44 - 2019/5/12 (Sunday) 17:40:1

TEMPERATURE AMBIANTE et HUMIDITE :

Température ambiante : 19.00 *C
Humidité : 93.00 %

|-----||-----|

CAPTEURS INTERIEURS:

capteur1: 25.50 - 2019/5/12 (Sunday) 17:54:58
capteur2: 25.00 - 2019/5/12 (Sunday) 17:54:58
capteur3: 23.50 - 2019/5/12 (Sunday) 17:54:58
capteur4: 20.00 - 2019/5/12 (Sunday) 17:54:58

CAPTEURS EXTERIEURS:

capteur1: 23.12 - 2019/5/12 (Sunday) 17:54:58
capteur2: 23.00 - 2019/5/12 (Sunday) 17:54:58

TEMPERATURE AMBIANTE et HUMIDITE :

Température ambiante : 19.00 *C
Humidité : 93.00 %

|-----||-----|

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	ii
NOMENCLATURE.....	iii
LISTES DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES ANNEXES	x
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE I – SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET ETAT DES LIEUX.....	3
CHAPITRE I - PHENOMENES PHYSIQUES LIES AU COMPORTEMENT THERMIQUE DU MUR	4
INTRODUCTION.....	4
I.1 - MODE DE TRANSFERT DE CHALEUR SUR UNE PAROI DE BATIMENT	4
I.1.1 - Sollicitations thermiques.....	4
I.1.2 - Les transferts de chaleur à l'extérieur de la paroi	5
I.1.2.1 - La convection thermique	5
I.1.2.2 - Le rayonnement thermique.....	7
I.1.3 - Transfert de chaleur à l'intérieur de la paroi.....	8
I.1.3.1 - Le transfert par conduction.....	9
I.1.3.2 - Concept de conductivité thermique équivalente	10
I.2 - FORMULATION DU PROBLEME DE CONDUCTION DE LA CHALEUR A TRAVERS LA PAROI	11
I.2.1 - Bilan d'énergie.....	11
I.2.2 - Expression des flux thermiques	12
I.2.3 - Equation générale du transfert de chaleur.....	13
I.2.4 - Conditions initiales et conditions aux limites à la surface du mur	13
I.2.4.1 - Conditions initiales.....	13
I.2.4.2 - Les conditions aux limites à la surface du mur [33] [34].....	14
I.3 - LES GRANDEURS THERMIQUES APPARENTES DU MUR	14
I.3.1 - La conductivité thermique	15
I.3.2 - La diffusivité thermique.....	15
I.3.3 - L'effusivité thermique	15
I.3.4 - La chaleur spécifique	16
I.4 - ANALOGIE ELECTRIQUE-THERMIQUE	16
I.4.1 – Définition du système analogique [38]	16
I.4.2 – Analogie électrique-thermique pour un mur en régime permanent	16

CONCLUSION.....	19
CHAPITRE II - COMPORTEMENT THERMIQUE DYNAMIQUES DES MURS SOUMIS A DES TEMPERATURES VARIABLES EN SURFACE	20
INTRODUCTION.....	20
II.1 - ASPECT DYNAMIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU MUR	20
II.1.1 - Enjeux du comportement thermique dynamique du mur extérieur	20
II.1.2 - Inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment.....	21
II.1.2.1 - Définition de l'inertie thermique des parois de bâtiments	21
II.1.2.2 - Types d'inertie thermique	22
II.1.2.2.1 - Inertie thermique de transmission	22
II.1.2.2.2 - Inertie thermique par absorption	22
II.1.2.3 - Enjeux de l'inertie thermique de la paroi.....	23
II.1.2.3.1 - Influence de l'inertie thermique en saison chaude	24
II.1.2.3.2 - Influence de l'inertie thermique en saison froide.....	24
II.1.2.3.3 - Influence de l'inertie thermique durant une période jour/nuit	25
II.2 - STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE	25
II.2.1 - Le stockage par chaleur sensible	26
II.2.2 - Stockage par chaleur latente	26
II.3 - METHODES D'ETUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DYNAMIQUE DES MURS	28
II.3.1 - Caractérisation de l'inertie thermique d'une paroi	28
II.3.2 - Modèle du solide semi-infini	29
II.3.2.1 - Milieu semi-infini	29
II.3.2.2 - Propagation d'une variation sinusoïdale de température en surface.....	29
II.3.2.2.1 - Évolution de la température dans un milieu semi-infini [1] [91] [92]	29
II.3.2.2.2 - Variation de l'amplitude de température en un point x fixé à chaque instant t.....	32
II.3.2.2.3 - Vitesse apparente de propagation de l'onde de température	32
II.3.2.2.4 - Longueur d'onde de propagation de la température.....	33
II.3.2.2.5 - Profondeur de pénétration d'une onde de température	33
II.3.2.2.6 - Le déphasage thermique et le facteur d'amortissement en amplitude [71].	34
II.3.2.3 - Applicabilité du modèle semi-infini à une paroi de dimension finie.....	36
II.3.3 - Les démarches de la norme internationale ISO 13786.....	38
II.3.3.1 - Généralité	38
II.3.3.2 - Termes et définitions utiles	38
II.3.3.3 - Phénomènes physiques à la base de la méthode	38
II.3.3.4 - Formalismes à la base de la méthode.....	40
II.3.3.5 - Matrice de transfert de chaleur.....	43
II.3.3.6 - Les caractéristiques thermiques dynamiques du composant	45
II.3.3.7 - Données requises relatives à un composant.....	46
II.3.3.8 - Procédures de calcul.....	46
II.3.3.9 - Rapport de calcul	48
II.3.4 - Les méthodes numériques	48
II.3.4.1 - Principes généraux des méthodes numériques.....	48

