

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

*Paix – Travail – Patrie*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YAOUNDE I  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

\*\*\*\*\*

CENTRE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE EN  
SCIENCE, TECHNOLOGIE ET  
GEOSCIENCES  
LABORATOIRE D'ENERGIE ET DES  
SYSTEMES ELECTRIQUES ET  
ELECTRONIQUES



REPUBLIC OF CAMEROUN

*Peace – Work – Fatherland*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
FACULTY OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF PHYSICS

\*\*\*\*\*

POSTGRADUATE SCHOOL OF  
SCIENCE, TECHNOLOGY AND  
GEOSCIENCES  
LABORATORY OF ENERGY,  
ELECTRIC AND ELECTRONIC  
SYSTEMS

**CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DES  
MATERIAUX LOCAUX DE BATIMENTS ET  
MODELISATION ENERGETIQUE D'UN BATIMENT A  
BASSE CONSOMMATION D'ENERGIE DANS UN  
CLIMAT TROPICAL AFRICAIN**

THESE

Présentée pour l'obtention du Diplôme de Doctorat/Ph.D en Physique

Par : **WATI Elvis**  
Master en Physique

Sous la direction de  
**MEUKAM Pierre**  
Maitre de Conférences

Année Académique : 2018



RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN  
Paix-Travail-Patrie  
\*\*\*\*\*  
UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I  
\*\*\*\*\*  
FACULTÉ DE SCIENCES  
\*\*\*\*\*  
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROON  
Peace-Work-Fatherland  
\*\*\*\*\*  
THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
\*\*\*\*\*  
FACULTY OF SCIENCE  
\*\*\*\*\*  
DEPARTMENT OF PHYSICS

## ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THÈSE DE DOCTORAT/Ph.D

Nous, Professeur **BEN-BOLIE Germain Hubert** et Professeur **KOFANE Timoléon Crépin**, respectivement Examineur et Président du jury de la Thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur **WATI Elvis**, Matricule **05Q173**, préparée sous la supervision du Professeur **MEUKAM Pierre**, intitulée : « **Caractérisation thermophysique des matériaux locaux de bâtiments et modélisation énergétique d'un bâtiment à basse consommation d'énergie dans un climat tropical africain** », soutenue le **Vendredi, 07 septembre 2018**, en vue de l'obtention du grade de Docteur/Ph.D en Physique, Spécialité **Physique de l'Environnement**, Option **Energie et Environnement**, attestons que toutes les corrections demandées par le jury de soutenance ont été effectuées.

En foi de quoi, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé, le ..... **24 SEPT 2018** .....

L'Examineur

Pr. **BEN-BOLIE Germain**  
**Hubert**

Le Chef de Département de Physique



Pr. **NDJAKA Jean-Marie**  
**Bienvenue**

Le Président du jury

Pr. **KOFANE Timoléon**  
**Crépin**

---

## Dédicace

A ma mère  
et à la mémoire de mon père

---

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'éternel Dieu, le Tout Puissant pour la santé et l'intelligence qu'il m'a accordée.

Je remercie très profondément le Professeur MEUKAM Pierre pour sa grande disponibilité dans l'accomplissement de ce travail, pour ses nombreuses critiques constructives qui n'ont cessé chaque fois de me galvaniser. Ses conseils, sa rigueur et son sens de la compréhension qui me poussent chaque fois vers l'avant.

Tous mes remerciements et reconnaissances également aux enseignants du Département de Physique de l'Université de Yaoundé I pour tous les enseignements dispensés et l'encadrement reçu. Je pense notamment au Pr KOFANE Timoléon, au Pr NJOMO Donatien et au Dr OBOUNOU Marcel.

Que Pr KOFANE Timoléon, Pr MEUKAM Pierre, Pr TAMO TATSIETSE Thomas, Pr BEGUIDE BONOMA, Pr BEN-BOLIE Germain et Pr KUICHE Alexis trouvent ici l'expression de ma plus vive reconnaissance pour avoir accepté de participer à ce jury.

J'adresse de sincères remerciements à Mme SANDJONG Emilienne, à mon épouse DJEAGOU MANEKEN Isabelle et à tous mes frères et leurs épouses. Je pense particulièrement à SANHAFOUO Ferdinand, NGUETOUM Serges, FOMEKONG Germain, TIDO Théophile, SONKOUÉ Ernest.

Je remercie toute la famille DJEAGOU. Je pense particulièrement à M. DJEAGOU Samuel, Mme DJEAGOU Elarise et Mme ANAMBE Agnès

Je remercie mes chers amis, MOAFO Marius, FOLEM Bruno, TAMANFOUO Arnaud, KOUCHE Josiane, M. et Mme NOTSA.

Je remercie tous mes camarades des laboratoires L3E de l'ENSP Yaoundé et LATEE de la Faculté des Sciences de l'UYI; je pense notamment à DAMFEU Claude, NGONO Rachel, PAHANE Denis.

Je remercie tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à l'élaboration de ce travail et qui pensent que leurs noms auraient dû figurer dans cette rubrique.

---

## Résumé

Ce travail vise à apporter une contribution à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie dans un climat tropical africain. Pour ce faire, la mise au point et la caractérisation thermophysique de quelques matériaux locaux d'enveloppe de bâtiment obtenus à partir de la latérite et/ou de la pouzzolane est faite. Ces matériaux, un isolant conventionnel, le béton et/ou le parpaing de sable ont constitué l'enveloppe d'un local dont une modélisation énergétique a été faite sous Simulink. Des simulations ont permis d'étudier l'influence de la distribution des différentes couches du mur extérieur sur sa performance thermique et l'impact des ombres portées des objets environnants du bâtiment sur sa consommation énergétique.

La méthode du plan chaud asymétrique a permis de déterminer la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau : (1) des briques de latérite incorporant 15, 30 et 45% de pouzzolane, (2) du parpaing de pouzzolane et (3) du parpaing de sable. Les résultats ont montré que la variation du taux de pouzzolane de taille de grains comprise entre 2 et 2,5 mm n'influence pas significativement les propriétés thermophysiques des briques de terre. Les résultats ont aussi montré que la conductivité thermique du parpaing de pouzzolane anhydre est environ 1,6 fois plus faible que celle du parpaing de sable sec. Les méthodes du plan chaud symétrique et du ruban chaud symétrique ont permis de montrer que la conductivité thermique des blocs de latérite secs incorporant de la pouzzolane peut être réduite d'environ 17% lorsque la fraction granulaire de la pouzzolane passe de 0/2,5mm à 5/10mm.

Les résultats des simulations numériques ont montré que la configuration optimale des différentes couches du mur extérieur dépend du mode de fonctionnement du système de climatisation (climatisation en continue ou de façon intermittente). Les résultats ont également montré que pour un mur extérieur constitué d'une couche de parpaings de 20 cm d'épaisseur et d'une couche de polystyrène comme isolant, une augmentation du taux de rayonnement solaire obstrué induit une décroissance significative de l'épaisseur optimale de l'isolant.

**Mots clés :** matériaux locaux ; caractérisation thermophysiques ; simulation numérique ; bâtiments écologiques ; climat tropical.

---

## Abstract

This study aims to promote low energy building in an African tropical climate. Thus, the development and the thermophysical characterization of some local building materials obtained from laterite and/or pozzolan were done. These materials, a conventional thermal insulation, concrete and/or hollow concrete block have constituted the external wall of a typical room. The thermal modeling of this room was done in Simulink. Some simulations were used to study the effect of the wall layers distribution on its thermal performance and the influence of the site on the energy requirement of the room.

The asymmetric hot plane method was used to investigate the variations of the thermal conductivity with respect to the water content of: (1) laterite blocks incorporating 15, 30 and 45% of pozzolan, (2) cinder block and (3) pozzolan block. The results showed that the content of pozzolan which particles size range between 2-2.5mm does not significantly influence the thermophysical properties of the studied bricks. Results also showed that the thermal conductivity of pozzolan blocks is approximately 1.6 lower than that of cinder blocks. Using the symmetric hot strip and hot plane methods, it was showed that the thermal conductivity of bricks incorporating pozzolan can be reduced up to 17% when the granular fraction of pozzolan increases from 0/2.5 mm to 5/10 mm.

Results from numerical simulations show that the optimal configuration of external wall layers depends on the operating mode of the air-conditioning system. Results also show that, for the external wall consists of hollow concrete block layer (20 cm thick) and a polystyrene layer, as shade level increases, optimum insulation thickness significantly decreases.

**Keywords:** local materials; thermophysical characterization; numerical simulation; ecological buildings; tropical climate.

---

## Table des matières

<b>Dédicace.....</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>ii</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>iv</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>v</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>x</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Nomenclature.....</b>	<b>xiv</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 Revue de la littérature .....</b>	<b>4</b>
Introduction .....	4
1. Climat et conception architecturale des maisons en zone tropicale : cas du Cameroun.....	4
1.1. Le climat camerounais .....	4
1.2. Paramètres climatiques influençant le mode constructif .....	5
1.2.1. Le rayonnement solaire .....	5
1.2.2. La température de l'air .....	6
1.2.3. L'humidité relative .....	6
1.2.4. Les précipitations .....	7
1.3. Génération des valeurs horaires des paramètres climatiques .....	8
1.4. Typologie des constructions au Cameroun : état des lieux .....	8
1.4.1. Construction traditionnelle au Cameroun .....	8
1.4.2. L'habitat urbain au Cameroun.....	11
1.5. Conception architecturale bioclimatique .....	12
1.5.1. Le site de construction.....	13
1.5.2. La forme des bâtiments .....	13
1.5.3. L'orientation des bâtiments .....	13
1.5.4. L'isolation des parois de l'enveloppe de bâtiment.....	14
1.5.5. L'inertie thermique des parois.....	20
1.5.6. Les protections solaires .....	21
2. Transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux poreux : théorie .....	22
2.1. Description des milieux poreux .....	22
2.2. Transfert de masse dans un milieu poreux .....	23

2.2.1.	Stockage d'humidité.....	23
2.2.1.1.	Mode de fixation de l'humidité.....	24
2.2.1.2.	Condensation capillaire – Loi de Kelvin-Laplace.....	25
2.2.2.	Transport de la vapeur dans un milieu poreux.....	26
2.2.3.	Transport d'eau liquide dans un matériau poreux.....	28
2.2.4.	Transfert d'humidité : bilan.....	28
2.3.	Transfert de la chaleur.....	28
2.3.1.	Stockage de la chaleur.....	28
2.3.2.	Lois de transfert de chaleur.....	29
3.	Synthèse des recherches effectuées sur les matériaux à base de la terre.....	30
3.1.	La terre : une bonne réponse au développement durable de l'Afrique.....	30
3.2.	Utilisations de la terre comme matériau de construction.....	32
3.3.	Stabilisation des briques de terre.....	32
3.3.1.	La stabilisation mécanique.....	32
3.3.2.	La stabilisation physique.....	32
3.3.3.	La stabilisation chimique.....	33
3.3.4.	La stabilisation par cuisson.....	34
3.4.	Propriétés physiques des matériaux à base de la terre.....	34
3.5.	Propriétés mécaniques des matériaux à base de la terre.....	35
3.6.	Conductivité thermique des matériaux à base de la terre.....	37
3.7.	Chaleur spécifique.....	38
3.8.	Effusivité et diffusivité thermique.....	39
3.10.	Perméabilité à la vapeur d'eau.....	41
<b>Chapitre 2 Caractérisation thermophysique.....</b>		<b>45</b>
	Introduction.....	45
1.	Méthodes de mesure des propriétés thermophysiques.....	45
1.1.	Méthode du fil chaud.....	45
1.2.	Méthode du ruban chaud.....	46
1.3.	Mesure de la conductivité des matériaux isolants à partir d'un dispositif de trois couches circulaires.....	48
1.4.	Méthodes du plan chaud symétriques.....	49
1.4.1.	Modèle avec échantillons finis et isolants semi-infinis.....	49
1.4.2.	Modèle avec deux échantillons supposés semi-infinis.....	51
1.5.	Méthodes du plan chaud asymétriques.....	52



1.5.1.	Modèle avec un échantillon semi-infini .....	52
1.5.2.	Modèle avec échantillon et isolants non semi-finis. ....	54
2.	Matériels .....	58
2.1.	Présentation et analyse des matériaux entrant dans la confection des échantillons ..	58
2.1.1.	La latérite.....	58
2.1.2.	La pouzzolane .....	62
2.1.3.	Le ciment.....	63
2.2.	Caractéristiques des appareils utilisés .....	64
3.	Etude de l'impact du taux de pouzzolane sur les propriétés thermophysiques des briques de terre stabilisée .....	65
3.1.	Préparation des échantillons .....	65
3.2.	Méthode d'estimation .....	66
3.2.1.	Estimation de la surface utile de l'élément chauffant et de sa capacité thermique volumique .....	66
3.2.2.	Influence de l'emballage de l'échantillon et étalonnage .....	69
3.3.	Résultats et discussion .....	71
4.	Etude de l'impact de la taille des grains de pouzzolane sur les propriétés thermophysiques des BTSP .....	74
4.1.	Préparation des échantillons .....	74
4.1.1.	Préparation des mélanges à compacter.....	75
4.1.2.	Compactage .....	76
4.1.3.	Séchage.....	78
4.2.	Mesure des propriétés thermophysiques.....	78
4.2.1.	Mesure de la surface utile des éléments chauffants .....	79
4.2.2.	Méthode de mesure, résultats et discussions .....	80
5.	Propriétés thermophysiques du parpaing de pouzzolane .....	84
5.1.	Préparation des échantillons .....	84
5.2.	Résultats et discussion .....	85
	Conclusion .....	86
	<b>Chapitre 3 : Modélisation du comportement thermique dynamique d'un local et études numériques.....</b>	<b>87</b>
	Introduction .....	87
1.	Présentation de l'outil de simulation utilisé.....	87
1.1.	Généralité sur HAM-tools .....	87

---

1.2.	Transfert de chaleur dans la paroi.....	90
1.3.	Modèle de zone.....	93
2.	Modélisation du local.....	93
3.	Validation du modèle.....	94
3.1.	Validation à l'échelle de la paroi.....	94
3.2.	Validation à l'échelle du bâtiment.....	95
3.2.1.	EnergyPlus : description.....	95
3.2.2.	Confrontation des résultats.....	97
4.	Indicateurs de performance thermique des murs.....	99
4.1.	Bâtiment continuellement climatisé.....	99
4.2.	Bâtiment climatisé de façon intermittente.....	101
5.	Optimisation de la distribution des différentes couches d'un mur composite.....	101
5.1.	Description des configurations de murs étudiées.....	101
5.2.	Bâtiment continuellement climatisé.....	103
5.2.1.	Caractéristiques thermiques des murs non isolés.....	103
5.2.2.	Influence de la configuration du mur sur le déphasage.....	104
5.2.3.	Influence de la configuration du mur sur le facteur d'amortissement.....	105
5.2.4.	Influence de la configuration du mur sur le pic du flux de chaleur à la surface interne du mur.....	106
5.3.	Bâtiment climatisé de façon intermittente.....	107
5.3.1.	Effet de la configuration du mur sur l'énergie transmise à l'intérieur.....	107
5.3.2.	Effet de la configuration du mur sur le pic de chaleur (iCA).....	108
5.3.3.	Influence de l'épaisseur de l'isolant sur la performance thermique des différentes configurations de mur.....	109
6.	Influence de l'orientation du mur sur la densité de flux de chaleur à la surface interne des murs.....	110
7.	Influence des ombres portées sur le pic de la densité de flux de chaleur à la surface interne du mur.....	111
8.	Influence des ombres portées sur l'énergie thermique transmise à l'intérieur.....	112
9.	Considérations économiques.....	115
9.1.	Modèle économique.....	115
9.2.	Local continuellement climatisé.....	117
9.2.1.	Optimisation de l'épaisseur de l'isolant.....	117
9.2.2.	Influence des ombres portées sur l'épaisseur optimale de l'isolant.....	118

---

9.3. Local climatisé de façon intermittente.....	122
Conclusion.....	124
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>126</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>129</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>135</b>
A. Génération des valeurs horaires des paramètres climatiques .....	135
A.1. Prédiction des valeurs horaires du rayonnement .....	135
A.2. Prédiction des valeurs horaires moyennes de température, d’humidité et de pression atmosphérique.....	136
B. Analyse granulométrique de la pouzzolane .....	137
C. Modélisation 3D du transfert de chaleur au sein du dispositif de la section 1.5.2 du chapitre 2 .....	140
Liste de publications issues de cette thèse. ....	143

---

## Liste des figures

Figure 1.1: Cameroun et climat (Demanou et al., 1993).....	4
Figure 1.2: Maximums et minimums de températures journalières des villes de Garoua (a) et de Douala (b) (moyenne sur la période 1985-2005).....	6
Figure 1.3: Répartition des précipitations journalières au Cameroun (Tsafack, 2013).....	7
Figure 1.4: Maison traditionnelle en « carabot » dans les régions côtières.....	8
Figure 1.5: Maison en terre avec ossature en bois des régions forestières du Cameroun.....	9
Figure 1.6: Maison traditionnelle des régions montagneuses.....	10
Figure 1.7: Briques de terre crue en phase de séchage (a) et maison en brique de terre crue ou adobe (b).....	11
Figure 1.8: Photo de quelques maisons traditionnelles dans la zone septentrionale du Cameroun.....	11
Figure 1.9: Maison moderne au Cameroun.....	12
Figure 1.10: Principe d'isolation réfléchissante dans les combles (a) et dans un mur (b).....	15
Figure 1.11: Exemple d'isolation des combles.....	16
Figure 1.12: Photos de quelques isolants synthétiques : polyuréthane (a), polystyrène expansé (b) et extrudé (c).....	19
Figure 1.13: Photos de quelques isolants minéraux : laine de roche (a), verre cellulaire (b) et perlite expansée (c).....	19
Figure 1.14: Photos de quelques isolants végétaux : laine de lin (a), laine de chanvre (b) et bois feutré (c).....	19
Figure 1.15: Evolution des températures extérieure et intérieure d'un local refroidi via la technique de ventilation nocturne.....	20
Figure 1.16: Diagramme de phase d'un matériau poreux non saturé (Samri, 2008).....	22
Figure 1.17: Représentation schématique des états hydriques d'un milieu poreux (Salager, 2006).....	24
Figure 1.18: Condensation capillaire dans un pore (Collet, 2004 cité Nassima, 2010).....	25
Figure 1.19: Rayon du capillaire en dessous duquel se produit la condensation capillaire pour $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Cerezo, 2005).....	26
Figure 1.20: Différents murs en terre exposés 20 ans durant aux conditions climatiques de France (Bui et al., 2009).....	31
Figure 1.21: Porosité des briques de terre compressée et stabilisée (BTS) en fonction de la masse volumique sèche (Kerali, 2001).....	35
Figure 1.22: Illustration du calcul du coefficient de Poisson.....	36
Figure 1.23: Capacités thermiques volumique des briques de terre compressées (Bal et al. 2012).....	39
Figure 1.24: Courbe de sorption de blocs de : latérite, latérite+sciure de bois et latérite+ pouzzolane (Meukam, 2004).....	41
Figure 1.25: Courbes d'adsorption et désorption de deux types de briques de terre crue étudiées dans le projet TERCRUSO, avril 2013 (Cagnon et al., 2014).....	41
Figure 1.26: Mesure de la perméabilité par la méthode de la coupelle (Piot, 2009).....	42
Figure 2.1: Schéma de principe de la méthode du fil chaud.....	45
Figure 2.2: Schéma de principe de la mesure simultanée de la conductivité et de l'effusivité.....	46
Figure 2.3: Dispositif de la méthode de trois couches circulaires.....	48
Figure 2.4: Schéma de principe de la méthode du plan chaud avec deux échantillons non semi-infinis.....	49
Figure 2.5: Schéma de principe de la méthode du plan chaud avec échantillons semi-infinis.....	52
Figure 2.6: Schéma de principe de la méthode du plan chaud avec un échantillon semi-infini.....	52
Figure 2.7: Schéma de principe de la méthode du plan chaud asymétrique à un seul échantillon.....	54
Figure 2.8: Evolution de la température au centre de la sonde en fonction du temps : modèle théorique.....	56
Figure 2.9: Sensibilité réduite de la température au centre de la sonde à l'effusivité (E), la résistance de contact (Rc), la capacité thermique volumique de l'échantillon ( $\rho c$ ) et la sonde ( $\rho_{scs}$ ).....	58
Figure 2.10: Fuseaux granulaires des terres utilisables pour les BTC d'après la NOR 1 (P'KLA, 2002).....	59
Figure 2.11: Diagramme de texture des latérites de Mvog-Betsi (a) et de Nkolbisson (b).....	60
Figure 2.12: Granulat de pouzzolane noire.....	62
Figure 2.13: Localisation des sites de prélèvement de la latérite au Cameroun.....	63
Figure 2.14: Appareillage de caractérisation thermophysique utilisé.....	64

Figure 2.15: Photo du générateur de tension continue utilisé.....	64
Figure 2.16: Photo des presses hydrauliques utilisées.....	65
Figure 2.17: Photo de quelques échantillons de matériau à caractériser. ....	66
Figure 2.18: Photo des deux faces de l'élément chauffant de forme carrée sur lequel est connecté un thermocouple. ....	67
Figure 2.19: Une photo du montage expérimental plan chaud symétrique. ....	67
Figure 2.20: Températures expérimentales et théoriques obtenues avec la surface utile de la sonde. ....	68
Figure 2.21: Courbes expérimentales et les droites des régressions linéaires. ....	69
Figure 2.22: Courbes théorique et expérimentale et de résidus (x10) (a) +analyse de sensibilité réduite de la température à divers paramètres (b). ....	70
Figure 2.23: Etapes de caractérisation d'un échantillon donné.....	72
Figure 2.24: Effusivité thermique des briques de terre incorporant la pouzzolane. ....	73
Figure 2.25: Capacité thermique volumique des briques de terre incorporant de la pouzzolane. ....	73
Figure 2.26: Conductivité thermique des briques de terre incorporant de la pouzzolane.....	74
Figure 2.27: Différentes étapes de confection de certains échantillons.....	75
Figure 2.28: Compactage statique des éprouvettes. ....	76
Figure 2.29: Quelques échantillons après compactage.....	77
Figure 2.30: Mélange contenant 6% d'eau (à gauche) et celui contenant 15% d'eau (à droite). ....	77
Figure 2.31: Séchage des éprouvettes. ....	78
Figure 2.32: Quelques échantillons du matériau à caractériser, coupés en deux parties quasi-égales. ....	79
Figure 2.33: Thermogrammes expérimentaux et théoriques calculés avec les surfaces utiles des éléments chauffants des méthodes du plan chaud (a) et du ruban chaud (b). ....	80
Figure 2.34: courbe expérimentale et courbe simulée à partir du modèle plan chaud symétrique (à gauche) et sensibilités de $SR_c$ , $\rho.c$ et $E$ à la température (à droite). ....	81
Figure 2.35: courbe $T_{exp}=f(\ln(t))$ et droite de régression linéaire de $T_{exp}$ et de $\ln(t)$ .....	82
Figure 2.36: courbe expérimentale et courbe simulée par le modèle ruban chaud symétrique (à gauche) et sensibilités de $SR_c$ , $\rho.c$ et $\lambda$ à la température (à droite). ....	83
Figure 2.37: Echantillon de parpaing de sable (à gauche), de pouzzolane noire (au centre) et de pouzzolane rouge (à droite). ....	84
Figure 2.38: Capacité thermique volumique des parpaings de sable et de pouzzolane en fonction de la teneur en eau. ....	85
Figure 2.39: Conductivité thermique des parpaings de pouzzolane et de sable en fonction de la teneur en eau... 86	86
Figure 3.1: Mur multicouche avec les conditions aux limites et le maillage. ....	91
Figure 3.2: Capture de l'écran de l'ordinateur lors d'une simulation.....	94
Figure 3.3: Variations de température à l'intérieur de la paroi en béton (a) et en laine de roche (b). Comparaison des résultats obtenus avec Match et Simulink (Nielsen et al., 2002). ....	94
Figure 3.4: Maillage dans EnergyPlus. ....	96
Figure 3.5: Variations de la température de la surface intérieure du mur sud données par H-tools et EnergyPlus lorsque le local est continuellement climatisé. ....	97
Figure 3.6: Variations de la température de l'air interne et de la température de la surface intérieure du mur sud données par H-tools et EnergyPlus lorsque le local est climatisé de façon intermittente. ....	97
Figure 3.7: Dispositif expérimentale (a), variations de températures expérimentales obtenues par Samri (b) et variations de températures simulées obtenues à partir du modèle Simulink utilisé dans cette étude (c). ....	98
Figure 3.8: Représentation schématique du déphasage et du décrétement logarithmique. ....	99
Figure 3.9: Somme de la température de l'air et de la température équivalente aux rayonnements solaires sur les faces externes des murs verticaux le 15 Janvier dans les conditions climatiques des villes de Garoua (a) et de Douala (b). ....	100
Figure 3.10: Différentes configurations de murs étudiées.....	102
Figure 3.11: Déphasage des murs non isolés en fonction de leurs épaisseurs.....	103
Figure 3.12: Facteur d'amortissement de différentes parois non isolées en fonction de leurs épaisseurs. ....	104
Figure 3.13: Impact de la structure de mur sur le déphasage. ....	105
Figure 3.14: Moyenne annuelle du facteur d'amortissement des différentes structures de mur. ....	106

Figure 3.15: Pic du flux de chaleur à la surface interne des différentes structures.....	106
Figure 3.16: Quantité de chaleur transmise à l'intérieur du bâtiment à travers l'unité de surface du mur en fonction des différentes configurations de mur. ....	107
Figure 3.17: Pic de densité de flux à la face intérieure du mur durant les heures d'occupation pour différentes configurations de mur.....	108
Figure 3.18: Influence de l'épaisseur de l'isolant sur la performance des différentes configurations de mur. ...	109
Figure 3.19: Influence de l'orientation du mur sur les variations horaires de la densité de flux sur sa face interne (15 Mars).....	110
Figure 3.20: Influence de l'orientation du mur sur les variations horaires de la densité de flux sur sa face interne (15 Janvier).....	111
Figure 3.21: Influence de l'interception du rayonnement direct sur le pic de la densité du flux de chaleur sur la face interne des murs dans les villes de Douala (a) et Garoua (b). ....	112
Figure 3.22: Gain thermique journalier à travers l'unité de surface du mur orienté vers l'est/ouest dans les conditions climatiques de la ville de Douala. ....	113
Figure 3.23: Variation de la charge annuelle de refroidissement en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans les conditions climatiques de Douala (a) et Garoua (b). ....	114
Figure 3.24: Variations du gain thermique annuel en fonction de l'épaisseur de l'isolant pour plusieurs taux d'obstruction de rayonnement solaire.....	114
Figure 3.25: Variations de gain thermique annuel en fonction du pourcentage de radiation obstrué et pour plusieurs niveaux d'isolation du mur.....	115
Figure 3.26: Evolution des coûts de l'isolant, de l'électricité et de leur somme en fonction de l'épaisseur de la couche d'isolant.....	117
Figure 3.27: Variations du coût total en fonction de l'épaisseur de la couche de l'isolant à Douala (a) et Garoua (b). ....	118
Figure 3.28: Economies d'énergie relative à l'unité de surface du mur calculées dans les conditions climatiques de Douala (a) et Garoua (b). ....	120
Figure 3.29: Variations des coûts de l'isolant, d'énergie et de leur somme en fonction de l'épaisseur totale de l'isolant.....	123
Figure 3.30: Economies d'énergie susceptibles d'être réalisées à la fin de vie du bâtiment en fonction de l'épaisseur totale des couches d'isolant. ....	123
Figure A.1: Valeurs horaires journalières de la température, des rayonnements diffus et global sur un plan horizontal et du rayonnement direct (Garoua) .....	136
Figure A.2: Valeurs horaires journalières de la température, des rayonnements diffus et global sur un plan horizontal et du rayonnement direct (Douala).....	137
Figure B.1: Aspect des latérites des sites de Mvog-Betsi (à gauche) et de Nkolbisson (à droite) .....	138
Figure C.1: Schéma de principe de la modélisation 3D.....	141