II.3.4.2 - Simulations numériques du problème.....	49
II.3.5 - Les méthodes expérimentales.....	50
II.3.5.1 - Généralités.....	50
II.3.5.2 - Méthodes d'approche lors de la démarche expérimentale.....	51
II.3.5.2.1 - Démarche microscopique ou "interne".....	51
II.3.5.2.2 - Démarche de la boîte noire.....	51
II.3.5.3 - Grandeurs mesurées expérimentalement.....	52
II.3.5.4 - Les méthodes de caractérisation thermique d'une paroi de bâtiment.....	52
II.3.5.4.1 - Les méthodes en laboratoire : paroi en conditions contrôlées.....	53
II.3.5.4.2 - Les mesures in situ.....	55
CONCLUSION.....	60
CHAPITRE III - TYPOLOGIES DES MURS ET HABITAT-TYPES A MADAGASCAR.....	61
INTRODUCTION.....	61
III.1 - CLASSIFICATIONS DE L'HABITAT SELON L'ARCHITECTURE MALGACHE.....	61
III.1.1 - Les habitats traditionnels.....	62
III.1.1.1 - En milieu rural.....	62
III.1.1.1.1 - Dans les Hauts Plateaux.....	62
III.1.1.1.2 - Dans les zones côtières.....	63
III.1.1.2 - En milieu urbain.....	64
III.1.2 - Les habitats modernes.....	64
III.2 - MATERIAUX DE CONSTRUCTION IDENTIFIES SUR LES PAROIS DE BATIMENT.....	65
III.2.1 - Pour les murs et parois.....	66
CONCLUSION.....	68
PARTIE II –	69
CHAPITRE IV - DETERMINATION DES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DES MATERIAUX.....	70
INTRODUCTION.....	70
IV.1 - DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE.....	70
IV.1.1 - Mesures des dimensions d'un échantillon de matériau constituant le mur.....	71
IV.1.1.1 - Dimensions des échantillons en terre battue.....	71
IV.1.1.2 - Dimensions des échantillons en brique adobe.....	72
IV.1.1.3 - Dimensions des échantillons en brique d'argile cuite.....	72
IV.1.2 - Mesure de la masse moyenne des échantillons.....	73
IV.1.3 - Calcul de la masse volumique apparente moyenne.....	74
IV.2 - DETERMINATION DES PROPRIETES THERMIQUES DE CHAQUE TYPE DE MUR.....	75
IV.2.1 - Calculs de la conductivité thermique équivalente.....	75
IV.2.2 - Calculs de la chaleur spécifique C_p	76