---

## Liste des tableaux

Tableau 1.1: Rayonnement solaire dans quelques villes camerounaises (moyenne sur la période 1985-2005).....	5
Tableau 1.2: Moyennes journalières de l'humidité relative (%) dans deux localités du Cameroun, moyenne sur la période 1985-2005.....	7
Tableau 1.3: Masse volumique et conductivité thermique de quelques isolants (Meukam, 2004). ....	20
Tableau 1.4: Propriétés mécaniques de quelques matériaux à base de la terre crue.....	36
Tableau 1.5: Conductivité thermique de quelques matériaux à base de la terre.....	37
Tableau 1.6: Chaleurs spécifiques de quelques échantillons de BTC. ....	38
Tableau 1.7: Diffusivité et effusivité thermiques des matériaux à base de la terre. ....	40
Tableau 1.8: Influence de la stabilisation à la chaux sur la perméabilité à la vapeur des briques de terre (Liuzzi et al., 2013).....	43
Tableau 2.1: Synthèse de l'analyse granulométrique des latérites MV et NK. ....	60
Tableau 2.2: Analyse chimique de la pouzzolane de Djoungo (Leonelli et al., 2007). ....	63
Tableau 2.3: Composition du ciment Portland (Pepple et al., 2010).....	63
Tableau 2.4: Composition des échantillons.....	66
Tableau 2.5: Valeur de la surface utile de la sonde. ....	68
Tableau 2.6: Valeur de l'effusivité et de la conductivité thermique du PVC estimées à partir d'un échantillon emballé dans un sachet et du même échantillon non emballé. ....	70
Tableau 2.7: Propriétés thermophysiques de l'échantillon E3 à 1,2% de teneur en eau. ....	72
Tableau 2.8: composition de quelques échantillons des matériaux à caractériser. ....	76
Tableau 2.9: Quelques paramètres utiles de certains éléments chauffants utilisés.....	80
Tableau 2.10: Conductivité thermique et effusivité thermique des échantillons.....	83
Tableau 2.11: Composition des mortiers de pouzzolane noire, de pouzzolane rouge et de sable. ....	84
Tableau 3.1: Propriétés thermiques des matériaux utilisés. ....	102
Tableau 3.2: Paramètres économiques utilisés dans les calculs. ....	117
Tableau 3.3: Epaisseurs optimales de l'isolant et taux de décroissance en fonction du taux de radiations solaires bloquées dans la ville de Douala. ....	119
Tableau 3.4: Epaisseurs optimales de l'isolant et taux de décroissance en fonction du taux de radiations solaires bloquées dans la ville de Garoua. ....	119
Tableau 3.5: Coût de l'énergie économisée pour différent degré d'obstruction de radiations solaires. ....	121
Tableau 3.6: Période de retour sur investissement et charge annuelle de refroidissement obtenue à partir d'un mur isolé de façon optimale et pour différents niveaux d'obstruction de radiations solaires. ....	121
Tableau 3.7: Epaisseur optimum, économies d'énergie, période de retour sur investissement et charge annuelle de refroidissement. ....	124
Tableau B.1 : Analyse granulométrique de la latérite de Mvog-Betsi	138
Tableau B.2 : Analyse granulométrique de la latérite de Nkolbisson.....	138

---

## Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Définition (unités)</b>
$A_s$	énergie économisée ( $\$. m^{-2}$ )
$C$	chaleur spécifique ( $J. kg^{-1}. K^{-1}$ )
$C$	coût (\$)
$COP$	coefficient de performance du système de climatisation
$G$	taux d'inflation (%)
$h$	coefficient des échanges de chaleur par convection et par rayonnement de grande longueur d'onde entre une surface et le milieu environnant ( $W. m^{-2}. K^{-1}$ )
$H$	enthalpie ; moyenne mensuelle du rayonnement global journalier sur une surface horizontale ( $MJ. m^{-2}. jour^{-1}$ )
$H_o$	enthalpie de la matrice solide ; moyenne mensuelle du rayonnement global journalier extra-atmosphère sur une surface horizontale ( $MJ. m^{-2}. jour^{-1}$ )
$H_d$	moyenne mensuelle du rayonnement diffus journalier sur une surface horizontale ( $MJ. m^{-2}. jour^{-1}$ )
$HR$	humidité relative (%)
$I$	taux d'intérêt (%), ordre d'un nœud
$I$	rayonnement global sur une surface horizontale ( $W. m^{-2}$ )
$I_b$	rayonnement direct sur une surface horizontale ( $W. m^{-2}$ )
$I_d$	rayonnement diffus sur une surface horizontale ( $W. m^{-2}$ )
$I_0$	rayonnement horaire extra-atmosphère ( $W. m^{-2}$ )
$K$	conductivité liquide ( $s^{-1}$ )
$L$	épaisseur du mur (m)
$L_{op}$	épaisseur optimale de l'isolant (m)
$M$	masse (kg)
$N$	nombre de nœud
$n$	durée de vie d'un bâtiment (années), porosité (-)
$M$	nombre de couches d'un mur composite
$p_b$	Période de retour sur investissement (années)
$P$	pression (Pa)
$q_i$	densité de flux de chaleur à la surface intérieur d'un mur ( $W. m^{-2}$ )
$Q_c$	charge de annuelle de refroidissement ( $MJ. m^{-2}$ )
$sd$	degré d'obstruction du rayonnement solaire (%)
$T$	temps (s)
$T$	température ( $^{\circ}C$ )
$X$	coordonnées dans la direction normale au mur (m)

### Notations grecques

<b>Symbole</b>	<b>Définition (unités)</b>
$A$	absorptivité solaire de la face externe du mur (-)
$\gamma$	angle azimutale d'une surface ( $^{\circ}$ )
$\delta$	angle de déclinaison ( $^{\circ}$ )



---

$\lambda$	conductivité thermique ( $\text{W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
$\phi$	latitude ( $^{\circ}$ )
$\omega$	angle horaire ( $^{\circ}$ )
$\omega_s$	angle horaire au couché du solaire pour une surface horizontale ( $^{\circ}$ )
$\rho$	masse volumique ( $\text{kg. m}^{-3}$ )
$\rho_r$	réflectivité du sol (-)

### Indices

<b>Notations</b>	<b>Signification</b>
<i>El</i>	électricité
<i>Enr</i>	énergie
<i>I</i>	intérieur
<i>Ins</i>	isolant
<i>L</i>	liquide
<i>Max</i>	valeur maximale
<i>Min</i>	valeur minimale
<i>O</i>	extérieur
<i>S</i>	solide
<i>Sa</i>	solar-air
<i>Sat</i>	saturé
<i>t</i>	totale
<i>v</i>	vapeur

### Abréviations

<b>Notations</b>	<b>Signification</b>
BTC	Brique de Terre Compressée
BTSP	Brique de Terre Compressée et Stabilisée incorporant la Pouzzolane
MV	Mvog-Betsi
NK	Nkolbisson

## **Introduction générale**

Au regard de l'augmentation de la consommation mondiale d'énergie due entre autres à la croissance démographique, l'urbanisation, l'industrialisation, l'amélioration du standard de vie des populations, la détérioration de la qualité thermique des constructions récentes, qui a pour corollaire l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre, il est aujourd'hui impérieux de prendre des actions immédiates afin d'éviter les conséquences néfastes pour les générations futures. Ainsi les nations du monde ont réaffirmé leur engagement à encourager le développement durable au sommet de la Terre de Johannesburg (Afrique du Sud) en 2002. Soutenir le développement durable consiste entre autres à prévenir l'épuisement des ressources naturelles via l'utilisation des matériaux recyclables, à rationaliser la production et la consommation d'énergie. La poursuite de ces objectifs dans le secteur du bâtiment, responsable de 40% de la consommation mondiale d'énergie et de 30% des émissions annuelles mondiales de gaz à effet de serre (Huovila et al., 2007), revient à promouvoir les matériaux de construction à faible impact environnemental, à soutenir les techniques passives de réduction de la consommation d'énergie des bâtiments, etc.

L'évaluation de l'impact environnemental d'un matériau ne prend pas seulement en compte les gains qu'il procure pendant son utilisation mais aussi la somme de toutes les énergies nécessaires à sa production, à son utilisation et sa démolition : c'est ce qu'on appelle énergie grise. Plusieurs auteurs ont estimé l'énergie grise de divers matériaux de construction incluant les matériaux à base de la terre crue. Leurs résultats ont montré que ces matériaux ont un impact environnemental relativement faible et devraient par conséquent être valorisés. Au Cameroun, le gouvernement a opté pour la promotion des matériaux locaux à travers la création de la MIPROMALO (Mission de Promotion des Matériaux locaux) en 1991 et par la suite, la signature de la circulaire No. 002/CAB/PM du 12 Mars 2007 du premier ministre exigeant l'utilisation des matériaux de proximité dans les bâtiments publics à hauteur de 20%. La valorisation de ces matériaux de proximité passe entre autres par la détermination de leurs propriétés thermophysiques, hygrothermiques et/ou mécaniques.

La mise en valeur des techniques passives de réduction de la consommation d'énergie dans le bâtiment constitue également un soutien au développement durable dans le secteur du bâtiment. Ces techniques sont un ensemble d'éléments naturels ou architecturaux tels que l'orientation, l'ombrage, l'inertie thermique et l'isolation du bâtiment qui contribuent à réduire la quantité d'énergie nécessaire au refroidissement et/ou au chauffage des bâtiments et à l'amélioration du confort thermique pour le cas des bâtiments non climatisés. Ombrager les murs de bâtiments entraîne une réduction de l'énergie de refroidissement mais augmente celle de chauffage. Néanmoins, dans la plupart des localités proches de l'équateur où les niveaux de température et de rayonnement solaire sont suffisamment élevés pour que, même pendant les périodes froides de l'année, la maison n'exige aucun chauffage actif, ombrager les maisons est essentiellement bénéfique. Ombrager et/ou isoler les murs extérieurs dans ces localités devrait être soutenu. Les auteurs qui ont proposé des méthodologies permettant de déterminer les épaisseurs optimales d'isolant à insérer dans les murs extérieurs n'ont pas pris en compte les

effets des ombres portées des objets environnants (arbustes, maisons, etc.) sur les murs considérés.

Au Cameroun comme dans plusieurs autres pays subsahariens, les murs extérieurs de bon nombre de maisons modernes sont faits en béton, matériau présentant une résistance thermique relativement faible. Une réduction de la consommation d'énergie dans ces bâtiments impliquerait des travaux de rénovation thermique. La rénovation thermique d'un bâtiment peut consister à insérer une ou plusieurs couches d'isolant dans les murs extérieurs. Les briques de terre contenant les gousses de mil, la sciure de bois, la pouzzolane, etc., qui présentent une conductivité thermique relativement faible (0,29 – 0,5 W/m.K) comme l'ont montré certains auteurs, peuvent être utilisées en plus des couches d'isolant conventionnel pour ladite rénovation. Ce qui réduirait l'épaisseur de l'isolant (plus onéreux) à utiliser pour une résistance thermique donnée. Les travaux effectués sur la localisation et la distribution optimale (du point de vue thermique) des différentes couches d'un mur n'ont pas traité le cas où le mur comporte plusieurs couches de maçonnerie aux propriétés thermiques considérablement différentes.

Ce travail a pour but d'apporter une contribution à la conception de bâtiments à faible impact environnemental et consommation d'énergie dans un climat tropical humide. Pour ce faire, des investigations sont faites sur : (1) l'influence du taux et de la fraction granulaire de la pouzzolane incorporée dans les blocs de latérite pressée et stabilisée au ciment sur leurs propriétés thermophysiques, (2) l'agencement optimal des différentes couches des murs extérieurs de bâtiments et (3) l'impact des ombres portées des objets environnants du bâtiment sur sa performance thermique.

L'analyse granulométrique de la latérite de Mvog-Betsi (une localité de la ville de Yaoundé au Cameroun) est faite afin de s'assurer qu'elle est adaptée à la confection des briques de terre. Plusieurs blocs de latérite incorporant divers taux et fractions granulaires de pouzzolane sont obtenus par compactage à l'aide des presses hydrauliques. Les parpaings de pouzzolane et de sable sont obtenus par moulage des mortiers de pouzzolane et de sable, respectivement. Les méthodes du plan chaud asymétrique, du ruban et du plan chaud symétriques sont utilisées pour mesurer les propriétés thermophysiques de ces blocs.

La modélisation thermique d'un simple local (comportant une seule zone) sous Simulink (environnement de simulation des systèmes dynamiques intégré dans Matlab) est réalisée. Le modèle isotrope de Jordan et le modèle anisotrope de Perez sont utilisés pour estimer la densité de flux radiatif de courte longueur d'onde reçu par les murs verticaux à partir des densités de flux de rayonnements diffus, direct et global sur une surface horizontale. L'échange d'énergie radiante dans le domaine des grandes longueurs d'ondes, entre une surface et son environnement, est modélisé de façon simplifiée en utilisant un coefficient de transfert radiatif constant. Les paramètres climatiques externes utilisés dans cette thèse sont ceux des villes de Garoua (latitude : 9°19', longitude : 13°22' et méridien standard : 15°E) et de Douala (latitude : 4°01', longitude : 9°44' et méridien standard : 15°E) au Cameroun. Pour un jour donné, les températures horaires sont estimées à partir du maximum et du minimum de température dudit jour via le modèle de cosinus. Les valeurs horaires des rayonnements diffus et global sur une surface horizontale sont obtenues des données mensuelles par l'intermédiaire des corrélations

de Collares-Pereira and Rabl (1979). Le 15<sup>e</sup> jour du mois est pris comme jour représentatif. Des simulations du comportement thermique de ce local permettent d'étudier les performances thermiques de son enveloppe.

Les travaux de cette thèse se scindent en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, une description sommaire du climat camerounais et une étude bibliographique sur l'état des lieux et le développement de l'habitat dans le contexte camerounais sont effectuées. Dans ce même chapitre, une synthèse bibliographique sur les méthodes passives de réduction de la consommation d'énergie des bâtiments est présentée. Quelques modèles de transfert couplé de chaleur et de masse dans les milieux poreux ainsi que les propriétés mécaniques, thermophysiques et hygroscopiques des matériaux de construction à base de la terre trouvées dans la littérature y sont également présentés.

Le chapitre 2 examine les différentes méthodes de mesure, en régime permanent et en régime transitoire, des propriétés thermophysiques des matériaux dans l'optique de choisir les méthodes les mieux adaptées à notre étude. La description du matériel et des méthodes utilisés lors de la confection des échantillons des matériaux à caractériser est aussi présentée. Les capacités thermiques volumiques, les effusivités thermiques et les conductivités thermiques des parpaings de sable et de pouzzolane et des blocs de latérites contenant différents taux et fractions granulaires de pouzzolane y sont finalement examinées.

Dans le chapitre 3 est présentée une description des composantes de H-Tools (maillage et schéma de discrétisation utilisés) et le modèle d'estimation de la densité de flux du rayonnement solaire total (diffus et direct) sur une paroi inclinée à partir des rayonnements diffus, direct et global sur un plan horizontal. Une brève description d'EnergyPlus, logiciel (validé) de simulation thermique dynamique, est ensuite faite. Une modélisation sous Simulink, à l'aide des composantes de H-Tools, d'un local dont le mur (ou une couche du mur) extérieur est en blocs de latérite caractérisé au chapitre 2 et/ou en matériau conventionnel (béton, parpaing) est aussi réalisée dans ce chapitre. La validation du modèle par rapport aux résultats d'EnergyPlus est également faite. Les impacts des ombres portées des objets environnants du mur extérieur et de l'agencement de ses différentes couches sur la performance thermique du local dans les conditions climatiques des villes de Garoua et Douala au Cameroun sont également examinés dans ce chapitre.

## Chapitre 1 Revue de la littérature

### Introduction

Ce premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les différents thèmes en rapport avec le sujet de cette thèse. Etant donné que la température et les autres conditions atmosphériques propres à une région affectent le mode constructif dans ladite localité, une description sommaire du climat camerounais est d'abord présentée. Ensuite, le bilan de la situation actuelle et de l'évolution du mode de logement dans le contexte camerounais est fait. La revue de littérature sur les différentes techniques permettant de réduire de manière passive la consommation d'énergie dans les bâtiments est également présentée. Enfin, une description du transfert couplé de chaleur et de masse dans les matériaux poreux ; ainsi que les résultats des caractérisations mécanique, thermophysique et hygroscopique des matériaux de l'enveloppe de bâtiment à base de la terre trouvés dans la littérature sont présentés.

### 1. Climat et conception architecturale des maisons en zone tropicale : cas du Cameroun

#### 1.1. Le climat camerounais

Le Cameroun, pays d'Afrique centrale avec une superficie d'environ 475442 km<sup>2</sup>, s'étire en longueur entre le 2° et le 13° degré de latitude nord et s'étale en largeur entre le 9° et le 16° degré de longitude est. Il présente diverses nuances climatiques qui, avec son relief varié, résume les grands ensembles biogéographiques du continent africain comme on peut le constater sur la Figure 1.1.



Figure 1.1: Cameroun et climat (Demanou et al., 1993).

Ce climat, très diversifié, peut néanmoins être regroupé en deux grandes zones :

- Le climat équatorial qui règne au-dessous du 6<sup>e</sup> parallèle est caractérisé par une longue saison de pluie et une courte saison sèche. Il devient de plus en plus humide au fur et à mesure qu'on se rapproche du littoral ;
- Au-dessus du 6<sup>e</sup> parallèle règne un climat tropical avec des températures élevées et des pluies peu abondantes, de type soit sahélien (de décembre à mars), soit soudanien (le reste de l'année).

Etant donné que le climat fait partie des principaux facteurs qui influencent la façon de bâtir les maisons, à la grande diversité climatique du Cameroun est associée une hétérogénéité de mode constructif.

## 1.2. Paramètres climatiques influençant le mode constructif

### 1.2.1. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est issu des réactions thermonucléaires de fusion entre les noyaux d'hydrogène au sein du soleil. Sa masse et sa composition chimique lui permettront de rayonner encore quelques milliards d'années. Seule une infime partie de la puissance énergétique émise par le soleil arrive à la limite externe de l'atmosphère terrestre. La constante solaire  $I_0$  correspond à la puissance du rayonnement solaire, mesurée sur le bord extérieur de l'atmosphère terrestre.

Au cours de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire peut subir le phénomène d'absorption ou de diffusion et finalement, les radiations solaires de courte longueur d'onde qui arrivent au sol se composent d'une fraction diffuse et d'une fraction directe, le tout formant le rayonnement global. Le rayonnement solaire arrive au sol de façon irrégulière. La zone intertropicale est celle qui reçoit plus de rayonnement. Le Tableau 1.1 présente les moyennes mensuelles des rayonnements global et diffus reçus sur une surface horizontale dans les villes de Garoua et Douala obtenues à partir des données satellitaires<sup>1</sup>.

Tableau 1.1: Rayonnement solaire dans quelques villes camerounaises (moyenne sur la période 1985-2005).

Mois	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Garoua												
D(Wh/m <sup>2</sup> )	1522	2063	2332	2440	2386	2437	2492	2575	2600	2011	1627	1517
H(Wh/m <sup>2</sup> )	6141	6280	6431	6293	5266	5055	4647	4489	4962	5465	5845	5614
Douala												
D(Wh/m <sup>2</sup> )	2304	2535	2813	2743	2505	2534	2411	2390	2561	2522	2382	2127
H(Wh/m <sup>2</sup> )	5722	5871	5086	4826	4199	3931	3362	3079	3463	3661	4857	5337

<sup>1</sup> HelioClim1, Daily irradiance averaged over the Month, over the horizontal plane.<[http://www.soda-is.com/eng/services/service\\_invoke/gui.php?xmlid=descript!4hc1month.xml&Submit!4HC1month](http://www.soda-is.com/eng/services/service_invoke/gui.php?xmlid=descript!4hc1month.xml&Submit!4HC1month)>.

Il apparait de ce tableau que Garoua est plus ensoleillé que Douala. Par ailleurs, dans les deux localités, le rayonnement solaire global mensuel est plus important en février.

### 1.2.2. La température de l'air

L'air atmosphérique est chauffé de préférence par le rayonnement solaire. Ceci explique pourquoi il fait plus chaud le jour que la nuit ou entre les tropiques qu'aux hautes latitudes. La température de l'air décroît avec l'altitude (dans la troposphère, couche atmosphérique en contact avec la terre). Par conséquent, les zones montagneuses connaissent des températures moins élevées que les plaines.

Figure 1.2 présente les moyennes, sur une longue période (1985-2005), des maximums et des minimums de températures journalières dans les villes de Douala et Garoua, calculées à partir des données obtenues auprès de la direction nationale de météorologie du Cameroun.

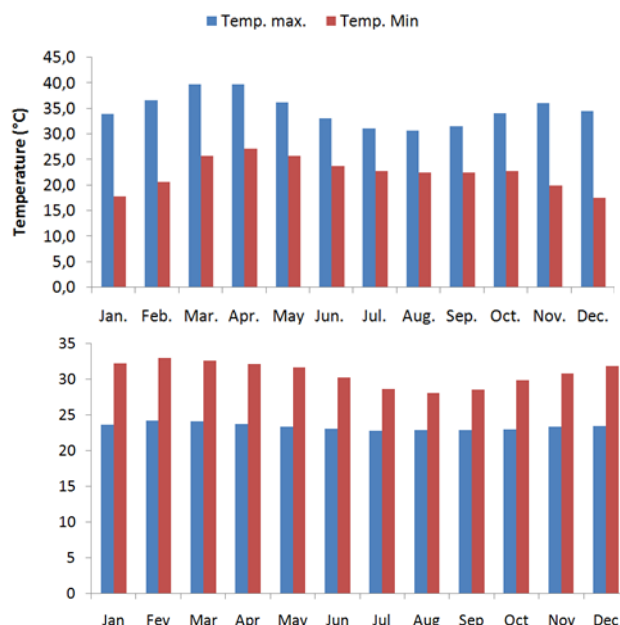


Figure 1.2: Maximums et minimums de températures journalières des villes de Garoua (a) et de Douala (b) (moyenne sur la période 1985-2005).

### 1.2.3. L'humidité relative

L'humidité relative est le rapport de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère à la teneur en vapeur d'eau de l'air saturé à température égale. Un climat est dit humide lorsque la moyenne annuelle du taux d'humidité est supérieure à 55%. Dans le cas contraire, on parle de climat aride ou semi-aride. Les données satellitaires de la NASA<sup>2</sup> ont permis de calculer les moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air dans deux localités du Cameroun et les résultats sont consignés dans le Tableau 1.2. Il apparait que la localité de Douala est plus humide que celle

<sup>2</sup> Solar Energy Services for Professionals <MERRA - [www.soda-pro.com](http://www.soda-pro.com)>

de Garoua. Par ailleurs, le mois d'août, dans les deux localités, fait partie des mois les plus humides.

Tableau 1.2: Moyennes journalières de l'humidité relative (%) dans deux localités du Cameroun, moyenne sur la période 1985-2005.

	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Garoua	18	16	23	48	53	56	61	66	65	56	33	18
Douala	75	75	76	77	78	78	78	78	78	78	77	75

### 1.2.4. Les précipitations

La répartition des pluies du Sud au Nord du Cameroun varie des climats équatoriaux très humides aux climats sahéliens très secs. A partir des données des tableaux climatologiques mensuels de stations synoptiques réparties sur l'ensemble du territoire camerounais et correspondant aux grands ensembles climatiques, Tsafack et al. (2003) ont établi la répartition diurne ou nocturne des pluies sur l'ensemble du territoire camerounais (Figure 1.3). Les grands ensembles climatiques pris en compte dans leurs travaux sont :

- climat soudano-sahélien : Garoua et Maroua ;
- climat équatorial : Nanga-Eboko ; Batouri et Bétaré-Oya ;
- climat tropical humide : Bamenda, Dschang, Nkongsamba et Banyo ;
- climat tropical humide littoral : Tiko, Ekona, Yabassi, Mamfe et Douala.

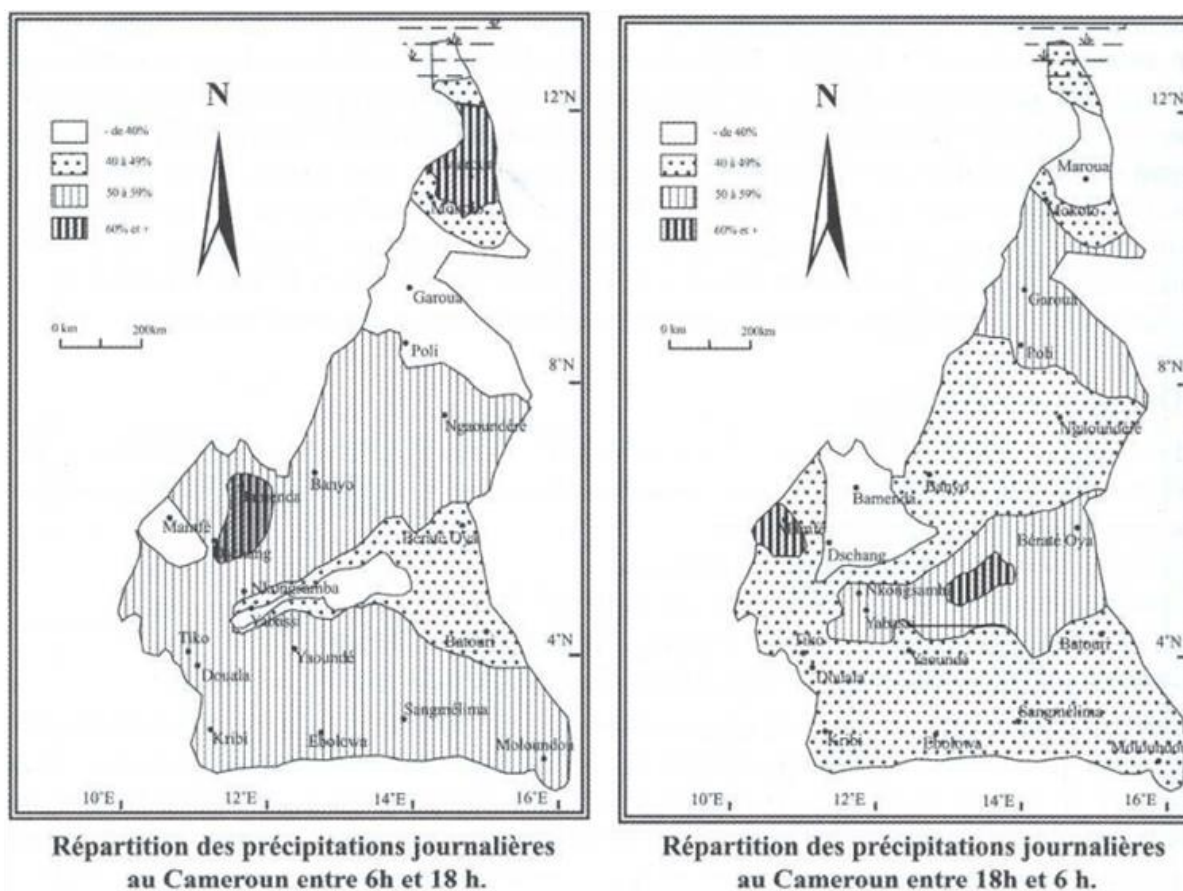


Figure 1.3: Répartition des précipitations journalières au Cameroun (Tsafack, 2013).



### 1.3. Génération des valeurs horaires des paramètres climatiques

Les valeurs horaires des paramètres climatiques sont d'une importance capitale dans l'application des modèles physiques et biologiques dynamiques (Bekele et al., 2007). Cependant, au Cameroun comme dans plusieurs autres pays en voie de développement, ces données horaires sont souvent inexistantes. Plusieurs modèles permettent néanmoins de les estimer à partir des données journalières et/ou annuelles. Ceux utilisés dans cette thèse sont présentés en annexe A.

### 1.4. Typologie des constructions au Cameroun : état des lieux

À la grande diversité climatique du Cameroun illustrée à la Figure 1.1, est associée une importante hétérogénéité architecturale. On distingue en général l'habitat traditionnel prépondérant dans les zones rurales et les périphéries des grandes métropoles, l'habitat urbain et les bâtiments publics.

#### 1.4.1. Construction traditionnelle au Cameroun

L'architecture traditionnelle camerounaise reflète, dans sa diversité, l'influence des conditions naturelles et les matériaux de construction, partagés selon la richesse de chaque région géographique et climatique. Les maisons traditionnelles sont faites artisanalement à base des matériaux existants.

##### 1.4.1.1. L'habitat des régions côtières

Il règne dans les zones côtières un climat équatorial de type mousson. Les températures varient entre 19°C et 32°C avec une moyenne journalière de 25°C. L'habitat traditionnel dans ces régions est dominé par les constructions ultralégères en bois (Figure 1.4).



Figure 1.4: Maison traditionnelle en « carabot » dans les régions côtières.

Les planches formant les parois sont souvent disposées sous forme d'escalier pour faciliter non seulement l'écoulement des eaux mais aussi la ventilation. Ces parois sont souvent renforcées au niveau du sol, sur un mètre environ, soit par un mur en parpaings, soit par les tôles de récupérations ; ce qui protège les planches contre les eaux de ruissellement ou les gouttes d'eau de rebonds pendant les pluies (Kemajou et Mba, 2011). Le toit est généralement en tôle avec un faux plafond en contreplaqué. Le sol, lorsqu'il n'est pas en terre pleine, est fait de béton recouvert d'un enduit de ciment ou de carreaux.

#### **1.4.1.2. L'habitat des régions forestières**

Dans cette zone qui inclut les chefs-lieux de régions tels que Yaoundé, Bertoua et Ebolowa, règne un climat équatorial caractérisé par les températures journalières variant de 15°C à 31°C avec une moyenne autour de 23°C. Caractérisée par une forêt dense, cette région connaît en moyenne 125 jours de pluie par an avec une colonne d'eau de 160 mm. Les murs des maisons traditionnelles dans cette zone sont constitués d'une ossature de bambous cloués sur des piquets où les interstices sont remplis par de la terre battue. Ces murs sont quelques fois enduit par du mortier de ciment. La couverture est soit en natte, soit en tôle d'aluminium. Le faux plafond lorsqu'il existe, est en contreplaqué. Le sol est soit en terre pleine, soit en béton recouvert d'une couche d'enduit de ciment ou des carreaux.



Figure 1.5: Maison en terre avec ossature en bois des régions forestières du Cameroun.

#### **1.4.1.3. L'habitat des régions montagneuses**

Dans les hautes terres de l'ouest du pays incluant les chefs-lieux de régions tels que Bafoussam, Bamenda, etc., règne un climat équatorial caractérisé par des températures qui varient entre 14 °C et 30 °C avec une moyenne autour de 21 °C, une pluviométrie de 125 jours par an pour une hauteur moyenne de 250 mm.

Les murs des maisons traditionnelles dans cette zone du pays sont faits principalement des briques de terre crue. Celles-ci sont obtenues par moulage de la terre battue qui est ensuite séchée au soleil. La couverture était autrefois en chaume ou en natte (Figure 1.6).

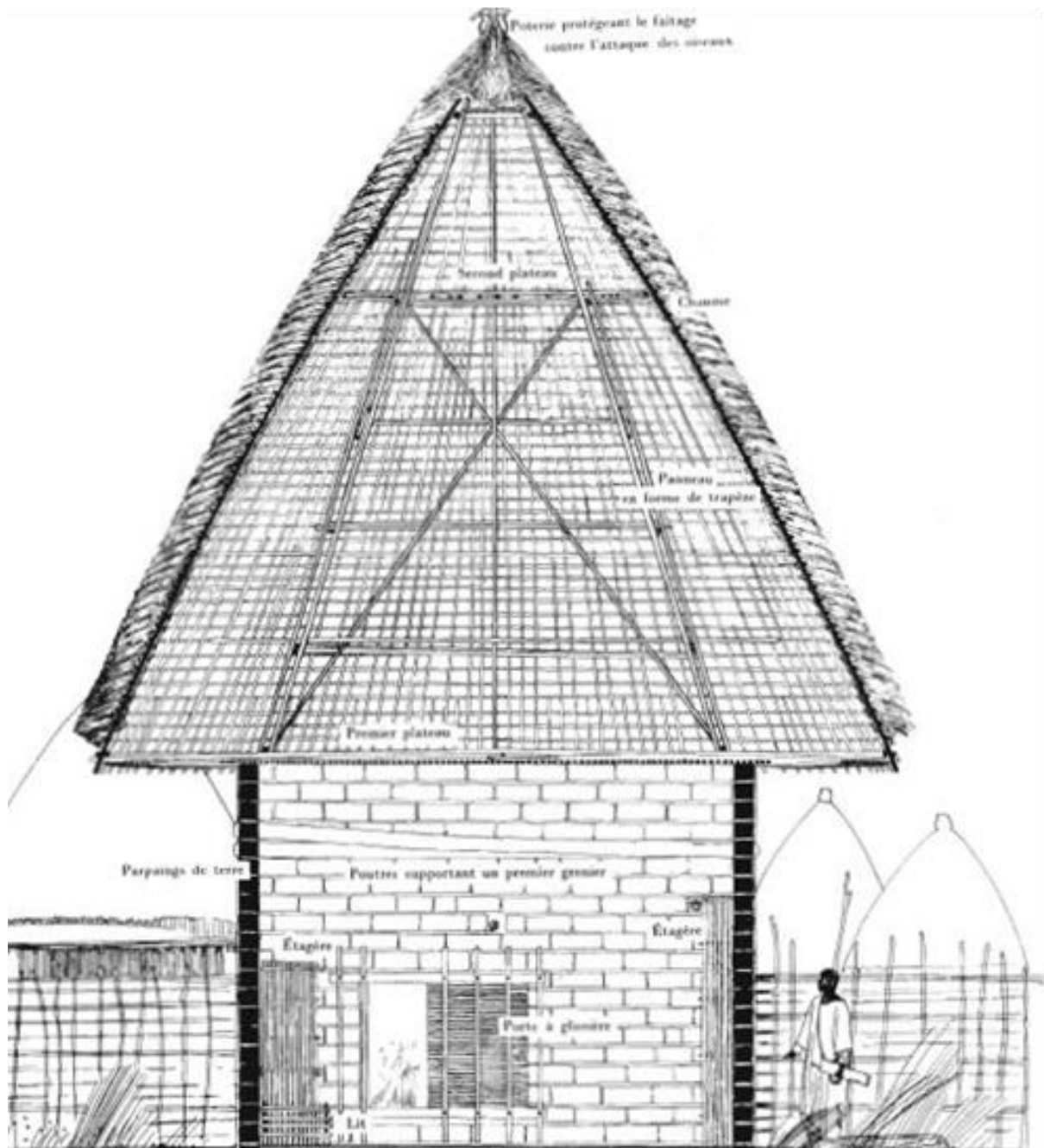


Figure 1.6: Maison traditionnelle des régions montagneuses.

Le chaume ou la paille a été progressivement remplacé par les tôles d'aluminium. Pour éviter la montée des eaux par capillarité au niveau de la fondation, celle-ci est généralement faite en pierre comme le montre la Figure 1.7. Le bois est utilisé dans la charpente.



Figure 1.7: Briques de terre crue en phase de séchage (a) et maison en brique de terre crue ou adobe (b).

#### 1.4.1.4. L'habitat dans la partie septentrionale du pays

Le climat qui règne dans cette zone est de type tropical avec des écarts de températures considérables. Les températures peuvent varier de 17,8°C à 34,0°C en janvier dans la ville de Garoua par exemple. Cette région présente une faible pluviométrie avec 75 jours de pluie en moyenne par an pour une hauteur moyenne d'eau n'excédant pas 800 mm. Les cases sont de forme circulaire avec les parois externes faites en adobe et le toit en chaume.



Figure 1.8: Photo de quelques maisons traditionnelles dans la zone septentrionale du Cameroun.

#### 1.4.2. L'habitat urbain au Cameroun

On distingue dans les villes camerounaises deux principaux modes de logement : l'habitat spontané et l'habitat moderne.



#### 1.4.2.1. L'habitat spontané

Les centres urbains camerounais, à l'instar des autres villes africaines, ont connu ces dernières décennies une expansion démographique (accentuée par l'exode rural) en inadéquation avec les capacités et les politiques d'aménagement de l'Etat. Il en résulte une expansion de l'habitat spontané suivie d'une augmentation des bidonvilles. Ces habitations spontanées sont principalement implantées dans des zones marécageuses, sur les flancs de collines, dans des périmètres interdits ou autres sites non appropriés. Ils sont construits surtout à base des matériaux provenant de tout bord.

#### 1.4.2.2. L'habitat moderne

On retrouve dans ce type d'habitat les immeubles et les maisons individuelles. Les matériaux de construction communément utilisés dans l'habitat moderne sont le parpaing, le béton ou la terre. La couverture est souvent en tôle d'aluminium ou en tuile, les ouvertures en bois traité, en verre ou en acier et le planché en béton nu ou carrelé. La charpente est faite en bois dur. Le faux plafond dans l'habitat moderne est principalement en lambris de bois bien traité ou en plâtre. L'orientation du cadre bâti se fait en fonction de la géométrie du terrain et de son ouverture sur la route au détriment de l'orientation qui protège mieux le bâtiment contre les effets du soleil et valorise les effets du vent. De plus, la protection solaire est médiocre ; ce qui entraîne un recours à la climatisation active, l'une des principales sources de consommation d'énergie et d'émission des gaz à effet de serre en Afrique subsaharienne.



Figure 1.9: Maison moderne au Cameroun.

### 1.5. Conception architecturale bioclimatique

La conception bioclimatique des bâtiments prend en compte un certain nombre de mesures (GRET, 2009) :

- le choix du terrain ;
- la volumétrie et la forme du bâtiment ;
- l'implantation tenant compte de l'ensoleillement, des ombres portées et des vents dominants (force et direction) ;

- l'orientation permettant de profiter des apports solaires gratuits ;
- la disposition judicieuse des fonctions (espaces servants/servis) ;
- le dimensionnement et l'emplacement judicieux des ouvertures ;
- l'isolation de l'enveloppe pour une inertie thermique adaptée ;
- une préférence pour les matériaux locaux ;
- l'utilisation de la végétation comme rideau naturel (espèces locales) ;
- les protections solaires fixes et mobiles.

### **1.5.1. Le site de construction**

Le choix du site de construction d'un bâtiment est la première étape de la conception architecturale bioclimatique. Un mauvais choix du lieu de construction peut rendre difficile l'application de certaines techniques de réduction passive de l'énergie de refroidissement et/ou de chauffage ou d'amélioration du confort thermique à l'intérieur. En zone tropicale chaude à laquelle appartient le Cameroun, les meilleurs sites de construction sont ceux qui protègent le bâtiment d'une importante quantité de rayonnement soleil toute l'année durant tout en assurant un éclairage naturel adéquat. En effet, dans bon nombre de localités situées autour de l'équateur, les températures sont suffisamment élevées au point que même en l'absence du soleil, les maisons n'exigent aucun chauffage actif.

### **1.5.2. La forme des bâtiments**

L'aire de l'enveloppe d'un bâtiment de forme carrée est moins importante que celle d'un bâtiment de même volume mais de forme allongée. Par conséquent, dans les mêmes conditions climatiques, un local de forme allongée nécessite une énergie de climatisation plus importante que celle d'un local de forme carrée. En termes d'efficacité de la ventilation et d'éclairage naturelle, les bâtiments allongés et étroits sont plus performants que les bâtiments cubiques. La forme optimale d'un bâtiment dépend donc du mode d'utilisation.

### **1.5.3. L'orientation des bâtiments**

Dans les régions proches de l'équateur où la température de l'air et le rayonnement solaire sont suffisamment élevés au point que les bâtiments n'exigent aucun chauffage actif, la meilleure orientation du bâtiment est celle qui minimise les apports solaires toute l'année durant. Dans ces localités, les faces est et ouest des maisons reçoivent plus d'énergie solaire que les faces nord et sud. Le bâtiment doit donc être orienté de sorte à minimiser l'aire des faces est et ouest (difficiles à protéger contre les rayons solaires directs) au détriment de celle des murs sud et nord où l'utilisation des porte-à-faux est plus efficace (pour la réduction des charges de refroidissement).

Les ouvertures sont nécessaires pour l'éclairage naturel et pour la ventilation. Cependant, elles sont une source de chaleur importante pour la zone ; il faut donc correctement les dimensionner et les positionner sur le bâtiment pour limiter ces apports. Ainsi, dans la zone intertropicale, les portes et les fenêtres sur les faces est/ouest des bâtiments sont à éviter. Les dimensions de ces

ouvertures devraient être plus importantes sur la face nord que sur la face sud dans l'hémisphère nord et vice-versa dans l'hémisphère sud.

Dans les maisons d'habitation, la disposition des pièces est d'une importance capitale dans la réduction de la consommation d'énergie ou l'optimisation du niveau de confort thermique. Ainsi, les chambres à coucher où la température doit être relativement faible (et surtout durant la nuit) devraient se situer sur la face est qui reçoit peu ou presque pas de rayonnement direct dans l'après-midi. Les douches, les magasins, etc., bref les pièces qui ne sont pas régulièrement occupées, doivent être situées sur les façades est et ouest.

Il est à noter que l'orientation optimale du point de vue thermique n'est pas nécessairement la meilleure quand il s'agit d'optimiser la ventilation naturelle.

#### **1.5.4. L'isolation des parois de l'enveloppe de bâtiment**

Dans les maisons climatisées, un certain niveau d'isolation des parois est recommandé afin de réduire la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment. Plusieurs techniques permettent d'améliorer le degré d'isolation d'un mur.

##### **1.5.4.1. Isolation répartie**

Le matériau isolant peut être réparti ; il sert alors à la fois d'enveloppe de bâtiment et d'isolation. Certains auteurs ont amélioré le niveau d'isolation des parpaings et des briques de terre en y incorporant les agrégats de plusieurs isolants tels que la sciure de bois, la pouzzolane, les fibres de divers types, etc.

##### **1.5.4.2. Impact de la couleur de l'enveloppe extérieure**

Le niveau d'isolation d'une paroi peut être amélioré par un choix judicieux de la couleur de sa surface extérieure. En effet, une partie de l'énergie solaire atteignant la face extérieure d'une enveloppe de bâtiment est absorbée par celle-ci. Cette quantité d'énergie retenue dépend du coefficient d'absorption de la paroi. Elle est d'autant plus élevée que le coefficient d'absorption est important. Ce coefficient tend vers 0 pour les surfaces de couleur blanche et 1 pour les surfaces de couleur noire. Les couleurs des murs et de la toiture d'un bâtiment ont donc une influence significative sur sa consommation énergétique et/ou le niveau de confort thermique intérieur. En zone intertropicale où les niveaux de température et de rayonnement sont assez élevés pour qu'aucun chauffage actif ne soit nécessaire quel qu'en soit la saison, les couleurs claires sont préférables.

##### **1.5.4.3. Isolation réfléchissante**

Les échanges d'énergie entre un matériau et le milieu environnant se font par convection et par rayonnements de courtes et de grandes longueurs d'ondes (rayonnement infrarouge). L'habilité d'une surface à émettre de l'énergie dans le domaine de l'infrarouge est caractérisée par son émissivité thermique. Les matériaux de faibles émissivités comme les feuilles d'aluminium peuvent être insérés sous les combles ou dans une couche d'air créée à l'intérieur d'un mur de

bâtiment (voir Figure 1.10) pour réduire le flux de chaleur que la zone échange avec l'extérieur ; cela constitue une isolation réfléchissante.

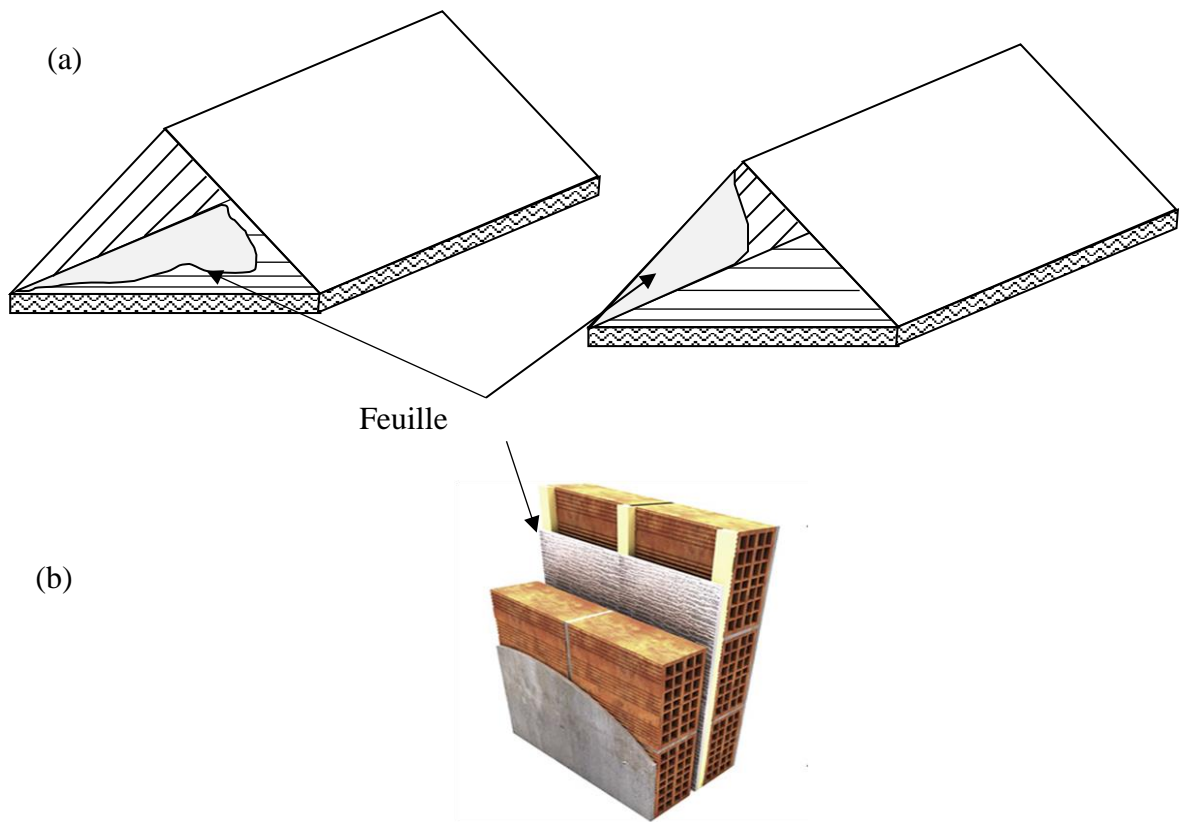


Figure 1.10: Principe d'isolation réfléchissante dans les combles (a) et dans un mur (b).

Une quantité considérable de chaleur est transférée par rayonnement de grandes longueurs d'ondes entre les faces supérieure et inférieure d'un grenier ou entre les faces latérales des cavités réalisées dans un mur composite. La norme ISO 6946 définit un moyen théorique d'estimation de la résistance thermique  $R$  d'une cavité non ventilée par l'équation [1.1] (Baldinelli, 2010).

$$R = \frac{1}{h_a + h_r} \quad [1.1]$$

où  $h_a$  est le coefficient de transfert par conduction/convection et  $h_r$  le coefficient d'échange radiatif.

Dans les murs comportant une couche d'air, l'épaisseur de la cavité est généralement très faible devant ses dimensions transversales. Le facteur de forme entre les faces verticales de la cavité est supposé égal à l'unité. Ainsi, le coefficient d'échange radiatif est donné par la relation :



$$h_r = \frac{4\sigma T_m^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad [1.2]$$

où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann,  $T_m$  est la valeur moyenne des températures des surfaces participant aux échanges radiatifs;  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  sont les émissivités hémisphériques des faces (perpendiculaires à la direction principale de transfert de chaleur) qui bordent la cavité. Les émissivités des matériaux de construction tels que les briques et les blocs de béton se situent normalement entre 0,75 et 0,95 alors que celles des matériaux réfléchissants tels que les feuilles d'aluminium sont en deçà de 0,10 (Baldinelli, 2010). A 25°C, installer une feuille d'aluminium ( $\varepsilon = 0.05$ ) sur une face d'une cavité réalisée dans un mur en brique ( $\varepsilon = 0.90$ ) entraîne une réduction de son coefficient d'échange radiatif d'environ 94% (de 4.92 à 0.3 W/m<sup>2</sup>K).

Le principal inconvénient de l'isolation réfléchissante est l'augmentation de la valeur de l'émissivité des surfaces brillantes due à un dépôt de poussière au fil du temps. Ces surfaces peuvent néanmoins être nettoyées lorsqu'elles sont accessibles.

#### 1.5.4.4. Addition d'une ou de plusieurs couches isolantes

Une couche de matériau isolant peut être insérée dans un mur, au niveau de la toiture et/ou au niveau du faux plafond.

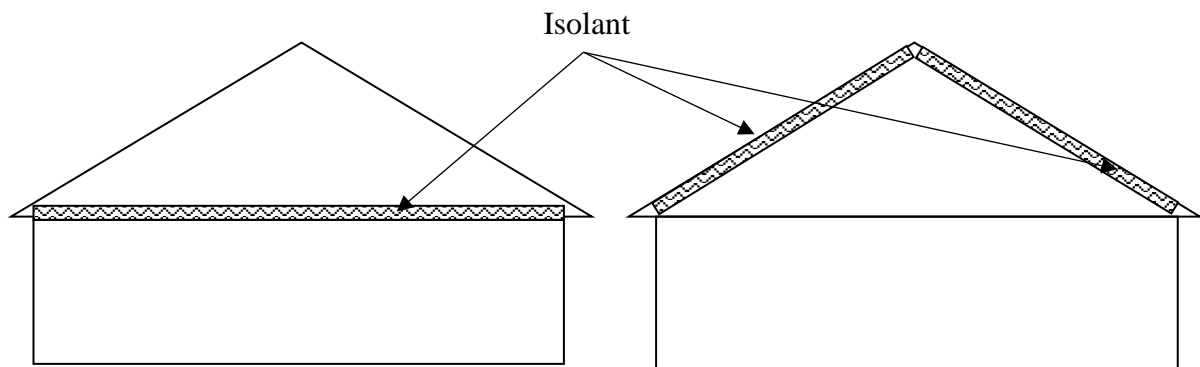


Figure 1.11: Exemple d'isolation des combles.

En l'absence du système de climatisation ou lorsqu'il opère de façon intermittente, l'efficacité de l'isolant dans les murs et dans le toit d'une maison dépend du climat. Ainsi, dans un climat chaud et humide et avec une ventilation adéquate, les températures interne et externe de l'air sont approximativement égales. L'isolation a donc pour fonction de réduire le transfert de chaleur vers l'intérieur due à la surchauffe de la face extérieure des parois par le soleil. Le toit recevant de loin plus d'énergie solaire que les murs et ne pouvant pas être ombragé efficacement doit être isolé prioritairement. Dans les murs, la localisation et la distribution du matériau isolant ont une influence sur la performance thermique du mur multicouche résultant.

#### 1.5.4.4.1. Impact de la distribution de l'isolant dans un mur.

Seth et al. (1981), cité par Sami et al. (2011), ont étudié la distribution optimale des couches d'isolant et de béton dans deux murs multicouches : Isolant/Air/Béton/Air/Isolant (IABAI) et Béton/Air/Isolant/Air/Béton (BAIAB). Les calculs ont été faits pour un jour d'été dans les conditions climatiques du Koweït avec des épaisseurs des couches d'isolant et de béton données. Leurs résultats ont montré que, du point de vue de la réduction des charges de climatisation, la configuration IABAI présente une meilleure performance lorsque les deux couches d'isolant ont la même épaisseur alors que la structure BAIAB est d'autant plus performante que l'épaisseur de la couche de béton de la face externe est petite. Des deux configurations de mur étudiées par ces auteurs, la structure IABAI présente la meilleure performance thermique.

Al-Turki et Zaki (1991), cité par Sami et al. (2011), ont étudié l'effet de la localisation des couches des matériaux isolants et massifs sur les charges de climatisation. Les résultats ont montré que la dispersion des couches de matériau isolant dans un mur est moins performante que l'utilisation d'une couche unique de matériau isolant de même épaisseur, placée sur la face externe du mur. Eben Saleh (1990) a évalué l'impact des différents arrangements des couches d'un mur sur sa performance thermique. La configuration préférable est obtenue lorsque la couche de matériau isolant du mur est localisée sur la face externe. Les résultats similaires ont été obtenus par Al-Nafeez et Rogers (1990) qui ont étudié l'influence de la localisation de la couche d'isolant dans le mur sur le déphasage, le facteur d'amortissement, le coût financier et la résistance thermique (R-value).

Gardant l'épaisseur et le coefficient de transmission surfacique (U-value) d'un mur multicouche constants (couche d'isolant et de maçonnerie), Bojic et Loveday (1997) cité par Sami et al. (2011) ont étudié l'influence de la distribution des couches de matériau massif et de matériau isolant sur la réduction de la consommation d'énergie en considérant trois modes de fonctionnement du système de climatisation : refroidissement continu, chauffage et refroidissement intermittent. Leurs résultats ont montré que la structure Isolant/Maçonnerie/Isolant est la plus performante en chauffage intermittent alors que la configuration Maçonnerie/Isolant/Maçonnerie est préférable en refroidissement intermittent. Lorsque la température interne est continuellement maintenue constante, la distribution des différentes couches du mur n'affecte pas sa performance thermique. Kossecka et Kosny (2002) ont analysé la performance énergétique du bâtiment tout entier et ont conclu que la configuration des matériaux constitutifs de l'enveloppe externe a une influence significative sur sa consommation énergétique annuelle. Toutefois, cette influence dépend du type du climat dans lequel le bâtiment se trouve. La meilleure performance est obtenue lorsque la couche du mur faite en matériau massif est placée sur sa face interne.

Al-Sanea et Zedan (2001) ont étudié l'impact de la position de la couche d'isolant dans un mur de bâtiment sur sa performance thermique dans les conditions climatiques de Riyad, Arabie Saoudite. Les paramètres climatiques sont supposés évoluer de manière périodique (de période 24 heures). Ils ont conclu que la position de l'isolant a une faible influence sur les charges journalières de climatisation avec un léger avantage lorsqu'elle (couche d'isolant) est placée

sur la face externe du mur en été ou sur sa face interne en hiver. Néanmoins, la localisation de la couche d'isolant sur la face externe du mur permet de réduire significativement l'amplitude des fluctuations de la densité de flux de chaleur sur la face interne du mur (et par conséquent le pic de chaleur transmis vers l'intérieur) aussi bien durant les jours d'été que ceux d'hiver.

Al-Sanea and Zedan (2001) ont montré par ailleurs que dans les bâtiments où le système de climatisation opère de façon intermittente, la couche d'isolant doit être placée sur la face interne du mur. Les mêmes auteurs ont étudié l'influence du nombre de couches de polystyrène et de leurs emplacements dans un mur en béton sur le déphasage, le facteur d'amortissement et les charges de climatisation. Les différentes configurations de murs étudiées ont le même coefficient de transmission surfacique et la même épaisseur. La température de la face interne est fixe (cas des bâtiments continuellement climatisés). Leurs résultats ont montré que la performance des murs s'améliore avec le nombre de couches d'isolant insérées. Pour les configurations ayant une seule couche d'isolant, sa localisation sur la face externe du mur offre une meilleure performance.

Bien que l'insertion d'une couche de matériau isolant dans les murs ou dans les toitures améliore habituellement leurs performances thermiques, son coût, généralement important exige de trouver un compromis entre son épaisseur et la quantité d'énergie susceptible d'être économisée durant la vie du bâtiment.

#### **1.5.4.4.2. Optimisation de l'épaisseur de l'isolant**

Plusieurs auteurs (Ucar et Balo, 2010 ; Ekici et al., 2012 etc.) ont déterminé l'épaisseur optimale de l'isolant dans les murs à partir des charges annuelles de climatisation évaluées en utilisant le concept de degré-jours ou degré-heures de chauffage et/ou de refroidissement. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles ne prennent pas en compte le rayonnement solaire et l'inertie thermique du mur. D'autres auteurs ont estimé l'épaisseur optimale de l'isolant à partir des charges de climatisation évaluées en régime variable en utilisant les méthodes analytiques (Daouas et al., 2009 ; Daouas, 2011) ou numériques (Al-Sanea et Zedan, 2001 ; Ozel, 2013).

L'influence de l'orientation du mur, de son absorptivité, etc. sur l'épaisseur optimale de la couche isolante a été étudiée par certains auteurs. Les résultats obtenus par Daouas (2011) et par Ozel (2011) ont montré que l'épaisseur optimale de l'isolant peut varier respectivement jusqu'à 1,6 cm et 0,5 cm lorsqu'on change l'orientation du mur. L'étude de Yu et al. (2009), menée dans quatre villes chinoises a montré que la couleur du mur influence significativement l'épaisseur optimale de l'isolant. Dans les conditions climatiques de la ville d'Elazig, Ozel (2012) a estimé l'épaisseur optimale de la couche isolante en fonction de l'absorptivité. Les résultats ont montré que ce dernier impacte légèrement l'épaisseur optimale de l'isolant.

#### **1.5.4.5. Les matériaux isolants thermiques**

Les matériaux isolants sont de plusieurs natures et proviennent de plusieurs sources. On distingue :

- les isolants synthétiques : polystyrènes, polyuréthanes, mousse urée-formol, polyesters ;

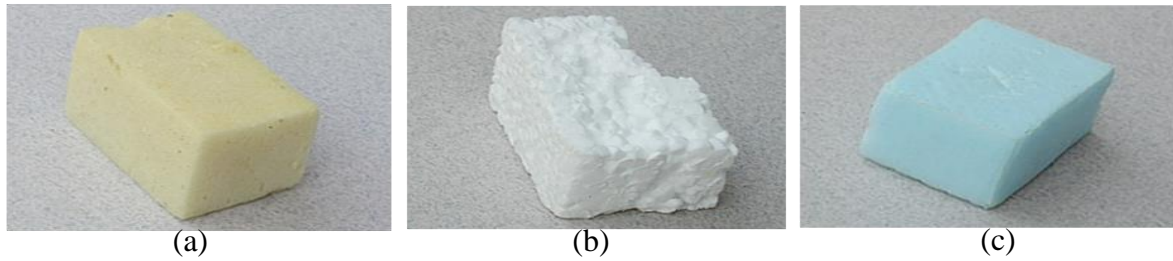


Figure 1.12: Photos de quelques isolants synthétiques : polyuréthane (a), polystyrène expansé (b) et extrudé (c).