CONCLUSION.....	76
CHAPITRE V - APPROCHE EXPERIMENTALE DE LA MESURE DE L'INERTIE THERMIQUE DES PAROIS.....	77
INTRODUCTION.....	77
V.1 - REALISATION DU PLAN EXPERIMENTAL DE MESURE.....	77
V.1.1 - Démarches expérimentales.....	77
V.1.2 - Justification des choix et présentation des cellules de mesure.....	78
V.1.2.1 - La cellule de mesure en brique d'argile cuite (CBAC).....	78
V.1.2.2 - La cellule de mesure en terre crue battue (CTCB).....	80
V.1.3 - Justification du choix des trois structures murales de la CBAC.....	81
V.1.4 - Conditions d'expérimentations.....	82
V.1.5 - Présentation des instrumentations de mesure utilisées.....	82
V.1.5.1 - Capteurs de température.....	82
V.1.5.1.1 - La sonde de température DS18B20.....	82
V.1.5.1.2 - Le capteur DHT11.....	83
V.1.5.2 - Le central d'acquisition des données.....	84
V.1.6 - Etalonnage des capteurs de température en surface utilisés.....	86
V.1.6.1 - Vérification des capteurs du groupe à l'extérieur.....	87
V.1.6.2 - Vérification des capteurs du groupe à l'intérieur.....	87
V.1.7 - Principe de mise en place des instrumentations lors des mesures in situ.....	88
V.2 - MESURE DES TEMPERATURES IN SITU.....	89
V.2.1 - Mesure des températures de la cellule CBAC.....	89
V.2.1.1 - Mesure des températures de surface des parois.....	90
V.2.1.1.1 - Orientation des parois.....	90
V.2.1.1.2 - Positionnement des capteurs DS18B20 sur la surface.....	90
V.2.1.1.3 - Calendrier de mesures.....	90
V.2.1.1.4 - Exemples de données relevées.....	91
V.2.1.2 - Mesures de la température ambiante à l'intérieur.....	91
V.2.2 - Mesure des températures de la cellule de mesure CTCB.....	92
V.2.2.1 - Mesure des températures de surface de la paroi.....	92
V.2.2.1.1 - Orientation de la paroi et emplacement des capteurs.....	92
V.2.2.1.2 - Calendrier de mesure.....	93
V.2.2.1.3 - Exemples de données relevées in situ.....	93
V.2.1.2 - Mesures de la température ambiante à l'intérieur.....	94
V.3 - CALCULS DES DEPHASAGES ET DES AMORTISSEMENTS THERMIQUES.....	94
V.3.1 - Calcul des déphasages de l'onde thermique.....	94
V.3.2 - Calcul des facteurs d'amortissement de l'onde thermique.....	95
CONCLUSION.....	95
CHAPITRE VI – CARACTERISATION DES MURS SUIVANT LA NORME ISO 13786.....	96
INTRODUCTION.....	96

VI.1- CONCEPTION D'UN OUTIL DE CALCULS	96
VI.1.1- Généralités	96
VI.1.2- Outil de conception	96
VI.1.3- Mise en œuvre de l'outil de calculs	96
VI.1.3.1- Choix du composant ou élément d'un composant.....	97
VI.1.3.2- Choix de la structure du composant	97
VI.1.3.3- Insertion des données pour les calculs	98
VI.1.3.4- Affichage des résultats de calculs.....	98
VI.2 – MISE EN ŒUVRE SUR LES PAROIS MONOCOUCHEs	99
VI.2.1 - Données requises pour les calculs.....	99
VI.2.1.1 - Données relatives aux parois monocouches étudiées.....	99
VI.2.1.2 - Données microclimatiques	99
VI.2.2 – Calcul de la transmittance thermique U	101
VI.3 – MISE EN ŒUVRE SUR LES PAROIS MULTICOUCHEs	101
VI.3.1 - Données requises pour les calculs.....	101
VI.3.1.1 - Données relatives aux parois multicouches étudiées.....	101
VI.3.1.2 - Données microclimatiques	102
VI.3.2 – Calcul de la transmittance thermique U	103
CONCLUSION.....	104
CHAPITRE VII – RESULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS	105
INTRODUCTION.....	105
VII.1 – RESULTATS DE MESURES EXPERIMENTALES	105
VII.1.1 - Conformité des données relevées par les capteurs	105
VII.1.2 – Courbes de variation des températures de surfaces	107
VII.1.2.1 – Température de surfaces de la cellule de mesure CBAC	107
VII.1.2.1.1 - Sur la paroi 1	108
VII.1.2.1.2 - Sur la paroi 2	108
VII.1.2.1.3 - Sur la paroi 3	109
VII.1.2.1.4 - Sur la paroi 4	110
VII.1.2.2 - Température de surfaces de la cellule de mesure CTCB	110
VII.1.3 - Courbes de variation de la température ambiante intérieure	111
VII.1.3.1 - Température ambiante à l'intérieur de la cellule de mesure CBAC	111
VII.1.3.2 - Température ambiante à l'intérieur de la cellule de mesure CTCB.....	112
VII.1.4 – Valeurs du déphasage thermique	113
VII.1.5 – Valeurs du facteur d'amortissement	114
VII.1.6 – Moyennes du déphasage et du facteur d'amortissement thermique	115
VII.1.7 - Analyses et discussions des résultats.....	116
VII.2 – RESULTATS DES DEMARCHES DE LA NORME ISO 13786	118
VII.2.1 - Rapports et résultats des calculs pour les parois monocouches.....	118
VII.2.1.1 – Description du composant et identification des matériaux.....	118
VII.2.1.2 - La période de variation choisie	118
VII.2.1.3 - Les quatre éléments de la matrice de transfert de chaleur Z.....	118
VII.2.1.4 - Les sept caractéristiques relatives au comportement thermique dynamique des parois monocouches.....	119