- les isolants minéraux : laines minérales, verre cellulaire, perlite et vermiculite, argile expansée ;

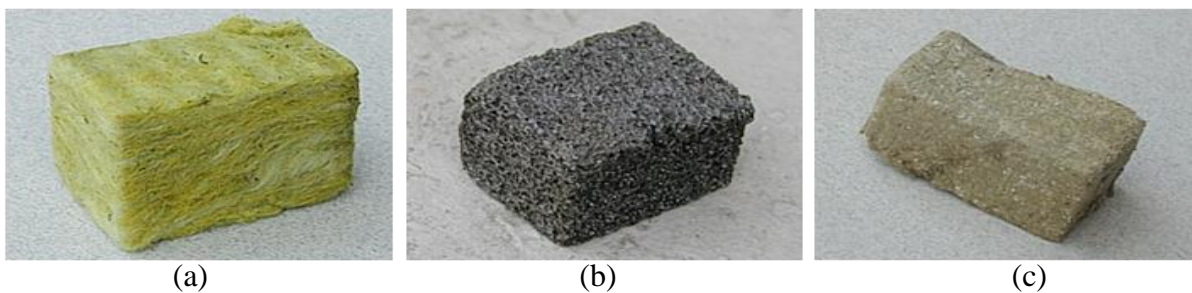


Figure 1.13: Photos de quelques isolants minéraux : laine de roche (a), verre cellulaire (b) et perlite expansée (c).

- les « isolants » réflecteurs minces ;
- les isolants végétaux : bois feutré, fibragglos, granulats de bois minéralisé, laine de cellulose, liège expansé, chanvre, lin, « laine » de coco, « laine de coton », roseaux ;

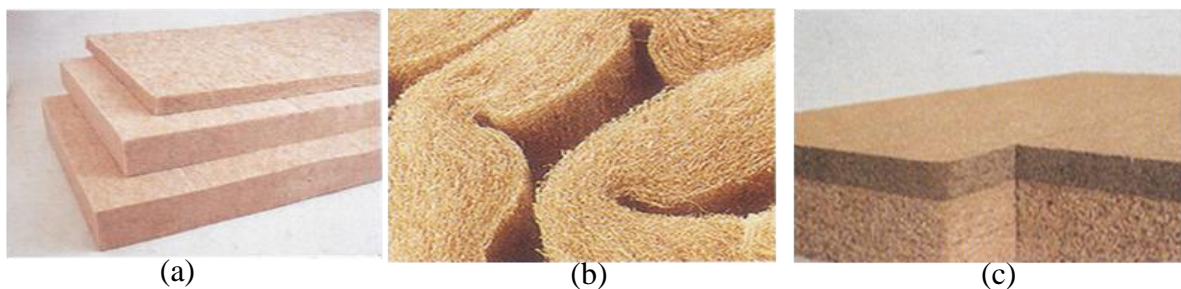


Figure 1.14: Photos de quelques isolants végétaux : laine de lin (a), laine de chanvre (b) et bois feutré (c).

- les isolants d'origine animale : laine de mouton, plumes de canard ;
- les isolants locaux non commercialisés : copeaux et sous-productions des industries du bois, pailles diverses et résidus de récolte, « laines » potentielles, « polystyrènes verts ».

Les propriétés thermophysiques de quelques isolants sont présentées dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3: Masse volumique et conductivité thermique de quelques isolants (Meukam, 2004).

Matériaux	Masse volumique $\rho(kg.m^{-3})$	Conductivité thermique $\lambda (W.m^{-1}.K^{-1})$
Laine de verre minérale	18	0,034-0,056
Polystyrène expansé	18	0,046
Polystyrène extrudé	35	0,031-0,034
Verre cellulaire		0,050
Polyuréthane	35	
Laine de bois	150	0,031-0,034
Perlite expansé	90	0,060
Liège de bambou	150-250	0,048
Sciure de bois	190-250	0,06-0,07
Kapok		0,035 à 30°C

### 1.5.5. L'inertie thermique des parois

Grâce à leur habilité à stocker et restituer de la chaleur et à réduire les infiltrations en créant une enveloppe étanche, les matériaux massifs ou à forte inertie thermique sont susceptibles d'améliorer passivement le confort thermique et/ou de réduire les charges de climatisation.

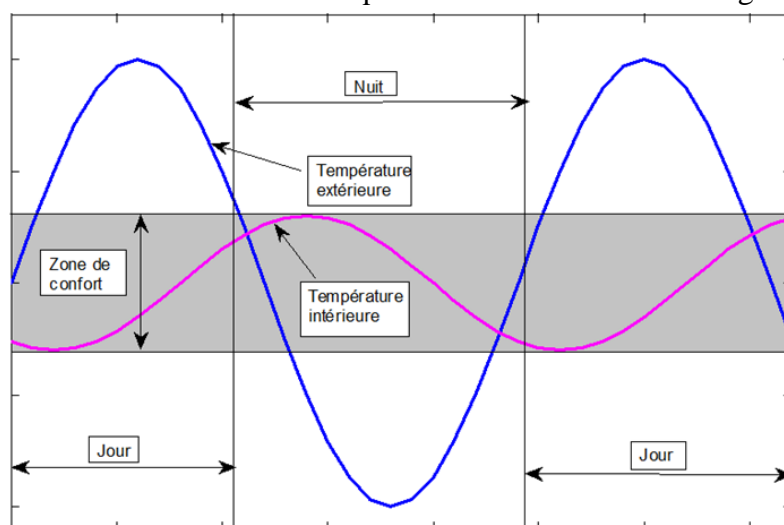


Figure 1.15: Evolution des températures extérieure et intérieure d'un local refroidi via la technique de ventilation nocturne.

En effet, durant les jours chauds, l'enveloppe massive emmagasine une importante quantité de chaleur privant ainsi l'ambiance intérieure des températures élevées. Pendant la nuit où la température extérieure est inférieure à la température intérieure (Figure 1.15), l'application d'une ventilation naturelle favorise via le phénomène de convection la dissipation de la chaleur stockée dans les parois durant la journée en l'évacuant vers l'extérieur. Cette stratégie permet ainsi de réduire considérablement les pics de chaleur dans le bâtiment ou d'amortir les effets des fortes fluctuations de température intérieure. De cette manière, les surchauffes sont ainsi limitées dans les bâtiments non climatisés.

Néanmoins, l'effectivité de cette stratégie de refroidissement exige que certaines conditions sur le climat et sur la nature de surfaces d'échanges entre l'air et les parois du bâtiment soient satisfaites. Givoni (1994) affirme que la température maximale pour laquelle la stratégie de stockage par l'inertie reste possible dépend de la limite supérieure de confort thermique dans les bâtiments non-climatisés. Cette limite dépend d'une part de la pression de vapeur ambiante et d'autre part de la vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment. Il démontre aussi que la différence entre la température maximale et la température minimale journalières doit être au moins égale à 10°C. Pour Van der Maas et al. (1994), la variation diurne de la température extérieure doit être suffisamment importante avec sa moyenne et celle de l'humidité comprises dans la zone de confort et les infiltrations d'air durant la journée doivent être évitées.

Les parois de faible inertie thermique sont couramment rencontrées dans les climats tempérés et chauds. Elles sont généralement associées à une forte capacité d'infiltration facilitant la ventilation naturelle.

### 1.5.6. Les protections solaires

Il est important de contrôler l'intensité du rayonnement solaire pénétrant dans un local pour assurer un meilleur niveau de confort thermique et visuel ou pour réduire la consommation d'énergie de refroidissement. Ce contrôle se fait à base des protections solaires qui interceptent le rayonnement solaire (principalement sa composante directe) incident sur les murs et/ou les ouvertures. Ces protections solaires peuvent faire partie du bâtiment ou non (arbres, maisons adjacentes, etc.). Dans le premier cas, elles peuvent être mobiles ou fixes. Les protections solaires mobiles sont celles mises en place uniquement quand c'est nécessaire. Dans cette catégorie se trouvent les volets, les stores vénitiens, les lames, etc. Les protections solaires fixes font généralement partie de l'ouvrage de maçonnerie et sont souvent situées autour des baies vitrées que l'on désire protéger. Dans cette catégorie, on distingue :

- les effets d'auvent: débord de toit, saillie de dalle, brise-soleil, balcon filant, écran à lames horizontales, etc. ;
- les effets de flanc: décrochement de façade, saillie de refends, écran à lames verticales, etc. ;
- les effets de loggia: loggia, tableaux et linteau de fenêtre, écran à lames croisées, etc. ;
- les effets de patio: cour intérieure, patio, puits de lumière, garde-corps plein+saillie de refends, etc. ;
- les effets de vis-à-vis: vis-à-vis sur une rue, mur de clôture, garde-corps plein, protection solaire en double peau, etc.

Plusieurs auteurs ont étudié l'efficacité des protections solaires. L'influence de la protection végétale sur les flux radiatif et convectif à la surface externe des murs a été étudiée par Papadakis et al. (2001). Ils ont mené des études sur le mur sud-ouest d'un bâtiment à Athens. Les résultats, présentés pour quatre jours estivaux, ont montré que les flux radiatif et convectif au niveau de l'ombre portée des arbres sont significativement inférieurs à ceux obtenus sur les surfaces totalement éclairées.

Nikoofard (2011) a étudié numériquement l'impact de l'ombre portée des maisons adjacentes et de la protection végétale sur la consommation énergétique des bâtiments du secteur résidentiel au Canada. Plusieurs configurations ont été analysées. Les résultats ont montré que les quantités d'énergie indispensables pour le refroidissement et le chauffage peuvent être affectées respectivement de 90% (réduction) et de 10% (hausse).

Chan (2012) a étudié l'influence de la forme du bâtiment sur la consommation énergétique dans une région subtropicale (Hong Kong). La forme rectangulaire est choisie comme la configuration de base. Les autres formes sont choisies de sorte que les ombres portées de certaines parties saillantes du bâtiment se trouvent sur d'autres murs du même bâtiment. Les résultats ont montré que certains designs extérieurs sont susceptibles de réduire les charges annuelles de climatisation jusqu'à 18,3% par rapport à la forme de base.

## 2. Transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux poreux : théorie

### 2.1. Description des milieux poreux

Un milieu poreux est un domaine matériel lacunaire qui possède des interstices susceptibles d'accueillir des fluides (liquides ou gazeux). Un matériau poreux peut donc être décomposé en trois phases. Le diagramme de phases de tels matériaux (non saturé) est donné par la Figure 1.16

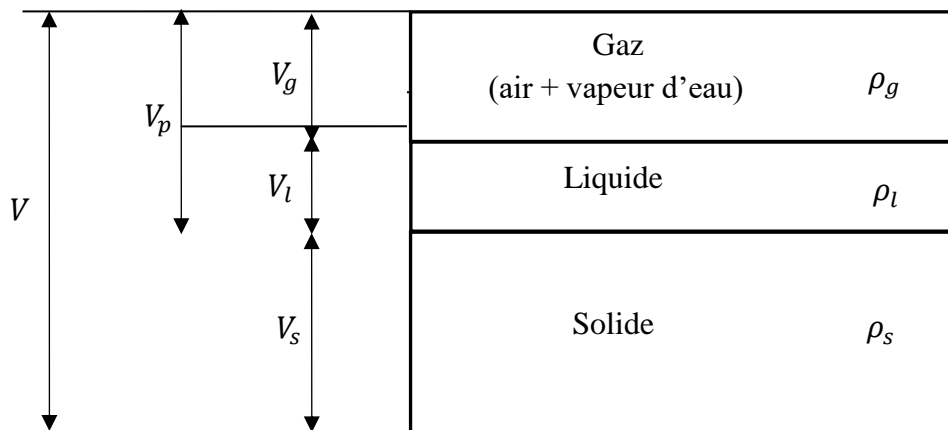


Figure 1.16: Diagramme de phase d'un matériau poreux non saturé (Samri, 2008).

$V$  : volume apparent ( $m^3$ )  
 $V_p$  : volume des pores ( $m^3$ )  
 $V_s$  : volume solide ( $m^3$ )  
 $V_l$  : volume liquide ( $m^3$ )  
 $V_g$  : volume gazeux ( $m^3$ )

$m$  : masse totale (kg)  
 $m_s$  : masse de solides (kg)  
 $m_l$  : masse de liquides (kg)  
 $m_g$  : masse de gaz (kg)

Les relations quantitatives entre les masses et les volumes des différents constituants sont données ci-après :

La masse totale  $m$ :

$m = m_s + m_l + m_g$  [1.3]  
La masse des gaz  $m_g$  est supposée négligeable devant les masses de liquides et de solides.

Le volume apparent  $V$ :

$$V = V_s + V_l + V_g \quad [1.4]$$

Le volume des pores  $V_p$ :

$$V_p = V_l + V_g \quad [1.5]$$

La masse volumique apparente  $\rho$  et la masse volumique apparente à l'état sec  $\rho_0$ :

$$\rho = \frac{m}{V}; \quad \rho_0 = \frac{m_s}{V} \quad [1.6]$$

La masse volumique absolue  $\rho_s$ :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad [1.7]$$

La porosité totale  $n$  (qui tient compte des pores fermés au sein du matériau) :

$$n = \frac{V_l + V_g}{V} = \frac{V - V_s}{V} = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_s} \quad [1.8]$$

La teneur en eau volumique  $\theta$  :

$$\theta = \frac{V_{eau}}{V} \quad [1.9]$$

La teneur en eau massique notée  $u$  exprimée par unité de masse ( $kg/kg$ ) ou  $\omega$  exprimée par unité de volume ( $kg/m^3$ ) :

$$u = \frac{m - m_s}{m_s}; \quad \omega = \frac{m - m_s}{V} = \rho_0 u \quad [1.10]$$

Soumis à un gradient de température, d'humidité relative et/ou de pression d'air, un milieu poreux est le siège des transferts de chaleur et de masse.

## 2.2. Transfert de masse dans un milieu poreux

### 2.2.1. Stockage d'humidité

Les matériaux poreux ont la capacité d'échanger de l'humidité avec l'air environnant. Une augmentation de l'humidité de l'air entraîne une augmentation de la masse apparente du



matériau. Cela est dû à la fixation des molécules d'eau sur la surface des pores du matériau : c'est le phénomène d'adsorption. A l'inverse, une diminution de l'humidité de l'air ambiant entraîne une diminution de la masse volumique apparente du matériau : c'est le phénomène de désorption. Cette caractéristique physique des matériaux poreux est représentée par les isothermes de sorption/désorption.

### 2.2.1.1. Mode de fixation de l'humidité

L'hygrométrie HR (%) permet de caractériser le degré d'humidité dans une ambiance. Elle se définit comme le rapport de la pression de la vapeur d'eau  $P_v$  existante dans un gaz à la pression de la vapeur saturante  $P_{sat}$  à la même température.

$$HR = \frac{P_v}{P_{sat}} 100 \quad [1.11]$$

Dans un matériau poreux, l'eau peut être :

- fixée par adsorption chimique ;
- fixée par adsorption physique : ce phénomène de surface fixe les molécules de gaz ou de liquide sur les surfaces solides des adsorbants. La molécule adsorbée n'est pas dégradée (contrairement à l'absorption chimique) et demeure dans sa forme originelle mais n'est plus en suspension dans le solvant ;
- liée mécaniquement par les forces capillaires ;
- libre (c'est-à-dire avec une énergie de liaison nulle).

L'adsorption physique peut se décomposer en trois phases présentées sur la Figure 1.17.

- Le domaine hygroscopique (1) : l'eau se trouve sous forme adsorbée autour des grains. La phase liquide est discontinue ; la phase gazeuse est continue. Les échanges d'eau se font par changement de phase et par filtration gazeuse.
- Le domaine pendulaire (2) : Ce domaine est encore mal défini. L'eau forme des ponts liquides entre les grains (eau capillaire). Les transferts se font par filtration liquide et gazeuse et par changement de phase.
- Le domaine funiculaire (3) : la phase liquide est continue et la phase gazeuse se trouve sous forme de bulles occluses. Les transferts d'eau se font par filtration liquide. Le schéma (4) est un cas particulier de ce domaine, il représente l'état saturé dans lequel la phase gazeuse a entièrement disparu.

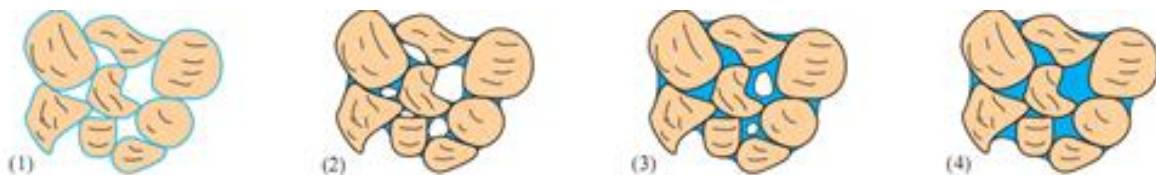


Figure 1.17: Représentation schématique des états hydriques d'un milieu poreux (Salager, 2006).

### 2.2.1.2. Condensation capillaire – Loi de Kelvin-Laplace

La condensation capillaire correspond à la dernière étape de la fixation de l'humidité. Elle explique pourquoi un matériau initialement en équilibre avec l'extérieur se remplit progressivement d'eau au fur et à mesure que l'humidité relative augmente de façon isotherme.

A l'échelle d'un pore que l'on symbolise ici par deux plaques parallèles (Figure 1.18) se trouvent de l'air et de la vapeur d'eau. Si l'espace entre les deux plaques est suffisamment petit, un changement de phase s'opère et de l'eau se condense le long des parois formant des ménisques (Samri, 2008).

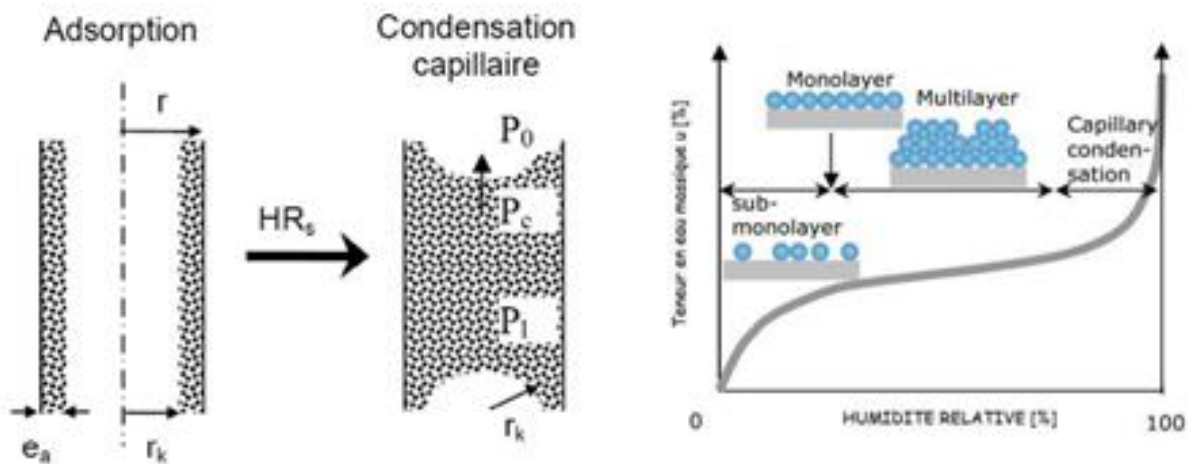


Figure 1.18: Condensation capillaire dans un pore (Collet, 2004 cité Nassima, 2010).

Lorsqu'on analyse la condition d'équilibre, on constate l'existence d'une différence de pression positive entre l'air humide et l'eau liquide appelée pression capillaire ( $P_c$ ) qui est déterminée à partir de la relation de Laplace :

$$P_0 - P_l = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r_k} \quad [1.12]$$

avec :

$\sigma$  : tension superficielle (dans le cas de l'eau,  $\sigma = 0,075 N \cdot m^{-1}$ )

$\theta$  : angle de mouillage ( $< \frac{\pi}{2}$ )

$P_0$  : pression atmosphérique (Pa)

$P_l$  : pression liquide (Pa)

La loi de Kelvin s'écrit :

$$P_c = P_0 - P_l = -\rho_l RT \ln(HR) \quad [1.13]$$

$\rho_l$  : masse volumique de l'eau,

$R$  : constante des gaz parfaits,

$T$  : température absolue.

La combinaison des deux expressions (1.12) et (1.13) conduit à une relation entre le rayon  $r_k$  du ménisque et l'humidité relative  $HR$  :

$$r_k = -\frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{\rho_l RT \ln(HR)} \quad [1.14]$$

La relation ci-dessus montre que si l'air humide dans le réseau poreux est caractérisé par une humidité relative ( $HR$ ) à l'équilibre, tous les pores de rayon inférieur à  $r_k$  sont nécessairement remplis d'eau.

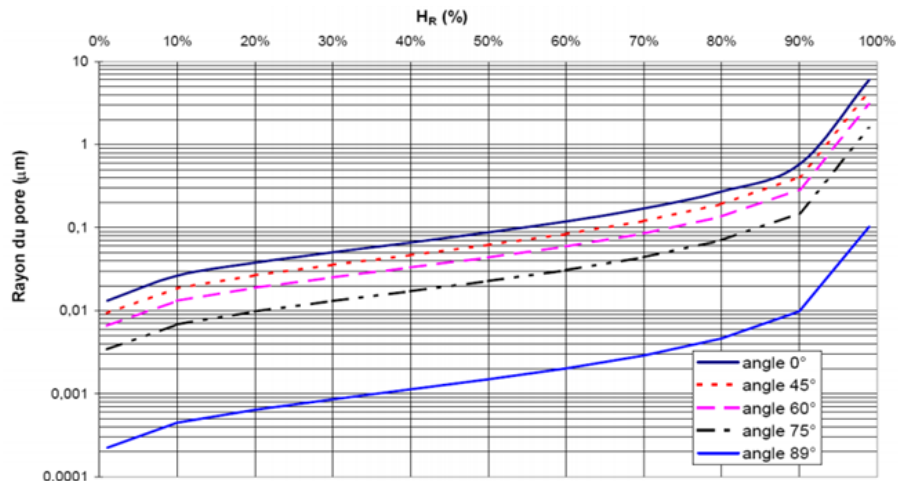


Figure 1.19: Rayon du capillaire en dessous duquel se produit la condensation capillaire pour  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  (Cerezo, 2005).

Deux types de milieux poreux sont ainsi mis en évidence (Crausse, 1983 cité par Nassima, 2010) :

- les matériaux à comportement dit hygroscopique, dans lesquels la quantité d'eau fixée par l'adsorption physique est relativement importante par rapport à la quantité d'eau correspondant à l'état de saturation complète des pores. Ces matériaux ont une grande surface spécifique et un rayon moyen de pores inférieur à  $10^{-7}\text{m}$  (1-5) ;
- les matériaux non hygroscopiques (capillaro-poreux), pour lesquels la quantité d'humidité fixée par adsorption est négligeable. Dans ce cas l'humidité en masse se trouve fixée au milieu du solide, par les forces capillaires.

### 2.2.2. Transport de la vapeur dans un milieu poreux

Soumis à un gradient de concentration de la vapeur, la densité de flux de vapeur traversant un matériau poreux est donnée à partir de la loi de Fick par la relation [1.15] :

$$\vec{g}_{v1} = -\frac{D_a}{\mu} \overrightarrow{\text{grad}}(\rho_v) \quad [1.15]$$

où  $\mu$  désigne le facteur de résistance à la vapeur d'eau relié à la perméabilité à la vapeur du matériau ( $\delta_v$ ) par l'équation :

$$\delta_v = \frac{D_a}{\mu} \quad [1.16]$$

Ainsi, le transport de la vapeur dans un milieu poreux se présente comme le transport de la vapeur dans l'air immobile modifié par la présence de la matrice solide, ainsi que de l'eau liquide.

En utilisant la loi des gaz parfaits, l'équation 1.16 peut s'écrire en fonction d'un gradient de la pression de la vapeur comme suit :

$$\vec{g}_{v1} = -\frac{D_a}{\mu RT} \overrightarrow{\text{grad}}(p_v) = -\delta_p \overrightarrow{\text{grad}}(p_v) \quad [1.17]$$

où  $\delta_p$  est la perméabilité du matériau à la vapeur (sous un gradient de pression de vapeur).

En plus de la diffusion de la vapeur sous l'effet d'un gradient de vapeur, l'air circulant dans le matériau poreux transporte également une certaine quantité d'eau à l'état gazeux. La densité de flux de vapeur sous ces conditions peut se donner par l'équation 1.18.

$$\vec{g}_{v2} = HA \vec{g}_a = -HA k_a \overrightarrow{\text{grad}}(P_a) \quad [1.18]$$

où  $P_a$  est la pression de l'air humide,  $k_a$  est la perméabilité à l'air du matériau et  $HA$  est l'humidité absolue de l'air ambiant.

$HA$  est le quotient de la masse de la vapeur contenue dans un échantillon d'air par la masse sèche de cet échantillon.

$$HA = \frac{M_{eau}}{M_a} \frac{p_v}{P_a - p_v} \cong 0,622 \frac{p_v}{P_a - p_v} \quad [1.19]$$

Finalement, la densité de flux de vapeur à travers un matériau poreux peut se donner par l'équation [1.20].

$$\vec{g}_v = \vec{g}_{v1} + \vec{g}_{v2} = -\delta_p \overrightarrow{\text{grad}}(p_v) - 0,622 \frac{p_v}{P_a - p_v} k_a \overrightarrow{\text{grad}}(P_a) \quad [1.20]$$

### 2.2.3. Transport d'eau liquide dans un matériau poreux

Le transfert d'eau à l'état liquide au sein d'un matériau poreux a lieu sous l'effet d'un gradient de pression de succion (loi de Darcy) et de la gravité. La modélisation mathématique de ce phénomène est donnée par l'équation :

$$\vec{g}_l = K(\overrightarrow{grad}(P_{succ}) + \rho_{eau}\vec{g}) \quad [1.21]$$

où  $K$  est la conductivité liquide du matériau et  $P_{succ}$  est la pression de succion.

Dans le cas où les dimensions des pores sont petites, le deuxième terme de l'équation ci-dessus devient négligeable devant le terme qui régit le transfert d'eau sous un gradient de pression de succion.

### 2.2.4. Transfert d'humidité : bilan

La diffusion de l'eau au sein d'un matériau poreux se fait en deux phases : liquide et gazeux. Ainsi, la densité de flux d'humidité se trouve être la somme des densités de flux de vapeur et d'eau liquide.

$$\vec{g}_{eau} = \vec{g}_v + \vec{g}_l \quad [1.22]$$

D'après la loi de conservation de la quantité de matière, on peut écrire :

$$-\frac{dw}{dt} = div(\vec{g}_v + \vec{g}_l) \quad [1.23]$$

## 2.3. Transfert de la chaleur

### 2.3.1. Stockage de la chaleur

L'enthalpie totale d'un volume de matériau poreux, humide et non saturé peut s'obtenir à partir de la somme des enthalpies du matériau sec, de l'eau liquide, de la vapeur d'eau, du changement de phase et d'adsorption.

$$H = H_o + H_l + H_v + H_a + H_{lat} + H_{eau} \quad [1.24]$$

L'enthalpie du matériau sec s'écrit :

$$H_o = m_o C_{po} T \quad [1.25]$$

où  $m_o$  et  $C_{po}$  sont respectivement la masse et la chaleur spécifique à pression constante du matériau sec. La température de référence est prise égale à zéro.

L'enthalpie de l'eau liquide contenue dans le matériau est donnée par l'équation ci-dessous :

$$H_l = m_l C_{pl} T \quad [1.26]$$

avec  $C_{pl}$  la chaleur spécifique à pression constante de l'eau liquide.

L'enthalpie de la phase gazeuse (vapeur d'eau+air) est donnée par la relation [1.27]:

$$H_v + H_a = (m_v C_{pv} + m_a C_{pa})T \quad [1.27]$$

L'enthalpie de changement de phase s'écrit :

$$H_{lat} = m_v L_v \quad [1.28]$$

avec  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation à la température de référence et  $m_v$  la masse de la vapeur d'eau contenue dans le matériau.

L'enthalpie de sorption est supposée négligeable devant les autres contributions. Finalement, l'enthalpie totale s'écrit :

$$H = (m_o C_{po} + m_l C_{pl} + m_v C_{pv} + m_a C_{pa})T + m_v l_v \quad [1.29]$$

### 2.3.2. Lois de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur dans les milieux poreux humides se fait de plusieurs manières à cause de trois phases existant en même temps :

- Conduction : dans les phases liquide, solide et gazeuse
- Convection : dans les pores
- Rayonnement : entre les parois des pores
- Changement de phase : évaporation ou condensation de la vapeur dans les pores.
- Diffusion de vapeur d'eau liée à un gradient de température et de la teneur en eau.

Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable devant les autres modes de transfert. Sous l'effet d'un gradient de température, la chaleur peut se propager de proche en proche dans le matériau poreux : c'est le transfert de chaleur par conduction. La densité de flux de chaleur est donnée par la loi de Fourier exprimée comme suit :

$$\vec{q}_{cond} = -\lambda \overrightarrow{grad}(T) \quad [1.30]$$

où  $\lambda$  est la conductivité thermique du matériau humide. Elle est une fonction de la température et de la teneur en eau du matériau.

Le phénomène de convection est lié à la circulation d'air. La densité de flux convectif peut s'écrire en négligeant la contribution de la vapeur d'eau :

$$\vec{q}_{conv} = C_{pa} \vec{g}_a T \quad [1.31]$$

Le transfert d'humidité au sein d'un matériau poreux entraîne un transfert thermique par chaleur sensible. La densité de flux de chaleur enthalpique par chaleur sensible s'écrit :

$$\vec{q}_{sen} = C_{pl}\vec{g}_l T + C_{pv}\vec{g}_v T \quad [1.32]$$

Le changement d'état physique de l'eau pure (comme tous les corps purs ou les mélanges azéotropiques) se fait à température constante et s'accompagne d'un échange de chaleur avec l'extérieur. La densité de flux thermique liée à ce phénomène dans un milieu poreux s'écrit :

$$\vec{q}_{lat} = l_v \vec{g}_v \quad [1.33]$$

Finalement, la densité de flux totale s'écrit :

$$\vec{q}_{tot} = -\lambda \overrightarrow{grad}(T) + C_{pl}\vec{g}_l T + (C_{pv}T + l_v)\vec{g}_v + C_{pa}\vec{g}_a T \quad [1.34]$$

D'après la loi de conservation de l'énergie, on peut écrire :

$$-\frac{1}{V} \frac{dH}{dt} = \text{div}(\vec{q}_{cond}) + \text{div}(C_{pl}\vec{g}_l T + (C_{pv}T + l_v)\vec{g}_v) + \text{div}(C_{pa}\vec{g}_a T) \quad [1.35]$$

### 3. Synthèse des recherches effectuées sur les matériaux à base de la terre

#### 3.1. La terre : une bonne réponse au développement durable de l'Afrique

Dans le contexte africain, les matériaux locaux de bâtiment sont principalement la latérite et le bois. La zone intertropicale est majoritairement couverte par un sol lessivé de couleur rougeâtre appelé latérite. L'utilisation de ce matériau de construction procure plusieurs avantages qui sont de divers ordres :

**Sur le plan culturel :** la construction en terre permet de préserver notre patrimoine culturel.

**Sur le plan économique :**

- L'utilisation de la latérite limite les importations des matériaux dits conventionnels et permet ainsi de maintenir la balance commerciale.
- Les maisons en terre sont nettement moins coûteuses que celles construites en matériaux dits conventionnels tels que le parpaing.
- La construction en terre n'exige pas d'outils sophistiqués et une main-d'œuvre très spécialisée. La promotion de ce matériau peut encourager l'auto-construction.

**Sur le plan écologique :**

- Le processus de fabrication des briques de terre a très peu de conséquences nocives sur l'environnement.
- Le pouvoir de régulation thermique des briques de terre entraîne une sous consommation énergétique ; ce qui dérègle moins l'environnement.
- Disponible localement, la latérite n'est pas transportée sur de longues distances réduisant ainsi la quantité de CO<sub>2</sub> émis.

- Non mélangée au ciment, au bitume, à la chaux, etc., la terre utilisée comme matériau de construction est totalement recyclable et ne constitue donc pas une consommation de ressources de la planète.

En dépit des avantages que procure l'utilisation de la terre comme matériau de construction, il existe quelques inconvénients. On note entre autres :

- Sa faible acceptabilité par la population qui la considère comme matériau provisoire et destiné à la basse classe.
- L'émiettement de certaines briques de terre lorsqu'elles sont en contact avec l'eau.

Quelques études sur la durabilité des briques de terre ont été menées. Bui et al. (2009) ont étudié la durabilité des murs en terre compressée. Ces murs ont été construits et exposés 20 ans durant aux conditions climatiques d'une ville française. Trois murs de nature différente, désignés par SMRE (mur stabilisé avec 5% de chaux hydraulique), MRE (mur non stabilisé) et FRE (mur non stabilisé fait avec les particules fines) comme l'indique la Figure 1.20 ont été étudiés.



Figure 1.20: Différents murs en terre exposés 20 ans durant aux conditions climatiques de France (Bui et al., 2009).

La mesure de l'effet de l'érosion (épaisseur moyenne de mur abrasé) donne 2 mm (correspondant à une perte en épaisseur d'environ 0,5%) dans le cas du mur stabilisé et 6,5 mm (correspondant à une perte en épaisseur d'environ 1,6%) dans le cas des murs non stabilisés. Il ressort de ces résultats que les murs en terre stabilisée n'exigent pas de couche de protection dans de telles conditions climatiques. La stabilisation des briques grâce au ciment ou à la chaux peut donc permettre d'éviter l'émiettement des murs en terre exposés à certaines conditions climatiques.

Conscient de tous les avantages que procure l'utilisation des matériaux locaux dont fait partie les matériaux à base de la terre, le gouvernement camerounais, dans la recherche des réponses au développement durable, s'est fortement impliqué dans la promotion desdits matériaux à travers la création de la MIPROMALO en 1991 (en pleine crise économique) et la signature de



la circulaire gouvernementale N°002/CAB/PM du 12 mars 2007 relative à l'utilisation des matériaux locaux dans la construction des bâtiments publics jusqu'à R+1.

### **3.2. Utilisations de la terre comme matériau de construction**

Plusieurs techniques permettent d'utiliser la terre crue dans la construction des bâtiments. Les techniques de construction en terre les plus populaires sont aujourd'hui l'adobe, le pisé et la terre compressée (Nwoke et al., 2011).

- L'adobe : il s'agit de la boue moulée et séchée qui est utilisée pour construire les murs. La terre utilisée pour la circonstance doit contenir 10% d'argile (Nwoke et al., 2011). Les fibres (à l'instar de la paille) et/ou le ciment peuvent être incorporés afin d'augmenter leur stabilité.
- Le pisé : cette technique implique le compactage de la terre humide entre les plaques rigides afin de créer un mur monolithique. La terre utilisée dans ce cas doit contenir environ 30% d'argile, 70% de sable et un peu de gravier (Nwoke et al., 2011).
- Les briques de terre comprimées (BTC) : technique relativement récente, elle consiste à presser manuellement ou à l'aide d'une presse hydraulique la terre dans un moule. Comme dans le cas de l'adobe, la stabilité des BTC est améliorée par ajout des fibres végétales (sciure de bois, fibre de coco, etc.), et/ou d'un liant hydraulique (ciment, chaux, bitume). La brique de terre compressée se présente comme la forme moderne de l'adobe.

### **3.3. Stabilisation des briques de terre**

Plusieurs procédés permettent de stabiliser les briques de terre au rang desquels on trouve :

#### **3.3.1. La stabilisation mécanique**

La stabilisation mécanique qui s'effectue sans incorporation de stabilisant consiste essentiellement en une réduction de la porosité du matériau par resserrement des particules : il s'agit du compactage. Lorsqu'il est effectué dans de bonnes conditions, il permet une réduction de la perméabilité à l'eau, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement. Seul le compactage permet d'obtenir des briques de terre une résistance mécanique importante.

#### **3.3.2. La stabilisation physique**

La stabilisation physique modifie les caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Le mélange obtenu conduit selon le cas, soit à diminuer l'indice de plasticité du matériau de base, soit à lui conférer une certaine cohésion. On peut aussi incorporer à la terre des fibres qui vont reprendre et répartir les contraintes, les tensions qui s'exercent dans et sur la terre. Les risques de fissuration seront ainsi réduits et la résistance mécanique des briques améliorée (Belhamri et al. 2007). Pour ce dernier cas, plusieurs fibres végétales telles que : paille, copeaux, écorce, etc. peuvent être utilisées. La plupart de ces fibres végétales présentent

l'avantage d'alléger le produit et par conséquent d'en améliorer ses qualités d'isolation thermique.

### **3.3.3. La stabilisation chimique**

La stabilisation chimique permet l'amélioration des propriétés d'une brique de terre par l'intermédiaire de certains adjuvants. On a souvent recours à l'adjonction des produits (liant hydraulique par exemple) qui rendent la terre à utiliser moins hydrophile pour réduire la perméabilité des briques de terre à l'eau. Les liants hydrauliques, qui peuvent se pétrifier sous l'eau, comprennent la chaux hydraulique, le ciment, les pouzzolanes, etc. L'adjonction du ciment permet alors de lier les grains du sable tout en stabilisant l'argile de la terre. La règle générale voudrait que la chaux soit utilisée pour la terre très argileuse, le bitume pour la terre sableuse et le ciment pour la terre sableuse et argileuse.

#### **3.3.3.1. Stabilisation à la chaux**

Suite à l'introduction de la chaux dans une terre pour stabilisation, les ions  $\text{Ca}^{2+}$  sont en partie adsorbés à la surface des particules argileuses en remplacement des cations monovalents comme  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ . La quantité de  $\text{Ca}^{2+}$  adsorbée dépend de la capacité d'échange cationique du sol traité. Plus la capacité d'échange est élevée, plus le sol adsorbe de  $\text{Ca}^{2+}$ . En fait, tous les cations adsorbés ne sont plus disponibles pour les réactions pouzzolaniques (Fetra et al., 2011). La quantité de chaux nécessaire pour satisfaire l'affinité du sol pour la chaux est appelée « lime fixation point (LFP) ». La chaux en excès du LFP est celle qui participe au processus de cimentation. Les réactions entre cette chaux, la silice et l'alumine libres, concourant à la formation de nouveaux minéraux comme des CSH (silicates de calcium hydratés), des CAH (aluminates de calcium hydratés) et des CASH (alumino-silicates de calcium hydratés) sont principalement responsables de la consolidation. Ces réactions sont plus ou moins lentes, et sont fonction de divers facteurs comme la minéralogie, la granulométrie du sol traité, ainsi que le temps et la température de curage.

#### **3.3.3.2. Stabilisation au ciment**

La principale réaction dans un mélange sol-ciment provient de l'hydratation des deux silicates anhydres de calcium,  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (C3S) et  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (C2S), constituants majeurs du ciment, qui forment deux nouveaux composés : l'hydroxyde de calcium (chaux hydratée appelée Portlandite) et le silicate de calcium hydraté (CSH) principal agent liant du béton.

Contrairement à la chaux, la minéralogie et la granulométrie des sols traités au ciment influencent peu les réactions puisque la poudre de ciment contient en elle-même tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires. Le ciment va créer des liens physiques entre les particules augmentant ainsi la résistance des sols comparativement à la chaux qui a besoin de silice et d'alumine provenant des particules argileuses pour développer les réactions pouzzolaniques.

Le ciment procure en effet plusieurs avantages importants à certaines terres, lorsqu'il est mélangé à celles-ci d'une façon intime et en quantité adéquate. Il a trois effets favorables pour

les briques à savoir l'augmentation de la résistance à la compression, l'augmentation des résistances à l'érosion et à l'usure et la diminution des variations dimensionnelles.

Il est cependant à noter que toutes les terres ne peuvent pas être stabilisées au ciment. Le sol doit remplir les conditions suivantes :

- ne pas contenir de la matière organique qui est nocive au ciment ;
- ne pas contenir des sulfates qui détruisent le ciment portland même durci.

Pour ce dernier type de sol, il faut utiliser un ciment spécial. En fait, certains sols sont naturellement sulfatés (gypse)

### **3.3.4. La stabilisation par cuisson**

Les briques de terre cuite sont issues d'un mélange de terre, de l'eau et de certains agrégats pour certains modèles isolants, le tout cuit à hautes températures (environ 800°C) dans les fours. La brique de terre stabilisée par cuisson est un matériau qui permet d'évacuer efficacement l'humidité vers l'extérieur. Ces briques sont plus onéreuses que celles faites à base de la terre crue stabilisée au ciment du fait de la quantité importante d'énergie nécessaire à la cuisson. En dépit de ses propriétés mécaniques intéressantes et de sa maîtrise de l'hygrométrie, les briques de terre cuite doivent être mises en l'écart des matériaux locaux et écologiques à promouvoir du fait de son énergie grise très importante.

### **3.4. Propriétés physiques des matériaux à base de la terre**

Les caractéristiques physiques d'un matériau poreux sont liées à la structure de sa porosité et celle-ci permet d'évaluer également le comportement hygrothermique (pouvoir absorbant, isolation thermique, etc.) et mécanique (résistance de traction, compression, déformation sous la contrainte, etc.).

Lawane et al. (2011) ont déterminé par la méthode usuelle de pesée aux différents états le poids volumique sec et saturé des échantillons de la carrière de Dano au Burkina Faso. Ils ont trouvé 20,60 et 20,60  $kN.m^{-3}$  respectivement pour l'état sec et l'état saturé. La teneur en eau à l'état saturé est de l'ordre de 10%. Le poids spécifique est de 32  $kN.m^{-3}$ . A partir de ces grandeurs, ils ont estimé la valeur de la porosité à 30%, indiquant une porosité occluse importante.

Bal et al. (2012) ont mesuré la porosité des briques de terre stabilisée contenant différent taux de gousse de mille à l'aide d'un pycnomètre. Une pression de compactage de  $10^5 Pa$  a été utilisée pour la confection des échantillons. Leurs résultats montrent que la porosité varie de 0.291 à 0.525 lorsque la teneur en déchet de mille varie de 0 à 12,2%.

Kerali (2001) a mesuré la porosité des briques de terre stabilisées pour différent taux de ciment. Les résultats sont donnés par la Figure 1.21. Les résultats ont montré, entre autres, que les porosités des différents échantillons diminuent avec la teneur en ciment ou en chaux.

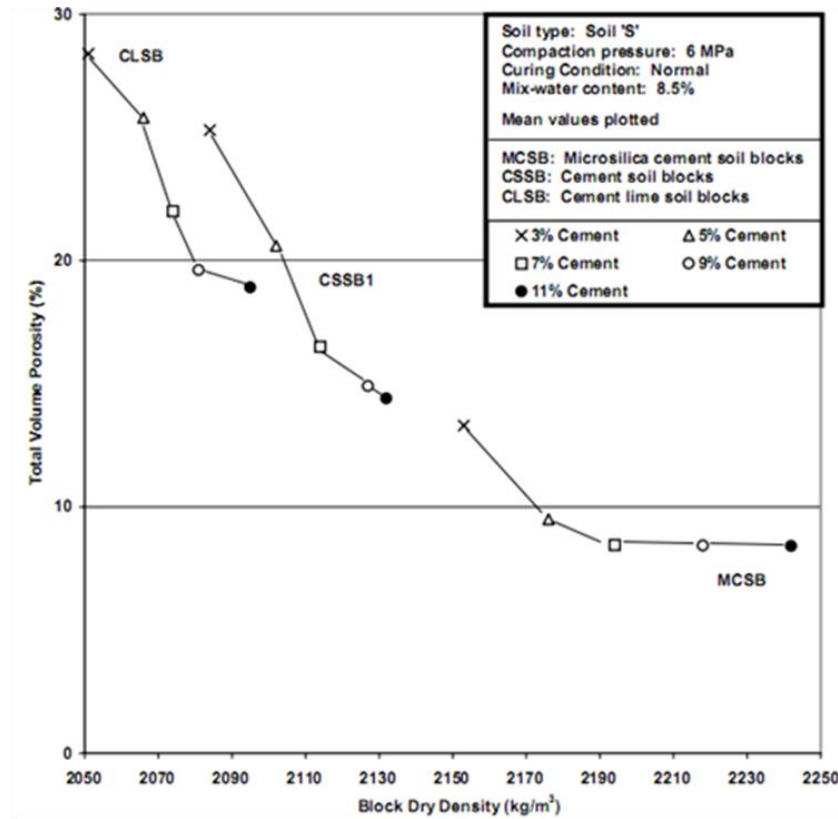


Figure 1.21: Porosité des briques de terre compressée et stabilisée (BTS) en fonction de la masse volumique sèche (Kerali, 2001).

### 3.5. Propriétés mécaniques des matériaux à base de terre

Les propriétés mécaniques d'un matériau décrivent sa réponse aux charges appliquées. Dans la construction, les matériaux à base de terre sont généralement utilisés comme éléments préfabriqués ayant un rôle structurel ou porteur. De ce fait, l'étude de leurs propriétés mécaniques est nécessaire et a fait l'objet de quelques travaux de recherche. Ces propriétés mécaniques sont la contrainte de rupture (en compression et en traction) du matériau, la déformation, le module d'Young et le coefficient de Poisson. Elles sont mesurées, pour le cas des matériaux à base de terre stabilisée au ciment, au 28<sup>ème</sup> jour puisqu'à cette date l'éprouvette atteint 95 % de ses propriétés finales.

Avant de présenter les propriétés de ces matériaux, il est nécessaire de rappeler les formules qui permettent de les calculer et de mieux comprendre leur sens physique. La contrainte de traction ou de compression exprimée en MPa est calculée selon l'équation ci-dessous.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [1.36]$$

où  $F$  et  $A$  sont respectivement l'intensité de la force appliquée (N) et la section de l'échantillon ( $\text{mm}^2$ ). La contrainte maximale que l'éprouvette peut supporter avant la rupture s'appelle la contrainte de rupture ou bien la résistance de compression ou traction.

En ce qui concerne le module d'Young ( $E$ ), il est calculé à partir de la déformation et de la contrainte selon la loi de Hooke qui n'a considéré que la phase élastique et linéaire, donc proportionnelle et réversible :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [1.37]$$

où la déformation  $\varepsilon$  est calculée en divisant l'allongement par la longueur initiale.

Le nombre de Poisson dont le calcul est illustré dans la Figure 1.22 caractérisant la contraction perpendiculaire à la direction de l'effort appliqué est calculé selon la formule :

$$\nu = \frac{(l_0 - l)/l_0}{(L - L_0)/L_0} \quad [1.38]$$

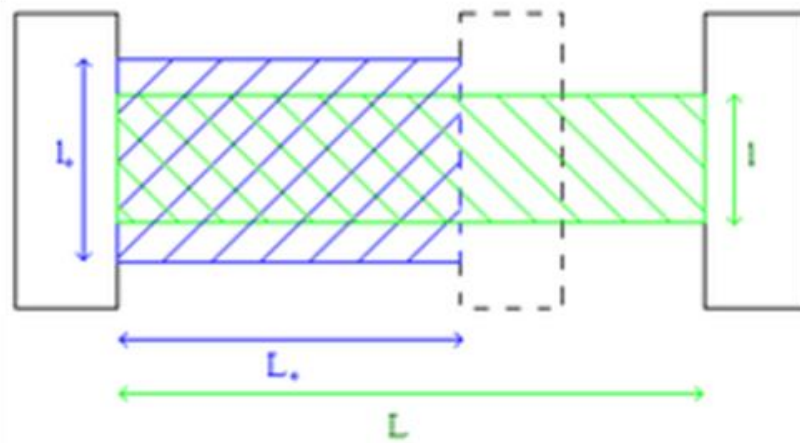


Figure 1.22: Illustration du calcul du coefficient de Poisson.

Il faut noter que la plupart d'auteurs, dans le cas des matériaux à base de la terre crue, n'ont mesuré que la résistance de compression. Le Tableau 1.4 donne les caractéristiques mécaniques de quelques-uns de ces matériaux.

Tableau 1.4: Propriétés mécaniques de quelques matériaux à base de la terre crue.

Matériau (auteur)	Composition	Masse volumique $\rho(kg.m^{-3})$	Teneur en eau (%)	Contrainte de compression ( $N/mm^2$ )	Module de Young ( $N/mm^2$ )
Brique de terre stabilisée (Aguwa, 2010)	- 94% latérite - 6% ciment	1935	9,78	3,22	-
Brique de brique de terre stabilisée (Meukam, 2004)	- 92% latérite - 8% ciment	1755	-	2,35	-

Brique de brique de terre stabilisée et allégée (Meukam, 2004)	- 92% latérite et sciure de bois - 8% ciment	1118	-	2,61	-
Brique de terre compactée (Ahmad et al., 2011)	- 69,6% sable - 32,9 % limon - 3,77 % argile - 1,2% gravier	1602,3	18,8	7,5	-
BTC (Bui, 2008)	Terre naturelle	1900-1930	1,8-3,2	0,84-1,15	-
Bloc de latérite (Lawane et al. 2011)	100% latérite	2060	0	7,14	289
		-	5,9-7,1	3,56	250
		240	12	3,12	178

### 3.6. Conductivité thermique des matériaux à base de la terre

Les valeurs des conductivités thermiques de quelques matériaux à base de la terre trouvées dans la littérature sont présentées ci-après.

Tableau 1.5: Conductivité thermique de quelques matériaux à base de la terre.

Référence	Terre	Technique	Teneur en eau %	Masse volumique $\rho(kg/m^3)$	Conductivité thermique $\lambda (W/m.K)$
Boussaid, 2001	Pisé	Méthode des boîtes	0%	1276-1879	0,3-0,93
Goodhew, 2000	Bauge	fil chaud	Ambiant	1230-1800	0,37-0,55
Goodhew, 2005	adobe	fil chaud	Ambiant	800	0,24
Meukam, 2004	BTS	Méthode des boîtes	3,34-3,45	1930-2070	0,87-1,03
Meukam, 2004	BTSS	Méthode des boîtes	3,25-3,76	1220-1274	0,36-0,46
Meukam, 2004	BTSP	Méthode des boîtes	2,38-2,71	1734-1777	0,46-0,56
El Fgaier et al., 2015	Adobe		Ambiant	1788	0,9
Cagnon et al., 2014	BTC	Plaque chaude gardée	Ambiant	1890-2060	0,47-0,59
Liuzzi et al., 2013	BTC non stabilisée		Ambiant	1989-2046	0,97-1,20
	BTS (5% chaux)		Ambiant	1829-1863	0,74-0,88

Les résultats obtenus par certains auteurs montrent clairement que la conductivité thermique augmente avec la teneur en eau. Ce qui est un résultat classique dans les matériaux poreux. Cette augmentation de la conductivité thermique avec l'augmentation du degré de saturation du matériau s'explique simplement car l'eau remplace l'air à l'intérieur des pores accessibles. Avec une conductivité thermique de l'ordre de  $3.10^{-2} W. m^{-1}. K^{-1}$ , l'air est un bon isolant par comparaison à l'eau.

L'ajout d'agrégats a pour effet de réduire la masse volumique et par conséquent la conductivité thermique des briques. La conductivité thermique augmente avec le taux de ciment (Ezbakhe et al., 2001 ; Meukam, 2004).

### 3.7. Chaleur spécifique

L'équation calorimétrique classique,  $Q = mc_p(T_2 - T_1)$ , montre que la quantité de chaleur absorbée par un corps de masse  $m$  quand sa température augmente de  $T_1$  à  $T_2$  est proportionnelle à la chaleur massique  $c_p$  du matériau considéré. Il s'agit de la quantité de chaleur que l'unité de masse du matériau considéré doit absorber pour que sa température s'élève d'un degré.

Tableau 1.6: Chaleurs spécifiques de quelques échantillons de BTC.

Désignation des échantillons	Masse volumique ( $kg. m^{-3}$ )	Teneur en eau (%)	Chaleurs spécifiques ( $J. kg^{-1}. K^{-1}$ )	
			Sèche	Humide
Latérite (Meukam, 2004)	1930-2070	3,34-3,45	900-1100	1010-1200*
Latérite+sciure de bois (Meukam, 2004)	1220-1274	3,25-3,76	820-910	920-1030*
Latérite + pouzzolane (Meukam, 2004)	1734-1777	2,38-2,71	0,91-0,95	1000-1040*
Terre battue (El Fgaier et al., 2015)	1788	-	-	545
BTC (Cagnon et al.,2014)	1890-2060	-	-	900-960* 950-1030**

\*méthode calorimétrique ; \*\*DEsProTherm

La détermination de la chaleur spécifique des matériaux à base de la terre a été faite par plusieurs auteurs. Les résultats de certains de ces travaux sont consignés dans le Tableau 1.6.

Le produit de masse volumique et de la chaleur spécifique ( $\rho c_p$ ) est appelé capacité thermique volumique. Bal et al. (2012) ont mesuré le  $\rho c_p$  des briques de terre compressées avec incorporation des déchets de mille. La Figure 1.23 présente quelques-uns de leurs résultats.

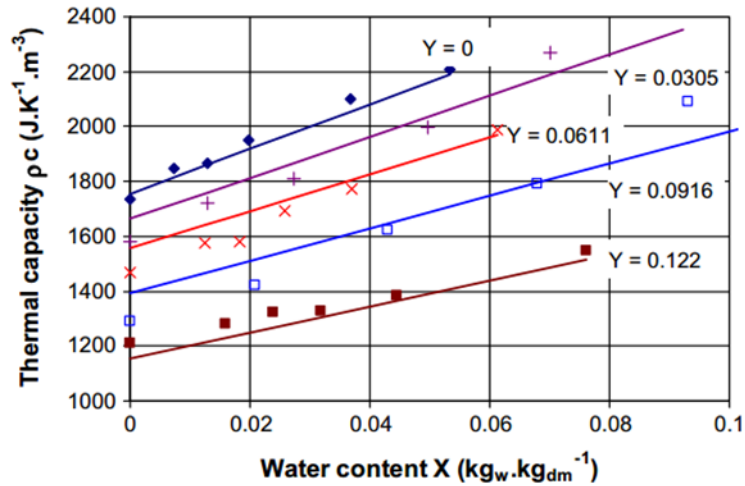


Figure 1.23: Capacités thermiques volumique des briques de terre compressées (Bal et al. 2012).

### 3.8. Effusivité et diffusivité thermique

La diffusivité thermique d'un matériau caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction en son sein. Elle est fonction de la conductivité thermique et de la capacité thermique du matériau et s'exprime en mètres carré par seconde ( $m^2s^{-1}$ ). Plus la valeur de la diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur est arrivée sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est important ; c'est donc une grandeur de l'inertie thermique.

L'effusivité thermique indique la capacité des matériaux à absorber (ou restituer) plus ou moins rapidement un apport de chaleur. Elle caractérise la sensation de « chaud » ou de « froid » que donne un matériau. Si la valeur de l'effusivité thermique d'un matériau est élevée, ce dernier absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement en surface (métal, pierre, etc.). A l'inverse une valeur d'effusivité faible indique que le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur (isolant, bois, etc.). La valeur de l'effusivité thermique exprime combien de kilojoules ont pénétré sur  $1 m^2$  de surface de matériau, une seconde après qu'elle a été mise en contact avec une autre surface de  $1 m^2$  plus chaude qu'elle de  $1 ^\circ C$ . L'effusivité thermique  $E$  est lié à la diffusivité thermique par la relation :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c_p} = \lambda / \sqrt{a} \quad [1.39]$$

Bon nombre d'auteurs on déduit la diffusivité thermique ou l'effusivité thermique des matériaux à base de la terre à partir de la mesure d'autres paramètres. D'autres par contre ont mesuré directement la diffusivité thermique en utilisant la méthode flash et/ou l'effusivité thermique à partir de la méthode du plan chaud. Le Tableau 1.7 présente les diffusivités thermiques et les effusivités thermiques de quelques matériaux à base de la terre trouvées dans la littérature.



Tableau 1.7: Diffusivité et effusivité thermiques des matériaux à base de la terre.

Désignation de l'échantillon	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Effusivité thermique (S.I.)	Diffusivité thermique (10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)
Laterite (Meukam, 2004)	1930-2070	-	4,60-5,18* 3,82-4,87**
Laterite+pouzzolane (Meukam, 2004)	1734-1777	-	3,75-4,01* 3,71-3,85**
Laterite+sciure de bois (Meukam, 2004)	1220-1274	-	2,54-3,03* 4,26-4,92**
Brique de terre battue (El Fgaier et al., 2015 )	1788	936.49	9.23

\*par la méthode flash ; \*\*calculer à partir de la conductivité thermique

### 3.9. Isotherme d'adsorption –désorption

La courbe représentant, pour une température donnée, la teneur en eau d'un matériau en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant est appelée :

- isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un matériau sec ;
- isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un matériau saturé en eau.