VII.2.1.4.1- Admittances thermiques des parois monocouches	119
VII.2.1.4.2- Propriétés dynamiques de transfert thermique des parois monocouches	121
VII.2.1.5 - Valeurs de la transmittance thermique U des parois monocouches.....	122
VII.2.2 - Résultats et rapports des calculs pour les parois multicouches	123
VII.2.2.1 - Description du composant et identification des matériaux	123
VII.2.2.2 - La période de variation choisie	124
VII.2.2.3 - Les quatre éléments de la matrice de transfert Z des parois multicouches ...	125
VII.2.2.4 - Les sept caractéristiques thermiques dynamiques des parois multicouches .	126
VII.2.2.4.1- Admittances thermiques des parois multicouches.....	126
VII.2.2.4.2- Propriétés dynamiques de transfert thermique des parois multicouches.	127
VII.2.2.5 - Valeurs de la transmittance thermique U des parois multicouches.....	129
VII.2.3 – Caractéristiques thermiques dynamiques moyennes.....	129
VII.2.3.1 – Admittances thermiques moyennes	129
VII.2.3.2 – Propriétés dynamiques moyennes	130
VII.2.3.3 – Transmittances thermiques moyennes.....	131
VII.2.3.4 - Analyses et discussions des résultats	131
 VII.3 - COMPARAISON DES RESULTATS EXPERIMENTAUX AVEC LA NORME ISO 13786	 132
VII.3.1- Introduction.....	132
VII.3.2 – Comparaison du déphasage thermique	132
VII.3.3 – Comparaison du facteur d’amortissement.....	133
VII.3.4 – Analyses et discussions des résultats	133
 CONCLUSION.....	 134
 CONCLUSION GENERALE.....	 136
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 I
 ANNEXES 1 : MATERIAUX DE CONSTRUCTION IDENTIFIES AUX AUTRES COMPOSANTS DE BÂTIMENT.....	 XI
 ANNEXES 2 : LIGNES DE COMMANDE SUR ARDUINO.....	 XVI
 ANNEXES 3 : EXTRAIT DES DONNEES DE TEMPERATURE ENREGISTREES DANS LA CARTE MICRO SD	 XXI
 TABLE DES MATIERES	 XXIII

Auteur : RABEMANANTSOA Herimamy Naharitra
Titre : **Etude de l'inertie thermique de parois : cas des murs typiques de maisons d'habitation de Madagascar**
Nombre de pages : 141
Nombre de tableaux : 61
Nombre de figures : 59

RESUME

Ce manuscrit traite la caractérisation du comportement thermique dynamique de composants de bâtiment et s'inscrit dans le domaine du confort thermique de l'habitat. Le but est de déterminer l'inertie thermique des murs à base de terre des constructions types de Madagascar. L'étude s'appuie sur deux méthodes de caractérisations. La première est faite selon les démarches définies par la norme internationale ISO 13786. La deuxième consiste à une caractérisation in situ sur des cellules de mesures réalisées. Une confrontation des résultats données par les deux méthodes est aussi effectuée. Les caractéristiques thermiques dynamiques obtenues permettent de comparer les performances des différents types de murs, enveloppe d'un bâtiment, quant au confort thermique qu'elle procure. Des murs en terre, façonnés en brique ou non, sont entrepris durant notre investigation.

D'après les deux méthodes d'approche, les résultats de l'étude nous ont permis de retrouver que l'épaisseur du mur a un effet significatif sur le facteur d'amortissement et le temps de retard de la propagation de la variation journalière de température.

Mots clés : ISO 13786 - Inertie thermique – Déphasage thermique - Facteur d'amortissement – Mesure in situ - Murs en terre – Habitat à Madagascar.

ABSTRACT

This manuscript deals with the characterization of the dynamic thermal behavior of building components and is part of the thermal comfort of the home. The aim is to determine the thermal inertia of the earth-based walls of the typical constructions of Madagascar. The study is based on two methods of characterization. The first is done according to the procedures defined by the international standard ISO 13786. The second one consists in an in-situ characterization on cells of realized measurements. A comparison of the results given by the two methods is also performed. The dynamic thermal characteristics obtained make it possible to compare the performances of the different types of walls, envelope of a building, as for the thermal comfort that it provides. Earth walls, whether brick or not, are undertaken during our investigation. Based on the two approach methods, the results of the study found that the thickness of the wall has a significant effect on the decrement factor and the time lag of the propagation of the daily variation of temperature.

Keys words : ISO 13786 - Thermal inertia - Time shift - Decrement factor - In situ measurement - Earth walls - Habitat in Madagascar.

Directeur de thèse : Mme RAHELIARILALAO Bienvenue, Professeur Titulaire
Coordonnées de l'auteur : LOT IM 39 A Mangatany - Arivonimamo 112.
+261341387738 – rabemanantsoaherimamy@gmail.com