Les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un matériau entraîne les modifications de structure et de porosité irréversibles.

Ces courbes sont essentielles puisqu'elles fournissent une véritable carte d'identité « hygro-structurale » du matériau poreux. La forme des courbes dépend de la géométrie et de la distribution des pores du matériau. Elles s'obtiennent en imposant une humidité relative donnée et un contrôle de masse journalier permet de suivre la variation de la masse de l'échantillon et donc la quantité d'eau absorbée par le matériau sec sous une humidité relative (HR) fixée (pour ce qui est de l'isotherme de sorption).

Les travaux de Meukam (2004) sur les BTS ont conduit à l'établissement des isothermes de sorption de trois matériaux de construction (latérite, latérite+sciure, latérite+pouzzolane). Les résultats sont consignés dans la Figure 1.24. Il ressort de ces travaux que l'ajout de la sciure de bois a pour effet d'augmenter la capacité d'adsorption de la vapeur d'eau des BTS alors que l'ajout de la pouzzolane naturelle a un effet inverse.

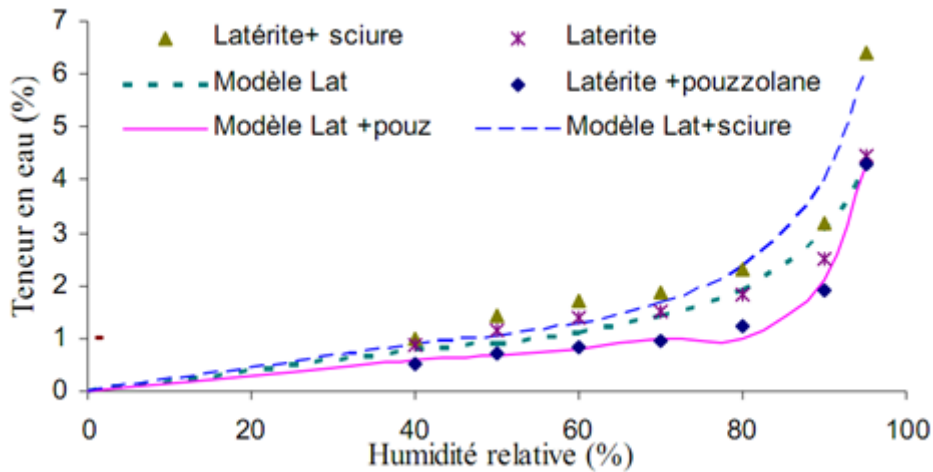


Figure 1.24: Courbe de sorption de blocs de : latérite, latérite+sciure de bois et latérite+pouzzolane (Meukam, 2004).

Dans le cadre du projet TERCRUSO, avril 2013, les courbes d'adsorption et de désorption des briques de terre crue de Midi-Pyrénées, région administrative du sud-ouest de la France, ont été mesurées. Plusieurs briques en terre crue aux propriétés physiques différentes ont été étudiées. Les courbes de sorption-désorption de deux des échantillons étudiés, obtenues par la méthode DVS (Dynamic Vapour Sorption) et de celle des solutions salines saturées sont données à la Figure 1.25.

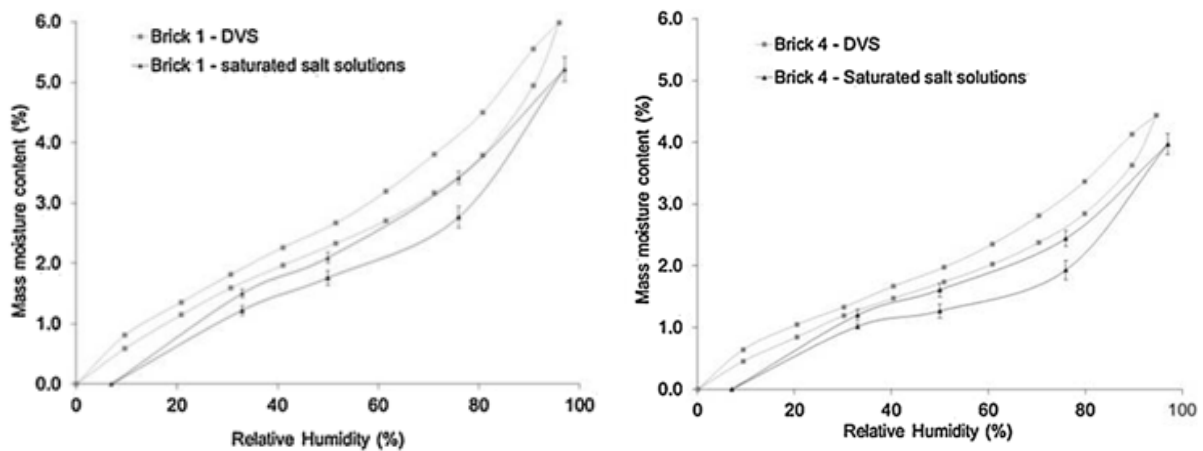


Figure 1.25: Courbes d'adsorption et désorption de deux types de briques de terre crue étudiées dans le projet TERCRUSO, avril 2013 (Cagnon et al., 2014).

### 3.10. Perméabilité à la vapeur d'eau

La « coupelle » est l'une des méthodes permettant de mesurer la perméabilité à la vapeur des échantillons qui consiste à placer un échantillon d'épaisseur  $e$  sous un gradient de vapeur constant et unidimensionnel en condition isotherme (Figure 1.26). La connaissance du flux de vapeur traversant le matériau, déterminé à partir de la pesée de l'ensemble coupelle-échantillon, permet de calculer la perméabilité à la vapeur selon la formule ci-dessous (dans le cas où on

suppose qu'on a un mélange de gaz parfait de part et d'autre de la coupelle et en négligeant la résistance massique de la couche d'air entre la solution saline et la coupelle) :

$$\pi = e \frac{q_v}{P_{v2} - P_{v1}} = e \frac{q_v}{\Delta P_v} \quad [1.40]$$

avec  $\pi$  la perméabilité à la vapeur ;  $e$  l'épaisseur de l'échantillon ;  $P_v$  la pression de la vapeur et  $q_v$  la densité de flux de vapeur.

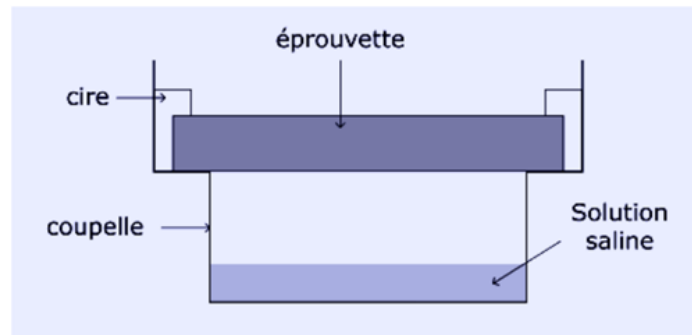


Figure 1.26: Mesure de la perméabilité par la méthode de la coupelle (Piot, 2009).

A partir de la diffusivité hydrique d'un matériau et de sa courbe de sorption ( $u = f(HR)$ ), on peut aussi déterminer sa perméabilité à la vapeur via la relation ci-dessous.

$$\delta = \frac{D_m \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \Phi}}{P_{sv}} \quad [1.41]$$

où :

$D_m$  est la diffusivité hydrique ;

$\rho_0$  est la masse volumique du matériau sec ;

$P_{sv}$  est la pression saturante à la température du matériau ;

$\frac{\partial u}{\partial \Phi}$  est la tangente de l'isotherme de sorption du matériau.

Les perméabilités à la vapeur et les facteurs de résistance à la vapeur de quelques matériaux à base de terre crue trouvés dans la littérature sont donnés ci-après :

- Utz (2004) a fait des mesures sur la terre de type loess de Lintong (Chine) : les valeurs de  $\mu$  sont comprises entre 5 et 8. Après traitement de la terre pour la rendre moins perméable, il a obtenu des valeurs de  $\mu$  entre 9 et 18. Il a également fait des mesures sur la terre-paille ; les valeurs de  $\mu$  entre 2 et 3 ont été obtenues ;
- Avec la bauge stabilisée à la chaux, Collet (2004) a obtenu une valeur de  $\mu$  égale à 13,3 entre 0 et 50% HR, et à 11,8 entre 0 et 85% HR ;
- Meukam (2004) a mesuré la perméabilité à la vapeur d'eau de trois types de brique à savoir : la brique de terre stabilisée (BTS), la brique de terre stabilisée avec

incorporation de pouzzolane naturelle (BTSP) et la brique stabilisée avec incorporation de sciure de bois (BTSS). Il a obtenu une valeur de  $0,07g.m^{-1}h^{-1}mmHg^{-1}$  pour les trois types de brique ;

- Dans le cadre du projet ACSCNI, le CSTB a caractérisé deux enduits et deux torchis terre-paille. Les valeurs des masses volumiques de matériaux étudiés sont entre 1220 et  $1590 kg.m^{-3}$ . Les valeurs de la perméabilité à la vapeur sont comprises entre 2,1 et  $3,3.10^{-11}kg.m^{-1}s^{-1}Pa^{-1}$ , et le facteur  $\mu$  entre 6 et 9,5. La masse volumique ne semble pas gouverner la perméabilité de la terre (CSTB, 2007 cité par Moevus et al.,2012) ;
- Liuzzi et al. (2013) ont étudié l'influence de la chaux (comme stabilisant) sur la perméabilité et la résistance à la vapeur des briques de terre crue. Leurs résultats sont consignés dans le Tableau 1.8.

Tableau 1.8: Influence de la stabilisation à la chaux sur la perméabilité à la vapeur des briques de terre (Liuzzi et al., 2013).

Echantillon	$\rho (kg.m^{-1})$	$\delta$ $(kg.m^{-1}s^{-1}Pa^{-1}) \times 10^{-11}$	$\mu$
Brique de terre non stabilisée	1989-2046	1,70-2,20	8,80-11,10
Brique de terre+5% de chaux	1829-1863	2,05-2,41	8,10-9,40

- Dans le cadre du projet TERCRUSO (Cagnon et al., 2014), la perméabilité à la vapeur d'eau et le facteur de résistance de 5 échantillons de terre crue, aux propriétés différentes, ont été mesurée. Pour les essais à la coupelle sèche, les facteurs de résistance à la vapeur d'eau  $\mu$  se situent entre 7 et 19 tandis que les perméabilités à la vapeur  $\delta$  des ces briques se trouvent entre  $10^{-11}$  et  $2,7.10^{-11}kg.m^{-1}s^{-1}Pa^{-1}$ . Les essais à la coupelle humide fournissent les valeurs de  $\mu$  entre 3 et 7 et les valeurs de  $\delta$  entre  $2,7.10^{-11}$  et  $6,2.10^{-11}kg.m^{-1}s^{-1}Pa^{-1}$ .

La perméabilité à la vapeur d'eau pour l'essai à la coupelle humide est plus grande que celle obtenue pour la coupelle sèche. En effet, quand le matériau contient suffisamment d'eau (domaine de la zone capillaire), le phénomène de condensation/évaporation est à l'origine de l'accélération du déplacement de la vapeur d'eau à travers le matériau. Le facteur de résistance est donc diminué.

## Conclusion

Dans ce premier chapitre, l'état des lieux sur le mode de logement des habitants au Cameroun a été présenté. Il a été constaté, comme d'autres auteurs, que les maisons traditionnelles étaient construites de manière à tirer le meilleur profit des conditions climatiques locales. Les maisons modernes quant à elles sont construites principalement en matériaux dits conventionnels (qui bénéficient d'une production en masse) et selon les standards internationaux délaissant les techniques passives de réduction de la consommation d'énergie, de l'amélioration passive du

confort thermique et de la protection de l'environnement. La synthèse bibliographique sur les propriétés mécaniques, thermophysiques et hygroscopiques des matériaux à base de la terre a permis de constater qu'en plus de faire partie des matériaux écologiques, certains (tels que les briques de terre incorporant de la pouzzolane) sont utilisables comme matériaux d'isolation thermique de bâtiments du fait de leur conductivité thermique relativement faible. Dans le souci de promouvoir des matériaux locaux plus performants en isolation thermique et plus respectueux de l'environnement, nous allons dans le chapitre suivant, étudier l'influence de la granularité et de la teneur en pouzzolane noire dans les briques de terre compressées et stabilisées au ciment sur leurs propriétés thermophysiques. Les propriétés thermophysiques du parpaing de pouzzolane seront également mesurées et comparées à celles d'un matériau conventionnel, le parpaing de sable.

## Chapitre 2 Caractérisation thermophysique

### Introduction

Dans le but de valoriser les matériaux locaux de construction, Meukam (2004) a incorporé 45% de pouzzolane (de fraction granulaire 0/12,5) dans les blocs de latérite stabilisée au ciment dans l'optique d'améliorer leurs propriétés isolantes. D'amples informations sur les impacts du taux et de la granularité de la pouzzolane sur les propriétés thermophysiques des briques contribueraient à leur promotion. Dans ce chapitre, une revue générale des différentes méthodes de mesure des propriétés thermophysiques des matériaux solides est présentée. Une description approfondie des méthodes du plan chaud asymétrique complète, du ruban chaud symétrique et du plan chaud symétrique qui ont été utilisées pour la mesure des propriétés thermophysiques est faite. Une description du matériel et des méthodes utilisés pour la confection des échantillons est aussi présentée dans ce chapitre. Les capacités thermiques volumiques, les effusivités thermiques et les conductivités thermiques des échantillons de matériaux obtenus par mélange de latérite et de pouzzolane sont présentées et analysées.

### 1. Méthodes de mesure des propriétés thermophysiques

La conductivité thermique, la chaleur massique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique sont des paramètres thermophysiques importants dans l'étude des transferts de chaleur dans les matériaux. Plusieurs techniques différentes, classées en deux catégories (méthodes en régime permanent et en régime transitoire) ont été développées pour la détermination de ces paramètres. Nous présenterons dans cette section celles qui nous ont permis de mener la caractérisation.

#### 1.1. Méthode du fil chaud

La méthode du fil chaud qui a été suggérée théoriquement en 1888 par Schleiermacher cité par Takegoshi (1982) est une méthode en régime transitoire généralement utilisée pour la caractérisation des matériaux de faible conductivité thermique (André, 2003).

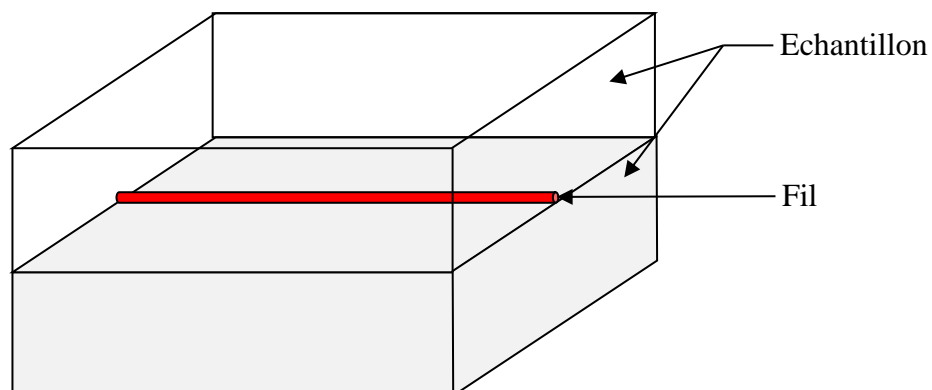


Figure 2.1: Schéma de principe de la méthode du fil chaud.

Le principe consiste à appliquer un échelon de flux de chaleur constant ( $\varphi = 0$  si  $t < 0$  et  $\varphi = \varphi_0$  si  $t \geq 0$ ) à un fil placé entre deux échantillons du matériau à caractériser. Un thermocouple permet de mesurer l'évolution de la température du fil lorsque l'hypothèse du milieu semi-infini reste vérifiée (lorsque la perturbation n'a pas encore atteint l'une des extrémités de l'échantillon). Les dimensions du fil par rapport à celles de l'échantillon sont telles qu'on puisse considérer que le transfert de chaleur autour du fil est radial.

Une approximation au temps longs, dans le domaine de validité de l'hypothèse du milieu semi-infini, permet d'écrire :

$$T_0(t) - T_0(0) = \frac{\varphi_0}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \varphi_0 \left[ R_c - \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} - \frac{\ln(r_0/\sqrt{a})}{2\pi\lambda L} \right] \quad [2.1]$$

avec  $\gamma = 0,57721$  la constante d'Euler ;  $R_c$  la résistance de contact entre le fil et l'échantillon ;  $r_0$  le rayon du fil et  $\lambda$  la conductivité thermique de l'échantillon.

Le tracé de  $T_0(t) - T_0(0)$  en fonction de  $\ln(t)$  donne une droite de pente  $\alpha = \frac{\varphi_0}{4\pi\lambda L}$ . On en déduit donc la valeur de la conductivité thermique de l'échantillon.

## 1.2. Méthode du ruban chaud

Cette méthode qui a été développée au laboratoire de TREFLE (Jannot et al., 2004) permet de mesurer la conductivité et l'effusivité thermique des matériaux à partir d'un même thermogramme.

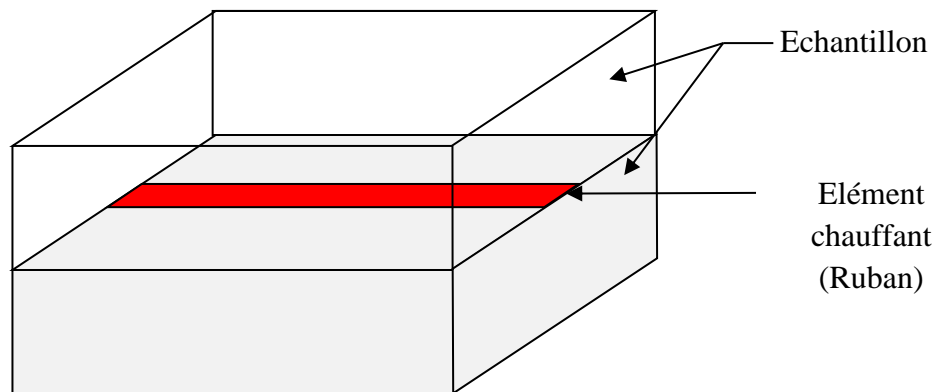


Figure 2.2: Schéma de principe de la mesure simultanée de la conductivité et de l'effusivité.

Le principe consiste à placer un ruban chaud de forme rectangulaire au centre duquel se trouve un thermocouple entre deux échantillons du matériau à caractériser. Les dimensions du ruban sont telles que, dans les limites de l'hypothèse du milieu semi-infini, le transfert de chaleur dans le système soit radial (longueur du ruban au moins trois fois supérieure à sa largeur).

Les variations de l'élévation de température au centre du ruban sont données par la relation ci-dessous.

$$T_s(0,0,t) - T_s(0,0,0) = \tilde{T}_s(0,0,t) = \frac{\ln(2)}{t} \sum_{j=1}^N V_j \theta_s(0,0, \frac{j \ln(2)}{t}) \quad [2.2]$$

avec

$$\theta_s(0,0,p) = \frac{1}{L} \theta_{CS}(0,0,p) + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \theta_{CS}(n,0,p) \quad [2.3]$$

et

$$\theta_{CS}(n,0,p) = \frac{1 + \lambda S R_c q_n}{m_s C_s p (1 + \lambda S R_c q_n) + \lambda S q_n} \frac{\sin(\alpha_n b)}{\alpha_n} \frac{\varphi}{p} \quad [2.4]$$

avec  $\alpha_n = \frac{n\pi}{L}$  et  $q_n = \sqrt{p/a + n^2\pi^2/L^2}$ ,

où :

- $m_s$  est la moitié de la masse du ruban (kg),
- $C_s$  est sa capacité thermique (J.K<sup>-1</sup>kg<sup>-1</sup>),
- $S$  est sa surface (m<sup>2</sup>),
- $R_c$  est la résistance de contact entre le ruban et l'échantillon,
- $\varphi$  est la puissance délivrée par l'élément chauffant,
- $p$  est la variable de Laplace.

Pour estimer les paramètres thermophysiques à partir de cette méthode, on donne les valeurs initiales aux paramètres  $E$ ,  $m_s$  et  $R_c$ . On utilise ensuite l'algorithme de Newton pour estimer les valeurs de  $E$ ,  $m_s$  et  $R_c$  qui minimisent la somme des écarts quadratiques entre les valeurs théoriques de  $\tilde{T}_s(0,0,t)$  (obtenue à partir du modèle du plan chaud symétrique en supposant les échantillons comme des milieux semi-infinis : voir paragraphe suivant) et ses valeurs expérimentales dans l'intervalle de temps  $[0-t_1]$  avec  $t_1$  le temps pendant lequel la sensibilité de  $\lambda$  à l'élévation de température  $\tilde{T}_s(t)$  reste nulle. Une valeur initiale est ensuite donnée à la conductivité thermique  $\lambda$ . Comme précédemment, l'algorithme de Newton est utilisé pour estimer la valeur de  $\lambda$  qui minimise les écarts entre les valeurs théoriques  $\tilde{T}_s(0,0,t)$  (obtenues à partir du modèle complet du ruban chaud) et la courbe expérimentale entre  $t_1$  et  $t_2$  où les valeurs des paramètres  $E$ ,  $m_s$  et  $R_c$  estimés précédemment sont prises comme paramètres d'entrée.



### 1.3. Mesure de la conductivité des matériaux isolants à partir d'un dispositif de trois couches circulaires

Cette méthode de mesure de la conductivité thermique des matériaux isolant a été proposée par Jannot et al. (2009) pour palier à bon nombre de difficultés posées par la méthode flash. Le dispositif expérimental est constitué d'un échantillon de forme circulaire du matériau à caractériser inséré entre deux disques en cuivre de faible épaisseur (0,4 mm par exemple) et de même rayon que l'échantillon. Deux thermocouples sont fixés (à 5 mm l'un de l'autre) sur la face externe de chaque disque. Entre le disque inférieur et un matériau isolant est placé un élément chauffant de forme circulaire et de même diamètre que le disque. Une pression est exercée sur la face externe du disque supérieur au moyen de quatre lamelles (dans l'optique de réduire la surface de contact) de PVC (choisi pour sa conductivité thermique relativement faible). La face externe de ce disque (supérieur) échange de l'énergie par convection naturelle et par rayonnement avec le milieu ambiant.

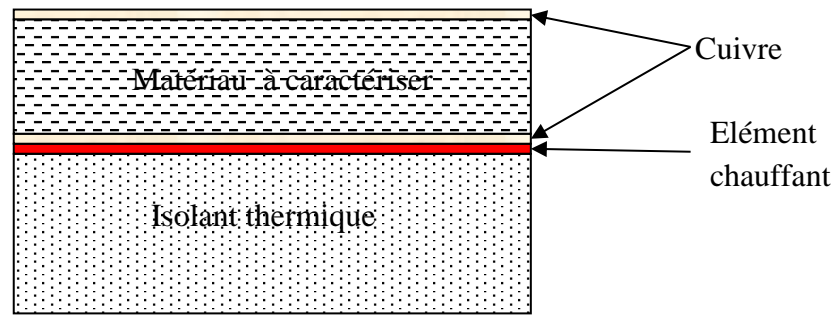


Figure 2.3: Dispositif de la méthode de trois couches circulaires.

Un flux de chaleur est fourni par l'élément chauffant durant quelques secondes et l'enregistrement des températures des deux disques est effectué. La résolution des équations régissant le transfert de chaleur dans le dispositif permet de déterminer, dans l'espace de Laplace, respectivement les températures  $\theta(e, p)$  et  $\theta(0, p)$  des disques supérieur et inférieur. La fonction de transfert  $H(p)$  du système s'écrit alors :

$$H(p) = \frac{\theta(e, p)}{\theta(0, p)} \text{ ou } T(e, t) = T(0, t) \otimes L^{-1}[H(p)] \quad [2.5]$$

où  $T(e, t)$  et  $T(0, t)$  sont respectivement les températures des disques supérieur et inférieur et  $L^{-1}[H(p)]$  l'inverse de Laplace de la fonction de transfert.

Le principe de la méthode est d'estimer la fonction de transfert en cherchant les valeurs des paramètres  $a$  (diffusivité thermique),  $\lambda$  (conductivité thermique) et  $h$  (coefficient de transfert convectif sur les faces externes) qui minimisent la somme des écarts quadratiques entre les valeurs expérimentales de  $T(e, t)$  et celles calculées à partir de la relation ci-dessus et les valeurs expérimentales de  $T(0, t)$  :

- Les mesures des températures se font avec une bonne précision puisqu'elles sont réalisées sur des matériaux excellents conducteurs de chaleur (cuivre dans le cas d'espèce) ;
- La capacité thermique volumique du cuivre est connue avec une bonne précision et prise en compte dans cette méthode ;
- Le transfert de chaleur dans le sens longitudinal est pris en compte dans les disques sans approximation.

#### 1.4. Méthodes du plan chaud symétriques

De façon générale, on place une résistance chauffante plane de faible épaisseur entre deux échantillons du matériau à caractériser. On applique un échelon de chaleur constant à la résistance chauffante et on mesure à l'aide d'un thermocouple l'évolution de température  $T_0(t)$  au centre de la même résistance chauffante. On peut également relever la température  $T_2(t)$  de la face non chauffée d'un échantillon sur laquelle on aura placé un thermocouple (dans les cas où l'échantillon n'est pas semi-infini). La modélisation du transfert de chaleur dans le dispositif permet de trouver les expressions théoriques de  $T_0(t)$  et  $T_2(t)$ . On applique ensuite une méthode d'estimation des paramètres pour calculer les valeurs de :

- l'effusivité thermique  $E$  et dans certains cas de la conductivité thermique  $\lambda$  du matériau à caractériser ;
- la capacitance thermique  $m_s c_s$  de l'ensemble sonde+résistance chauffante ;
- les résistances de contact  $Rc_1$  à l'interface sonde/échantillon et  $Rc_2$  à l'interface échantillon/matériau de propriétés thermophysiques connues, qui minimisent la somme des écarts quadratiques entre les points expérimentaux et les valeurs de température calculées.

On distingue plusieurs modèles de la méthode du plan chaud symétrique.

##### 1.4.1. Modèle avec échantillons finis et isolants semi-infinis

Le schéma de principe de cette configuration de la méthode du plan chaud est donné par la Figure 2.4.

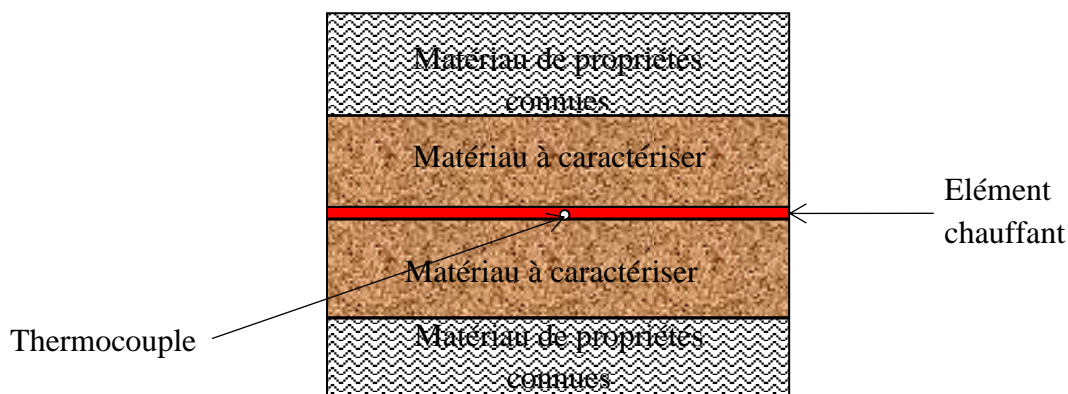


Figure 2.4: Schéma de principe de la méthode du plan chaud avec deux échantillons non semi-infinis.

La modélisation du transfert de chaleur à l'aide du formalisme des quadripôles permet d'écrire (Jannot et al., 2006) :

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \frac{\varphi_0}{2p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{m_s c_s}{2} p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_{c1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_{c2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_3 \\ E_i S \sqrt{p} \theta_3 \end{pmatrix} \quad [2.6]$$

$$\text{avec } \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(qe) & \frac{1}{\lambda q S} \sinh(qe) \\ \lambda q S \sinh(qe) & \cosh(qe) \end{pmatrix} \text{ avec } q = \sqrt{\frac{p}{a}}$$

où :

$\theta_0$  : Transformée de Laplace de la différence  $T_0(t) - T_0(0)$  au centre de la sonde ;

$\theta_3$  : Transformée de Laplace de la différence  $T_3(t) - T_3(0)$  ;

$m_s$  : Masse thermocouple + résistance chauffante ;

$c_s$  : Capacité calorifique thermocouple + résistance chauffante ;

$S$  : Surface de la résistance chauffante ;

$E$  : Effusivité thermique du matériau à caractériser ;

$R_{c1}$  : Résistance thermique de contact à l'interface résistance chauffante/matériau à caractériser ;

$R_{c2}$  : Résistance de contact à l'interface échantillon/matériau connu ;

$p$  : Variable de Laplace ;

$\varphi_0$  : Puissance dissipée dans la résistance chauffante ;

$a$  : Diffusivité du matériau à caractériser.

D'où

$$\theta_0(p) = \frac{\varphi_0 A_{03} + B_{03} E_i S \sqrt{p}}{2p C_{03} + D_{03} E_i S \sqrt{p}} \quad [2.7]$$

où :

$$A_{03} = (A + R_{c1} C),$$

$$B_{03} = (A + R_{c1} C) R_{c2} + (B + R_{c1} D),$$

$$C_{03} = \frac{m_s c_s}{2} p A + \left(1 + \frac{m_s c_s}{2} p R_{c1}\right) C,$$

$$D_{03} = \left[\frac{m_s c_s}{2} p A + \left(1 + \frac{m_s c_s}{2} p R_{c1}\right) C\right] R_{c2} + \frac{m_s c_s}{2} p B + \left(1 + \frac{m_s c_s}{2} p R_{c1}\right) S.$$

On peut aussi écrire le bilan entre la résistance chauffante et la face non chauffée de l'échantillon à la température  $T_2(t)$  du matériau à caractériser.

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \frac{\varphi_0}{2p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{m_s c_s}{2} p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_{c1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} \quad [2.8]$$

soit

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \frac{\varphi_0}{2p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{m_s c_s}{2} p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{02} & B_{02} \\ C_{02} & D_{02} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix}$$

avec :

$$A_{02} = A + R_{c1}C,$$

$$B_{02} = B + R_{c1}D,$$

$$C_{02} = \frac{m_s c_s}{p}A + \left(1 + \frac{m_s c_s}{2} p R_{c1}\right) C,$$

$$D_{02} = \frac{m_s c_s}{p}B + \left(1 + \frac{m_s c_s}{2} p R_{c1}\right) D.$$

On en déduit la valeur de la transformée de Laplace de la température de la face non chauffée.

$$\theta_2 = D_{02}\theta_0 - B_{02}\frac{\theta_0}{p} \quad [2.9]$$

Une inversion numérique des équations [2.7] et [2.9], utilisant la formule de Stehfest ou l'algorithme de De Hoog (De Hoog, 1982), permet de calculer les expressions théoriques de l'évolution de la température au centre de l'élément chauffant  $T_0(t)$  et sur la face arrière d'un échantillon.

L'expression de la transformée de Laplace de la température  $T_0(t)$  obtenue ci-dessus est très complexe et peut être simplifiée lorsque les échantillons sont supposés semi-infinis.

#### 1.4.2. Modèle avec deux échantillons supposés semi-infinis

Le schéma de principe de la méthode du plan chaud avec échantillons semi-infinis est donné par la Figure 2.5. Lorsque la durée de mesure est telle qu'on puisse faire l'hypothèse du milieu semi-infini pour le matériau à caractériser, l'équation [2.6] devient :

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \frac{\varphi_0}{2p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{m_s c_s}{2} p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_{c1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ ES\sqrt{p}\theta_1 \end{pmatrix} \quad [2.10]$$

D'où :

$$\theta_0 = \frac{\varphi_0}{2p} \frac{1 + R_{c1}ES\sqrt{p}}{\frac{m_s c_s}{2} p + (R_{c1} \frac{m_s c_s}{2} p + 1)ES\sqrt{p}} \quad [2.11]$$

Aux temps longs c'est-à-dire quand  $p$  tend vers zéro, l'équation ci-dessus devient :

$$\theta_0(p) = \frac{\varphi_0}{2ESp^{3/2}} + \frac{\varphi_0}{2p} \left( R_{c1} - \frac{m_s c_s}{2(ES)^2} \right) \quad [2.12]$$

L'inversion de Laplace de la formule précédente conduit à :

$$T_0(t) - T_0(0) = \frac{\varphi_0}{2} \left( R_{c1} - \frac{m_s c_s}{2(ES)^2} \right) + \frac{\varphi_0}{ES\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad [2.13]$$

Le tracé de  $T_0(t) - T_0(0)$  en fonction de  $\sqrt{t}$  est une droite affine de pente  $\alpha = \frac{\varphi_0}{ES\sqrt{\pi}}$  dont sa détermination permet de calculer la valeur de l'effusivité E.

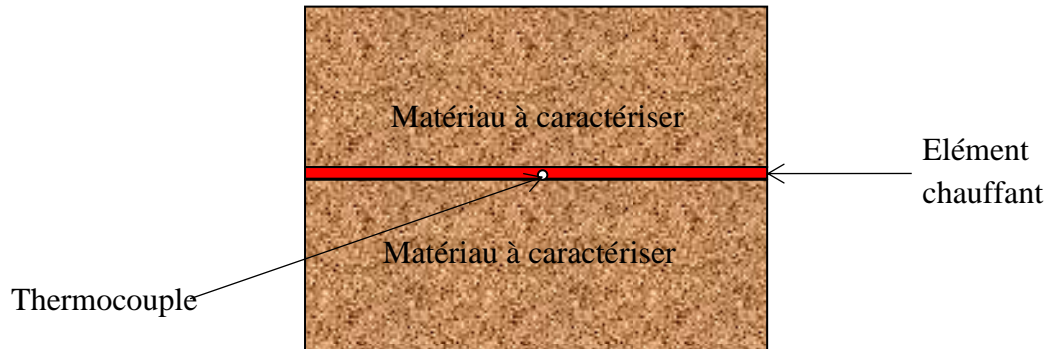


Figure 2.5: Schéma de principe de la méthode du plan chaud avec échantillons semi-infinis.

### 1.5. Méthodes du plan chaud asymétriques

Les méthodes du plan chaud comportant un seul échantillon où l'élément chauffant est placé entre un isolant (polystyrène par exemple) et le matériau à caractériser sont dites asymétriques. Elles permettent d'assurer un meilleur contact entre l'échantillon et l'élément chauffant en plaçant le thermocouple sur la face en contact avec l'isolant. Ce dernier étant déformable, la présence du thermocouple ne modifie pas de façon significative la résistance de contact. On distingue plusieurs configurations de la méthode du plan chaud asymétrique.

#### 1.5.1. Modèle avec un échantillon semi-infini

Le schéma de principe cette méthode est donné par la Figure 2.6.



Figure 2.6: Schéma de principe de la méthode du plan chaud avec un échantillon semi-infini.

Lorsque les pertes de chaleur sur les faces latérales de l'échantillon sont négligées et l'élément chauffant suffisamment mince, le formalisme quadripolaire permet d'écrire les équations [2.14], [2.15] et [2.16].

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \phi_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ m_s c_s p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_{c1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ ES\sqrt{p}\theta \end{pmatrix} \quad [2.14]$$

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \phi_{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{c2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_i \\ E_i S \sqrt{p} \theta_i \end{pmatrix} \quad [2.15]$$

$$\frac{\varphi_0}{p} = \phi_{01} + \phi_{02} \quad [2.16]$$

D'où :

$$\theta_0 = \frac{\varphi_0}{p} \frac{1}{\frac{m_s c_s p + (1 + R_{c1} m_s c_s p) ES \sqrt{p}}{1 + R_{c1} ES \sqrt{p}} + \frac{E_i S \sqrt{p}}{1 + R_{c2} E_i S \sqrt{p}}} \quad [2.17]$$

En négligeant la résistance de contact à l'interface élément chauffant/polystyrène, on peut écrire :

$$\theta = \frac{\phi_0}{p} \frac{1}{\frac{C_s p + (1 + R_c C_s p) E \sqrt{p}}{1 + R_c E \sqrt{p}} + E_i \sqrt{p}} \quad [2.18]$$

Aux temps relativement longs c'est-à-dire quand  $p$  tend vers zéro, le développement limité de l'équation [2.39] conduit à l'équation suivante.

$$\theta(p) \approx \frac{\phi_0}{(E + E_i) p^{3/2}} + \frac{\phi_0 (R_c E^2 - C_s)}{p (E + E_i)^2} \quad [2.19]$$

L'inversion de Laplace de la formule précédente conduit à :

$$T_0(t) - T_0(0) = \phi_0 \left( \frac{R_c E^2 - C_s}{(E + E_i)^2} \right) + \frac{2\phi_0}{(E + E_i)\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad [2.20]$$

Le graphe  $T_0(t) - T_0(0) = f(\sqrt{t})$  est une droite de pente  $\alpha = \frac{2\phi_0}{(E + E_i)\sqrt{\pi}}$  dont sa détermination permet de calculer la valeur de l'effusivité  $E$  via la relation ci-dessous.

$$E = \frac{2\phi_0}{\alpha\sqrt{\pi}} - E_i \quad [2.21]$$

D'après Ladevie cité par Jannot et al. (2006), lorsque l'hypothèse selon laquelle la température est uniforme sur tous les plans parallèles au plan de front de l'élément chauffant est vérifiée, les pertes de chaleur latérales peuvent être prises en compte en remplaçant dans les équations précédentes la variable de Laplace  $p$  par :

$$p + \frac{haP_e}{\lambda S} \quad [2.22]$$

où  $P_e$  est le périmètre de l'échantillon ( $m$ ),  $h$  le coefficient de convection sur la surface latérale,  $\lambda$  la conductivité thermique de l'échantillon,  $a$  la diffusivité thermique de l'échantillon et  $S$  la surface de l'élément chauffant ( $m^2$ ).

### 1.5.2. Modèle avec échantillon et isolants non semi-finis.

Cette méthode a été utilisée respectivement par Bal et al. (2012) et Cherki et al. (2014) pour la caractérisation des blocs de la latérite mélangée à la gousse de mil et des isolants composites (liège et gypse). Son schéma de principe est donné à la Figure 2.7.

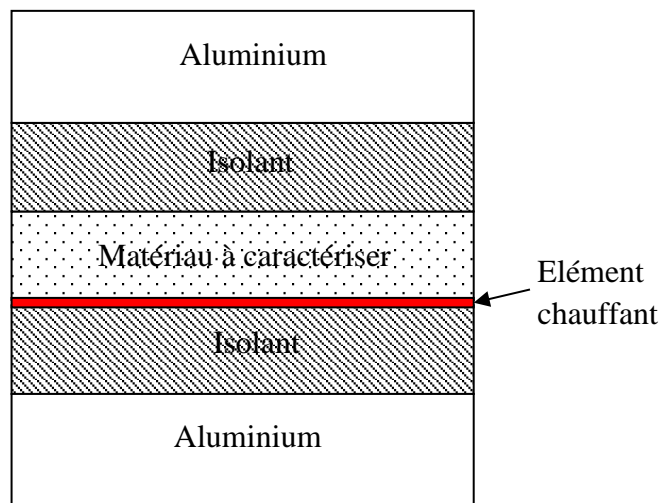


Figure 2.7: Schéma de principe de la méthode du plan chaud asymétrique à un seul échantillon.

Un élément chauffant de  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  de section et d'épaisseur négligeable est placé en dessous du matériau à caractériser. L'ensemble est placé entre deux blocs de polystyrène extruder d'épaisseur  $5\text{ cm}$  chacun et de propriétés thermophysiques connues. Les faces arrière des blocs de polystyrène sont bloquées par des blocs d'aluminium d'épaisseur  $4\text{ cm}$ . L'aluminium étant un bon conducteur de chaleur, la température en son sein sera supposée uniforme. Cette dernière hypothèse est vraie si le nombre de Biot,  $B_i = hL/\lambda_{Al}$ , est inférieur à  $0,1$ .

En considérant  $h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  la valeur du coefficient d'échange par convection,  $L = l = 10 \text{ cm}$  les dimensions transversales du bloc d'aluminium et  $\lambda_{Al} = 200 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  sa conductivité thermique, le nombre de Biot est  $B_i = 0,05$ , largement inférieur à la valeur limite pour que ces blocs d'aluminium soient supposés à température uniforme.

On applique un échelon de chaleur constant à la résistance chauffante et les variations de la température en son centre sont mesurées à l'aide d'un thermocouple.

L'hypothèse du transfert 1D signifie que le transfert de chaleur au sein du dispositif décrit ci-dessus se fait suivant une seule direction, celle perpendiculaire au plan de l'élément chauffant. Le temps de chauffage durant lequel cette hypothèse reste vraie peut être évalué approximativement à partir du modèle complet 3D (dont une modélisation complète est faite en annexe C). Ainsi, les valeurs approchées des propriétés thermophysiques des échantillons et un logiciel de simulation thermique dynamique (COMSOL) sont utilisés. En respectant l'hypothèse de transfert de chaleur unidirectionnel, le formalisme quadripolaire permet d'écrire les relations suivantes :

$$\begin{pmatrix} \theta \\ \Phi_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ C_s p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \Phi_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \Phi_1 \end{pmatrix} \quad [2.23]$$

$$\begin{pmatrix} \theta \\ \Phi_{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} \quad [2.24]$$

avec :

- $\Phi_{01} + \Phi_{01} = \frac{\phi_0}{p} = \Phi_0$  ;
- $C_s = \rho_s c_s e_s$  la capacité thermique de la sonde multipliée par son épaisseur ;
- $\theta$  la transformée de Laplace de la température  $T(t)$  ;
- $\Phi_{01}$  la transformée de Laplace de la densité de flux de chaleur ascendante émise par l'élément chauffant ;
- $\Phi_{02}$  la transformée de Laplace de la densité de flux de chaleur descendante émise par l'élément chauffant ;
- $\Phi_0$  la transformée de Laplace de la densité de flux de chaleur totale  $\phi_0$  émise par l'élément chauffant ;
- $R_c$  la résistance de contact à l'interface élément chauffant/échantillon multipliée par l'air de l'élément chauffant ;
- $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  les transformées de Laplace des densités de flux de chaleur atteignant respectivement les blocs d'aluminium supérieur et inférieur ;
- $p$  le paramètre de Laplace ;
- $A_1 = AA_i + CC_i + R_c(A_i B + C_i D)$  ;  $B_1 = AB_i + CD_i + R_c(BB_i + DD_i)$  ;
- $C_1 = C_s p(AA_i + CC_i) + C_s p(R_c + 1)(A_i B + C_i D)$  ;
- $D_1 = C_s p[(AB_i + CD_i) + (R_c + 1)(BB_i + DD_i)]$  ;



- $A = D = \cosh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right)$  ;  $B = \frac{\sinh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{\lambda\sqrt{\frac{p}{a}}}$  ;  $C = \lambda\sqrt{\frac{p}{a}}\sinh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right)$  ;
- $A_i = D_i = \cosh\left(e_i\sqrt{\frac{p}{a_i}}\right)$  ;  $B_i = \frac{\sinh\left(e_i\sqrt{\frac{p}{a_i}}\right)}{\lambda_i\sqrt{\frac{p}{a_i}}}$  ;  $C_i = \lambda_i\sqrt{\frac{p}{a_i}}\sinh\left(e_i\sqrt{\frac{p}{a_i}}\right)$  ;
- $\lambda$ ,  $a$  et  $e$  respectivement la conductivité thermique, la diffusivité thermique et l'épaisseur de l'échantillon ;
- $\lambda_i$ ,  $a_i$  et  $e_i$  respectivement la conductivité thermique, la diffusivité thermique et l'épaisseur de l'isolant.

La résolution du système d'équations ci-dessus conduit à l'équation :

$$\theta(p) = \frac{\Phi_0(p)}{\frac{D_1}{C_1} + \frac{D_i}{C_i}} \quad [2.25]$$

L'inversion numérique de Laplace de la formule ci-dessus utilisant l'algorithme de De Hoog (De Hoog, 1982) permet d'obtenir l'expression de la température au centre de la sonde en fonction du temps. Différentes méthodes permettent d'évaluer les paramètres.

#### ○ Modèle simplifié

La Figure 2.8 présente les variations de la température au centre de la sonde en fonction du temps obtenues théoriquement à partir du modèle précédent. La conductivité thermique  $\lambda$  et la capacité thermique volumique  $\rho c$  de l'échantillon (brique de latérite compressée et stabilisée) de 3 cm d'épaisseur considéré sont respectivement  $1,03 \text{ W/m}^2\text{K}$  et  $2,27 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ . Le polystyrène de 5 cm d'épaisseur a une conductivité thermique  $\lambda_i$  de  $0,032 \text{ W/m}^2\text{K}$  et une capacité thermique volumique  $\rho_i c_i$  de  $48000 \text{ J/m}^3\text{K}$ .

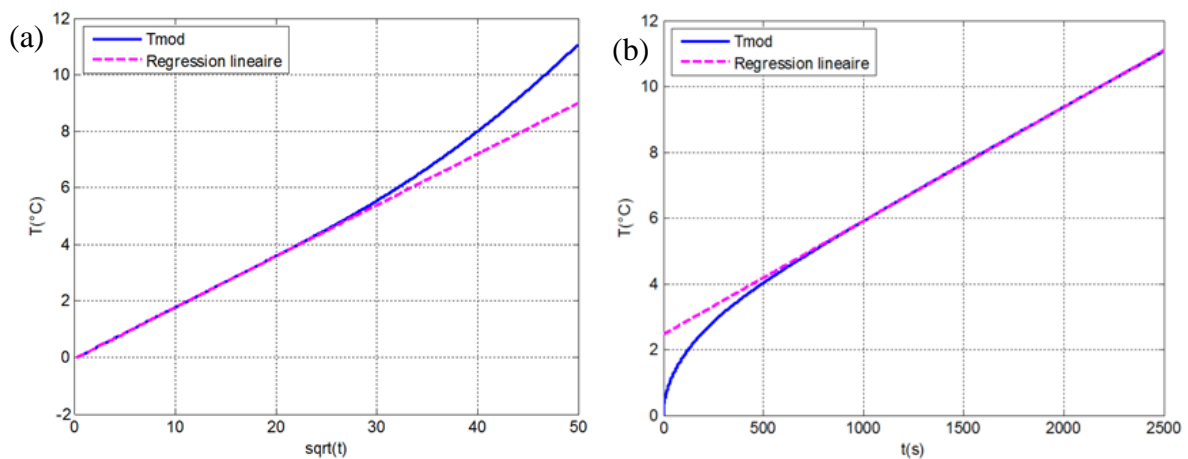


Figure 2.8: Evolution de la température au centre de la sonde en fonction du temps : modèle théorique.

La Figure 2.8a montre qu'au début du chauffage, l'élévation de température au centre de la sonde évolue linéairement avec la racine carrée du temps. Cela signifie que durant cette période, l'échantillon se comporte comme un milieu semi-infini. La procédure décrite ci-dessus (modèle avec un échantillon semi-infini) permet d'estimer la valeur de l'effusivité thermique.

La Figure 2.8(b) montre qu'à partir d'un certain temps de chauffe, la température au centre de la sonde varie linéairement avec le temps. Cela signifie que le système est devenu semi-permanent. Ainsi, on peut écrire :

$$\phi = (\rho_s c_s + \rho_i c_i + \rho c) \frac{dT}{dt} \quad [2.26]$$

La capacité thermique volumique de l'échantillon peut finalement se calculer à partir de l'équation ci-dessus en exploitant la pente  $\beta$  de la portion qui est segment de droite de la courbe donnant les variations de la température au centre de la sonde en fonction du temps.

$$\rho c = \frac{\phi}{\beta} - (\rho_i c_i + \rho_s c_s) \quad [2.27]$$

Dans ce travail, les valeurs de l'effusivité thermique et de la capacité thermique volumique de chaque échantillon, obtenues avec le modèle simplifié, ont été utilisées comme valeurs initiales lors de l'estimation des paramètres à partir du modèle complet.

#### ○ **Modèle complet**

Les paramètres de la sonde et de l'échantillon sont obtenus en estimant simultanément les valeurs qui minimisent la somme des écarts quadratiques entre les courbes expérimentale et théorique. L'estimation simultanée de deux paramètres n'est possible que lorsqu'il n'existe pas de corrélation entre les sensibilités réduites de ces paramètres à la température (au centre de la sonde). Une étude de sensibilité de la température par rapport aux différents paramètres du modèle décrit ci-dessus est préalablement faite.

La sensibilité réduite  $\beta_j$  du paramètre  $p_j$  à la température  $T(x, t)$  est donnée par la relation :

$$\beta_j = p_j \frac{\partial T(x, t)}{\partial p_j} \quad [2.28]$$

Cette grandeur représente la variation de la température induite par une variation relative de  $p_j$ . Les sensibilités réduites présentent ainsi l'avantage de permettre la comparaison directe de l'influence relative des différents paramètres sur la température.

Les propriétés thermophysiques de la brique de terre comprimée et stabilisée données au paragraphe 2.1.3 sont utilisées. Les valeurs suivantes ont été également considérées pour cette étude de sensibilité :

- capacité thermique volumique de la sonde  $\rho_s c_s = 585.8 \text{ Jm}^2\text{K}^{-1}$ ;
- la résistance de contact multipliée par l'aire de la sonde  $R_c = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ ;
- résistance de la sonde  $R = 39.5 \text{ } \Omega$  ;
- surface de la sonde  $S = 10 \text{ cm}^2$  ;
- intensité de courant  $I = 0,252 \text{ A}$ .

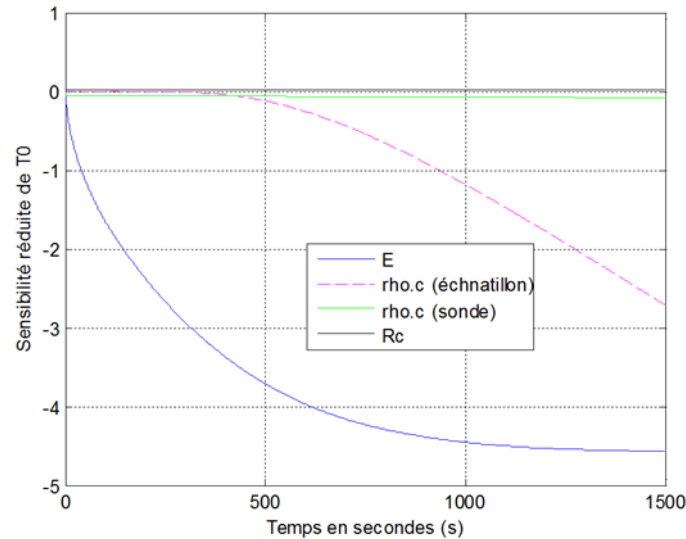


Figure 2.9: Sensibilité réduite de la température au centre de la sonde à l'effusivité (E), la résistance de contact (Rc), la capacité thermique volumique de l'échantillon ( $\rho c$ ) et la sonde ( $\rho_s c_s$ ).

La Figure 2.9 présente les sensibilités réduites des paramètres E, Rc,  $\rho c$  et  $\rho_s c_s$  à la température au centre de la sonde. On note qu'à chaque moment, la température au centre de la sonde est significativement sensible à l'effusivité E du matériau. De plus, cette sensibilité n'est pas corrélée à celle des autres paramètres. On note aussi qu'au début (jusqu'à un temps  $t_1=300$  s dans le cas d'espèce), la température n'est pas sensible à la capacité thermique volumique de l'échantillon. Une estimation simultanée des paramètres E et  $\rho c$  à partir du modèle complet est possible si le temps d'estimation est supérieur à  $t_1$  mais dans les limites de l'hypothèse de transfert unidirectionnel.

## 2. Matériels

### 2.1. Présentation et analyse des matériaux entrant dans la confection des échantillons

Les propriétés thermophysiques des parpaings de pouzzolane et de sable et des briques en latérite stabilisée au ciment avec incorporation de la pouzzolane noire sont mesurées dans ce travail. Il est important de faire une brève présentation des matériaux qui les constituent.

#### 2.1.1. La latérite

La latérite ou sol latéritique est un sol qui se forme dans les régions tropicales humides et qui résulte d'un processus d'altération particulier sous couvert forestier, la ferralitisation ou

latérisation (sol ferrallitique) (Bohi, 2008). Les caractéristiques des latérites issues des sites de Mvog-Betsi et de Nkolbisson sont présentées ci-dessous. La latérite qui répond le mieux aux normes de fabrication des briques de terre compressée et stabilisée sera utilisée par la suite.

### 2.1.1.1. La granulométrie

La granulométrie est une étude qui rend compte de la texture de la terre. Cette étude est très importante pour les matières devant rentrer dans la conception des matériaux tant à structure porteuse que de remplissage pour les bâtiments. Il est donc important que la granulométrie de la terre utilisée pour confectionner les briques de terre (BTC, BTperforé, BTcuite, BTS) soit de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de texture indiqué par la Figure 2.10, et qui obéit dans le cas le plus général aux limites suivantes :

- gravier ( $\phi \geq 2 \text{ mm}$ ) de 0 à 25 % ;
- sable gros et fin ( $2 \geq \phi \geq 0,02 \text{ mm}$ ) de 55 à 75 % ;
- limon ( $0,02 \geq \phi \geq 0,002 \text{ mm}$ ) de 10 à 25 % ;
- argile ( $\phi \leq 0,002 \text{ mm}$ ) de 10 à 15 %.

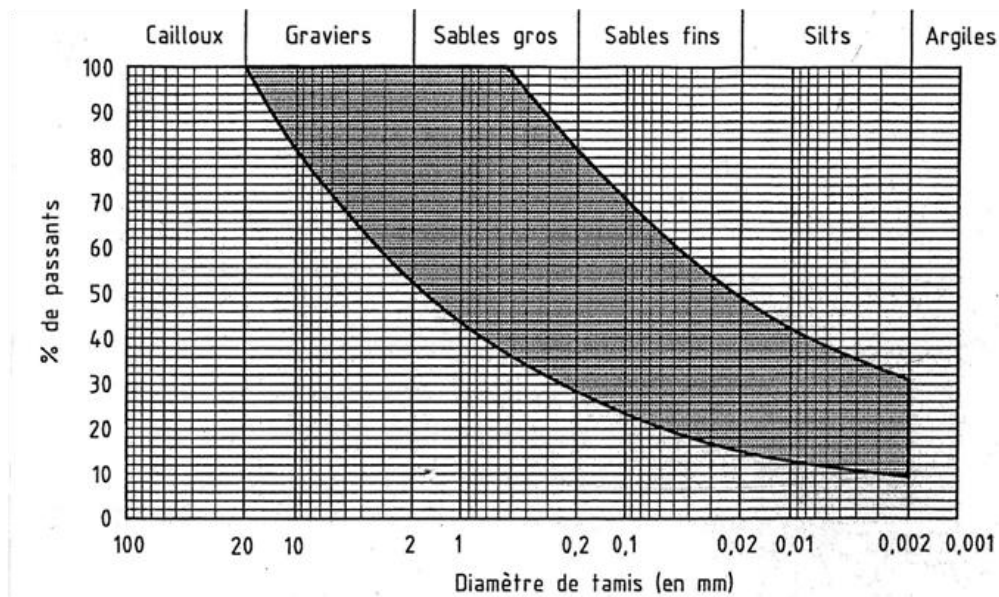


Figure 2.10: Fuseaux granulaires des terres utilisables pour les BTC d'après la NOR 1 (P'KLA, 2002).

Notons que certaines terres qui ne s'inscrivent pas dans le fuseau peuvent être corrigées par ajout de sable ou d'un autre matériau. C'est l'une des raisons pour lesquelles la norme de conception des BTS Ref : ARC 680 :1996 ou NC 102-114 (Nguyen, 2010) recommande que les terres latéritiques les mieux appropriées pour la conception des BTS soient dans le fuseau de texture et doivent contenir, en teneur : du gravier (0 à 40 %), du sable (25 à 80 %), des silts (10 à 25 %) et d'argile (8 à 30 %).

Il ressort que les taux les plus faibles sont ceux de l'argile et du silt. Il est donc impératif de toujours vérifier au préalable si le matériau est trop argileux et ne possède pas un taux élevé de

limons car un taux élevé de ces deux derniers composants contribuerait à absorber au fil du temps le ciment et diminuerait par conséquent la résistance en compression de la structure. Ces exigences nous ont obligés à déterminer la répartition en tailles des particules de latérite devant être utilisée. Deux méthodes d'analyse granulométrique ont été employées : la granulométrie par voie sèche (GSc) et la sédimentométrie (GS).

Les résultats obtenus pour les deux types de latérites sont donnés par la Figure 2.11.

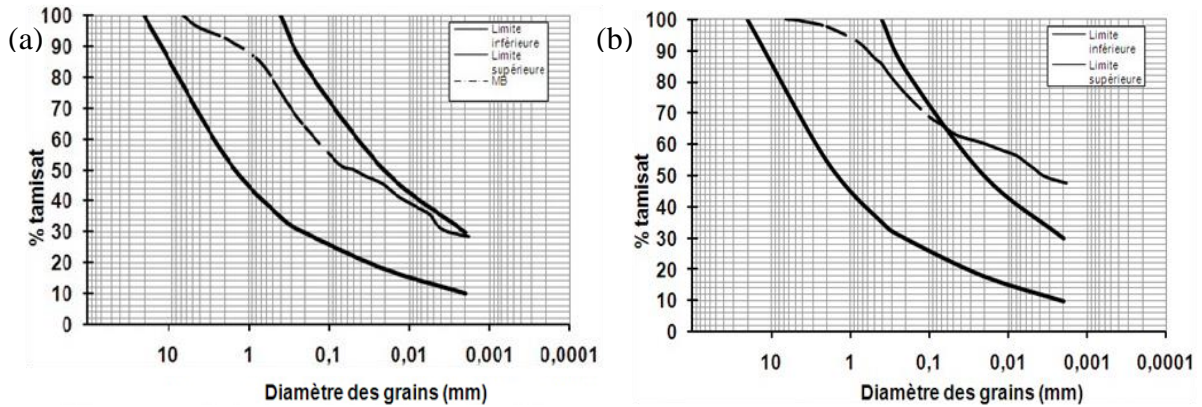


Figure 2.11: Diagramme de texture des latérites de Mvog-Betsi (a) et de Nkolbisson (b).

La synthèse des analyses granulométriques des deux latérites, Mvog-Betsi (MV) et Nkolbison (NK) est donnée par le Tableau 2.1.

Tableau 2.1: Synthèse de l'analyse granulométrique des latérites MV et NK.

Réf.	Couleur	Aspect	% de gravier	% de sable	% de limon	% d'argile
MV	Rouge	Sableux	13,6	43,98	14,51	27,91
NK	Rouge	Sableux +argileux	7,2	33,58	12,39	46,82

Il ressort de la Figure 2.11 que la courbe de texture de la latérite MV se trouve dans le fuseau granulométrique. De plus, en analysant le tableau de synthèse, il ressort que la latérite NK est de nature trop argileuse car son taux d'argile de 46,82 % est largement supérieur à la limite recommandée par la norme NC (Norme Camerounaise) 102-114 pour les BTC qui est de 30%. On peut à priori conclure que la latérite MV est la « meilleure » mais il est judicieux de rechercher également les indices de plasticité desdites latérites.

### 2.1.1.2. Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg représentent les teneurs en eau qui marquent le passage d'un état à un autre. Elles servent à apprécier la consistance d'un sol car elles peuvent varier dans les larges limites avec :

- la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores ;
- l'épaisseur des couches d'eau absorbée qui enrobent ses grains.

Atterberg a défini quatre états de consistance du sol : plastique, friable, solide et liquide. Deux grandes limites servent à apprécier ces consistances : la limite de liquidité ( $W_l$ ) et la limite de plasticité ( $W_p$ ). La détermination de ces deux limites va permettre de déterminer l'indice de plasticité. En général, la terre utilisée pour la confection des BTC doit avoir un indice de plasticité inférieur ou égal 30 % (norme Rf NC 102-114).

Les résultats montrent que les limites de liquidité des latérites MV et NK sont respectivement 53,1% et 62,5%. Les limites de plasticité des latérites MV et NK sont respectivement 36,2% et 31,8%. Les indices de plasticité (donné par la relation  $I_p = W_l - W_p$ ) des latérites de Mvog-Betsi et de Nkolbisson sont respectivement 17,1% et 30,7%. On peut donc conclure que la latérite de Mvog-Betsi a une plasticité (selon le critère de Burmister et de Atterberg cités par Nguyen, 2010) moyenne car  $10 \leq I_p \leq 20$  et celle de Nkolbison a une plasticité élevée car  $20 \leq I_p \leq 40$ .

### 2.1.1.3. La densité réelle

Nous avons également déterminé la densité réelle de chacune des latérites MV et NK. Elle donne le rapport entre la masse des particules sèches et le volume total du sol (y compris les pores). Elle est influencée par la structure du sol, par ses caractéristiques de gonflement et de retrait qui dépendent de son humidité. Pour sa détermination, nous avons utilisé la méthode du pycnomètre. Le calcul des deux densités a été obtenu à partir de la relation :

$$d = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad [2.29]$$

où :

- $m_1$  est la masse du pycnomètre vide et sec ;
- $m_2$  est la masse du pycnomètre contenant 25 g du matériau ;
- $m_3$  est la masse du pycnomètre contenant 25 g du matériau et de l'eau distillée jusqu'à la graduation  $250 \text{ cm}^3$  ;
- $m_4$  est la masse du pycnomètre contenant de l'eau distillée jusqu'à la graduation  $250 \text{ cm}^3$ .

Les densités réelles des latérites MV et NK sont donc respectivement 1,92 et 2,17.

De toutes les analyses faites (granulométrie sèche et humide, indice de plasticité, etc.) et par rapport aux normes de construction en BTC, nous avons retenu la latérite de Mvog-Betsi.

### 2.1.2. La pouzzolane

La pouzzolane est une roche naturelle, de couleur rouge ou noire, à structure alvéolaire et constituée de scories volcaniques basaltiques. Ses caractéristiques exceptionnelles (pH neutre, forte capacité d'absorption et de filtration, très haute résistance à la chaleur, propriétés phoniques...) lui ouvrent de multiples champs d'application, tels que la filtration d'eau et l'assainissement, le jardinage et la préparation des sols agricoles et horticoles (paillage inerte, aération, drainage, substrat...), la couverture des terrains de sports, l'isolation phonique et la décoration...<sup>3</sup>. La Figure 2.12 présente l'aspect des granulats de pouzzolane noire.



Figure 2.12: Granulat de pouzzolane noire.

La pouzzolane peut être prélevée au Cameroun dans deux localités de l'ouest du pays, les plaines du Noun et de Tombel comme le montre la Figure 2.13.

La pouzzolane utilisée dans cette étude provient de Djoungo (précisément dans la région du littorale, département du Mungo). Les résultats de l'analyse chimique de cette pouzzolane effectuée par Leonelli et al. (2007) sont donnés dans le Tableau 2.2.

Il faut noter que cette pouzzolane est exploitée par CIMENCAM, industrie de cimenterie locale, pour produire le ciment CPJ 35.

---

<sup>3</sup> <http://www.ecohabitat.fr>, *La pouzzolane*

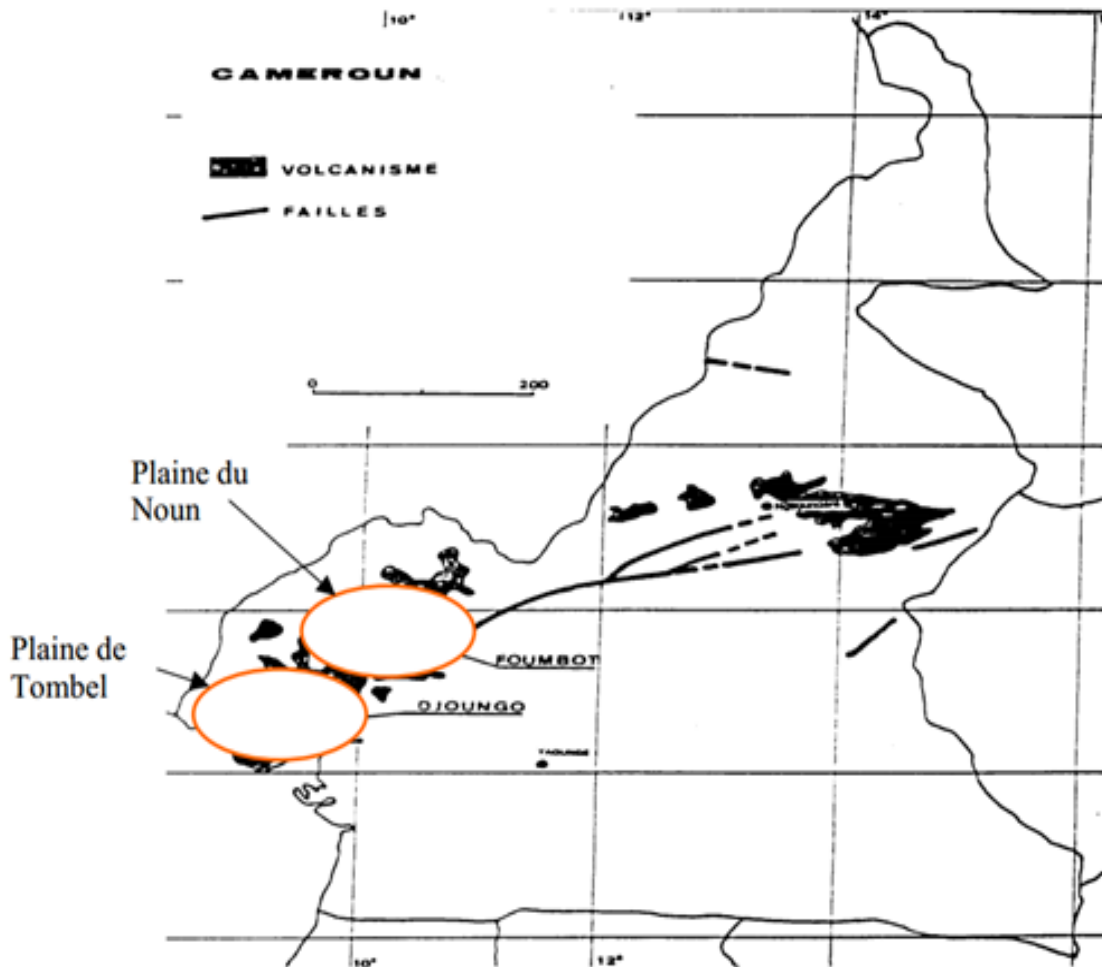


Figure 2.13: Localisation des sites de prélèvement de la latérite au Cameroun.

Tableau 2.2: Analyse chimique de la pouzzolane de Djoungo (Leonelli et al., 2007).

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Los	Total
%	44.02	14.39	8.42	5.88	3.73	1.19	12.59	2.97	0.78	0	0.12	3.6	97.7

### 2.1.3. Le ciment

Le ciment utilisé comme liant dans la confection des échantillons est le Ciment Portland CPJ35 produit au Cameroun par CIMENCAM. Sa composition est présentée dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3: Composition du ciment Portland (Pepple et al., 2010).

Nom commercial	CPJ 35		
Masse volumique apparent (kg/l)	3.1		
Diamètres de grains	80 $\mu$ m		
Résistance réelle au 28 jours	32 MPa		
Composition (%)	Clinker	Gypse	Pouzzolane
	65	5%	30%



## 2.2. Caractéristiques des appareils utilisés

La Figure 2.14 présente l'ensemble des équipements techniques utilisés dans la caractérisation des matériaux effectuée dans ce travail.



Figure 2.14: Appareillage de caractérisation thermophysique utilisé.

Le thermocouple (dispositif de mesure de la température) est de type K connecté à l'élément chauffant par deux fils conducteurs de diamètre considérablement faible.

Le dispositif d'enregistrement de température issu de Pico Technologie permet un enregistrement de température avec un pas de temps de 1ms (milliseconde). Dans le cadre de ce travail, nous avons enregistré les températures avec un pas de temps de 100 ms.



Figure 2.15: Photo du générateur de tension continue utilisé.

Le générateur utilisé est un générateur de tension continu permettant la visualisation simultanée de la tension électrique aux bornes de l'élément chauffant et de l'intensité de courant électrique qui le traverse. Une photo de ce générateur est présentée à la Figure 2.15.

Les photos des deux presses hydrauliques utilisées dans ce travail sont données à la Figure 2.16. Celle de gauche affiche l'intensité de la force de compactage. Cette intensité est ensuite divisée par la section de l'éprouvette pour déterminer la pression de compactage. Cette presse a été utilisée à la confection des éprouvettes de  $10 \times 10 \times e \text{ cm}^3$ . La presse de droite, conçue pour la confection des briques, affiche directement la pression de compactage. Elle a été employée pour la fabrication des échantillons de dimensions  $24 \times 9,2 \times e \text{ cm}^3$ .

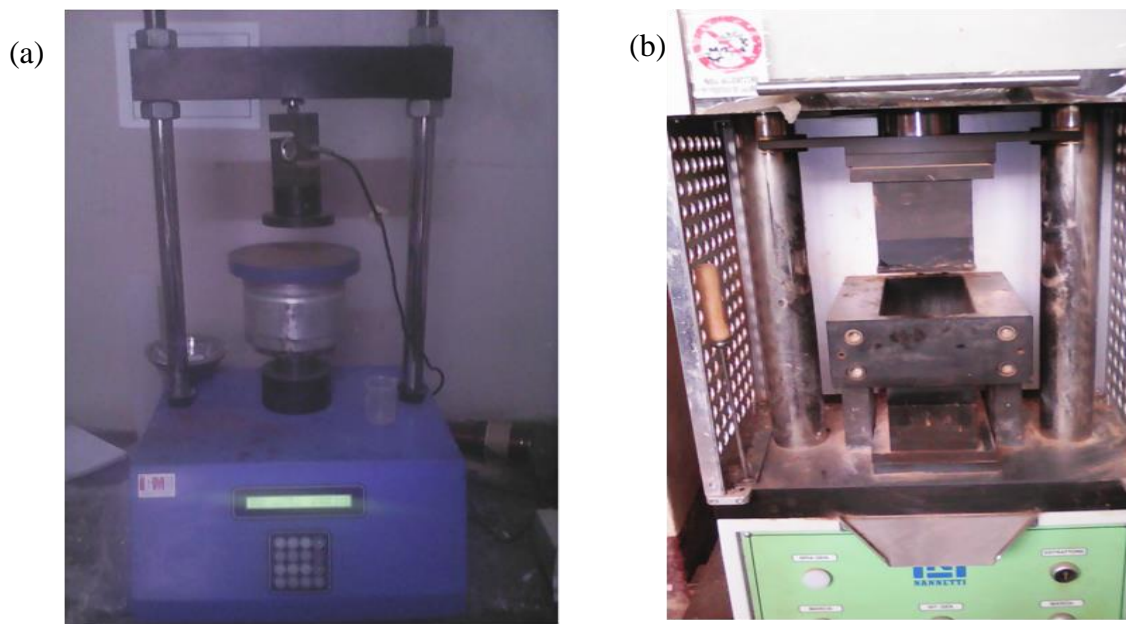


Figure 2.16: Photo des presses hydrauliques utilisées.

### 3. Etude de l'impact du taux de pouzzolane sur les propriétés thermophysiques des briques de terre stabilisée

#### 3.1. Préparation des échantillons

Le dispositif expérimental de fabrication des éprouvettes comprend une presse hydraulique et des moules de  $10 \times 10 \times 4 \text{ cm}^3$  (dimensions intérieures). Ces moules sont fabriqués avec une tôle en acier d'épaisseur 8 mm pour pouvoir supporter la pression de compactage sans déformation. La presse hydraulique utilisée dans cette partie est présentée à la Figure 2.16a.

La latérite constituée des grains de tailles inférieures ou égales à 2 mm (obtenue par tamisage) est utilisée pour la confection des échantillons. La pouzzolane utilisée dans ce travail possède les grains de taille comprise entre 2 et 2,5 mm.

Pour réaliser le compactage, une certaine quantité d'eau est ajoutée au mélange à compacter, initialement sec, jusqu'à ce qu'il soit malléable. Les éprouvettes de forme parallélépipédique de dimension  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times e$  (où  $e$  est l'épaisseur de l'éprouvette) contenant différents

taux de pouzzolane ont été confectionnées. Le Tableau 2.4 présente la composition des différents échantillons.

Tableau 2.4: Composition des échantillons.

Echantillon	Composition massique (%)		
	Latérite	Pouzzolane	Ciment
E1	77	15	8
E2	62	30	8
E3	47	45	8

Après moulage, les échantillons ont été gardés dans un sac en plastique 28 jours durant, temps nécessaire pour la bonne prise du ciment.

Une photo de ces échantillons est donnée à la Figure 2.17. A gauche se trouve l'échantillon E3 (45% de pouzzolane), au centre est placé l'échantillon E2 (30% de pouzzolane) et à droite, on trouve l'échantillon E1 (15% de pouzzolane).



Figure 2.17: Photo de quelques échantillons de matériau à caractériser.

## 3.2. Méthode d'estimation

### 3.2.1. Estimation de la surface utile de l'élément chauffant et de sa capacité thermique volumique

La méthode du plan chaud symétrique avec les échantillons supposés semi-infinis est utilisée pour l'estimation de ces paramètres relatifs à l'élément chauffant et à la sonde de température. La Figure 2.18 présente une photo des deux faces de l'élément chauffant auquel un thermocouple est connecté.

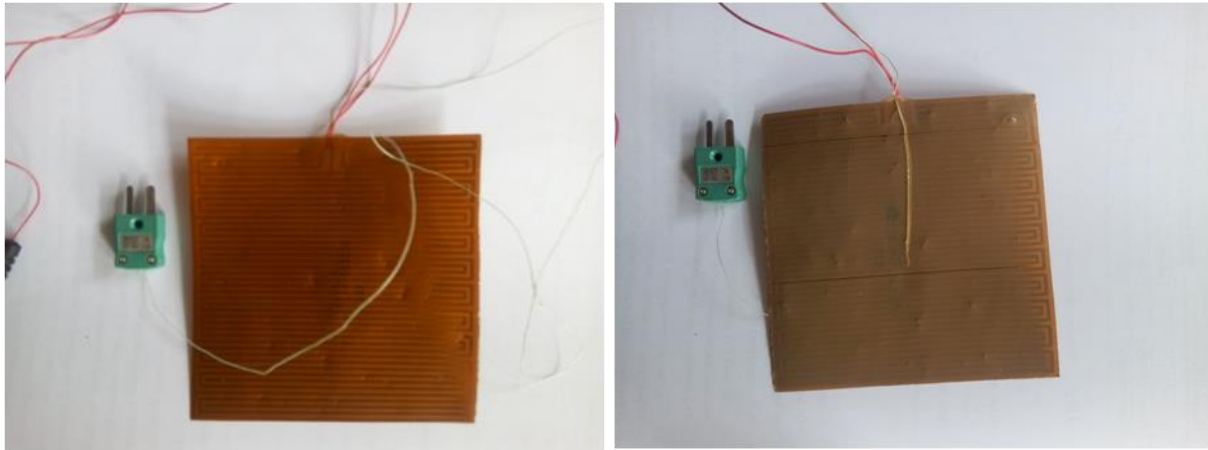


Figure 2.18: Photo des deux faces de l'élément chauffant de forme carrée sur lequel est connecté un thermocouple.

Les propriétés du matériau dans lequel les deux échantillons (dont l'un des deux est emballé dans un sachet en polyuréthane) sont faits étant connues (le polystyrène extrudé dans le cas d'espèce), les inconnues dans l'expression de la température au centre de l'élément chauffant en fonction du temps sont :

- La résistance de contact à l'interface élément/échantillon.
- La surface de l'élément chauffant.
- La capacité thermique volumique de l'élément chauffant + sonde + couche de polyuréthane d'épaisseur 0,05 mm

Une photo du montage expérimental est présentée à la

Figure 2.19.

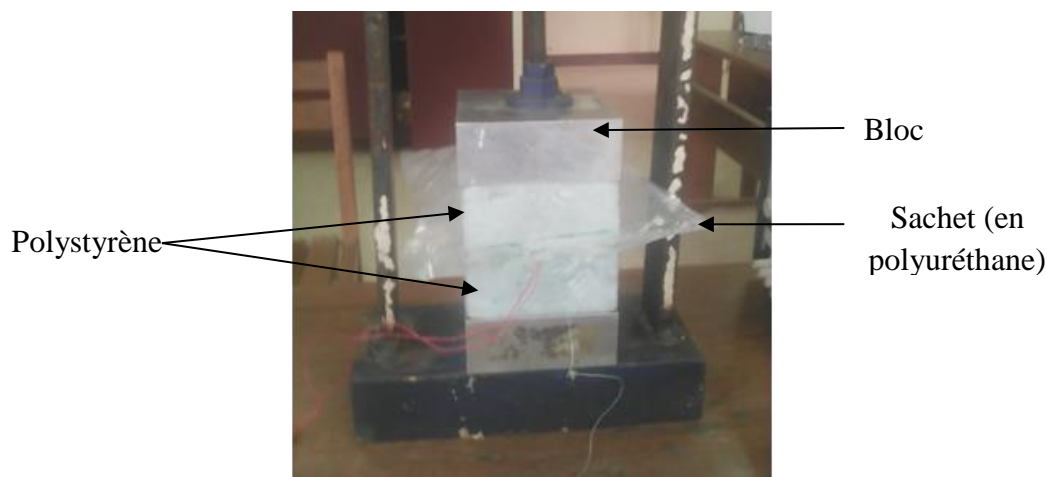


Figure 2.19: Une photo du montage expérimental plan chaud symétrique.

La surface utile de l'élément chauffant est celle qui permet de retrouver la valeur de l'effusivité thermique du polystyrène ( $E = 39.19 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ ) déterminée à partir du dispositif de trois

couches, approprié à la caractérisation des isolants. La Figure 2.20 présente les variations de températures au centre de l'élément chauffant obtenues expérimentalement et théoriquement (en utilisant la surface utile de la sonde et les paramètres du polystyrène).

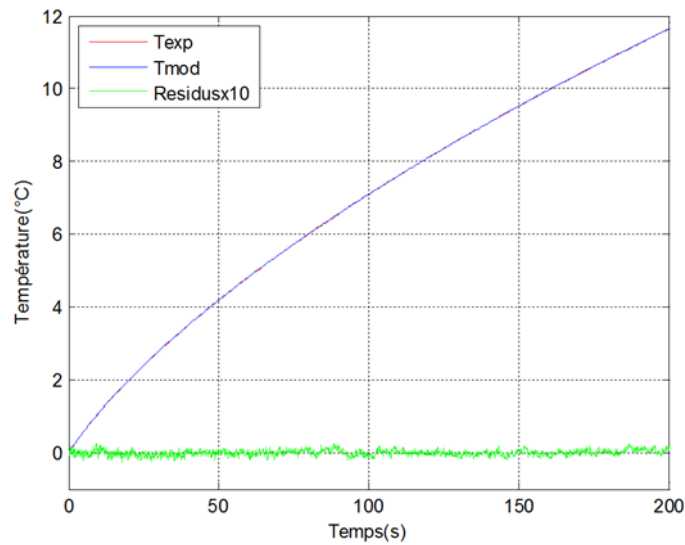


Figure 2.20: Températures expérimentales et théoriques obtenues avec la surface utile de la sonde.

Le Tableau 2.5 présente les valeurs de la surface utile de la sonde, de la résistance de contact à l'interface sonde/échantillon et de la capacité thermique volumique de la sonde pour plusieurs essais.

Tableau 2.5: Valeur de la surface utile de la sonde.

Flux thermique (mW)	Surface utile (cm <sup>2</sup> )	Capacité calorifique de la sonde (Jm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	Résistance de contact (KW <sup>-1</sup> )
904,8	102,3	310	$3 \times 10^{-4}$
900	100,9	312	$8 \times 10^{-5}$
900	102,0	317	$2 \times 10^{-4}$
Moyenne	101,73	313	$1,9 \times 10^{-4}$

On note que la résistance de contact à l'interface élément chauffant/polystyrène est très faible. Ceci est dû au fait que le polystyrène est un matériau isolant et présente par conséquent une résistance thermique très grande devant la résistance de contact. De plus, le polystyrène, matériau souple, se déforme pour s'adapter à la forme de l'élément chauffant+thermocouple. Il apparaît aussi que la capacité calorifique de l'élément chauffant n'est pas la même pour tous les essais. Cela serait dû à un gradient de température au sein de l'élément chauffant (dans le sens de propagation de la chaleur) et au fait que la température est mesurée sur une face de l'élément chauffant ; ce qui contribue à une surestimation de la température moyenne de l'élément chauffant et par conséquent à une surestimation de  $r_{ces}$  (Jannot, 2004). La différence entre la température moyenne de l'élément chauffant et celle mesurée (sur l'une des faces dudit élément chauffant) dépend de la densité de flux de chaleur dissipée et de la résistance de contact à



l'interface plaque chauffante/échantillon qui varie d'une mesure à une autre. Dans la suite du travail, cette valeur ne sera pas supposée identique d'une mesure à une autre.

La surface utile de la sonde qui sera utilisée dans la suite du travail est la moyenne des valeurs obtenues pour les trois essais soit  $101,73 \text{ cm}^2$ .

### 3.2.2. Influence de l'emballage de l'échantillon et étalonnage

Les échantillons des matériaux à caractériser sont susceptibles d'échanger avec l'air environnant une importante quantité d'eau au cours du chauffage ; ce qui peut influencer significativement les résultats obtenus. Pour réduire ce risque, ils sont emballés dans des sachets en polyuréthane d'épaisseur  $0,05 \text{ mm}$  et sont caractérisés deux jours plus tard. On suppose qu'au bout de ce temps, l'eau contenue dans le matériau est en équilibre avec l'humidité de l'air piégé dans le sachet.

Pour étudier l'influence de l'emballage, un matériau de propriétés thermophysiques connues est caractérisé avec et sans emballage. Les résultats obtenus dans les deux cas sont ensuite comparés. Cela permet aussi d'étalonner la sonde. Un échantillon de PVC de  $10 \text{ cm}$  de côté et  $1 \text{ cm}$  d'épaisseur est utilisé. Ses propriétés thermophysiques connues à l'avance sont les suivantes : conductivité thermique  $a = 0,184 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ; effusivité thermique  $E = 520 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$  ; capacité thermique volumique  $\rho c = 1,47.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$  (Bal et al. 2013).

Le modèle simplifié est premièrement utilisé sur l'échantillon emballé. La Figure 2.21(a) présente la courbe expérimentale  $T_0(t) = \sqrt{t}$  et sa régression linéaire dans l'intervalle 20-120 s dont la pente permet d'estimer la valeur de l'effusivité thermique de l'échantillon. La Figure 2.21(b) présente la courbe expérimentale  $T_0(t) = f(t)$  et sa régression linéaire entre 380s et 432 s. Le coefficient directeur de cette droite permet d'évaluer la capacité thermique volumique de l'échantillon. Les paramètres mesurés sont consignés dans le Tableau 2.6.

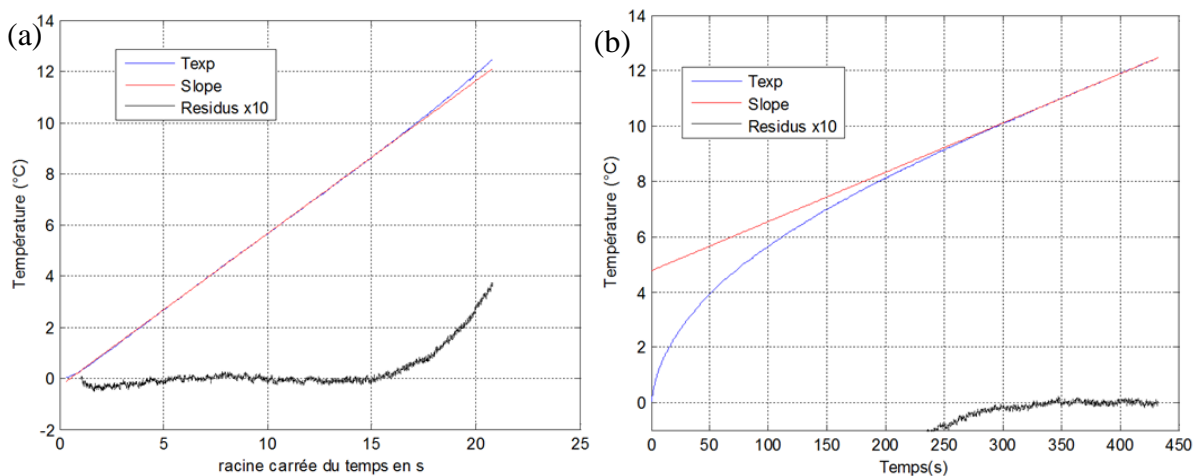


Figure 2.21: Courbes expérimentales et les droites des régressions linéaires.

Les paramètres du PVC emballé sont ensuite évalués à partir du modèle complet. La Figure 2.22a présente les courbes  $T_0(t) = f(t)$  expérimentale et théorique. La courbe théorique est obtenue à partir des paramètres thermophysiques de l'échantillon qui minimisent la somme des écarts quadratiques entre les valeurs théoriques et expérimentales. La courbe des résidus prouve que les courbes expérimentales et théoriques sont pratiquement confondues.

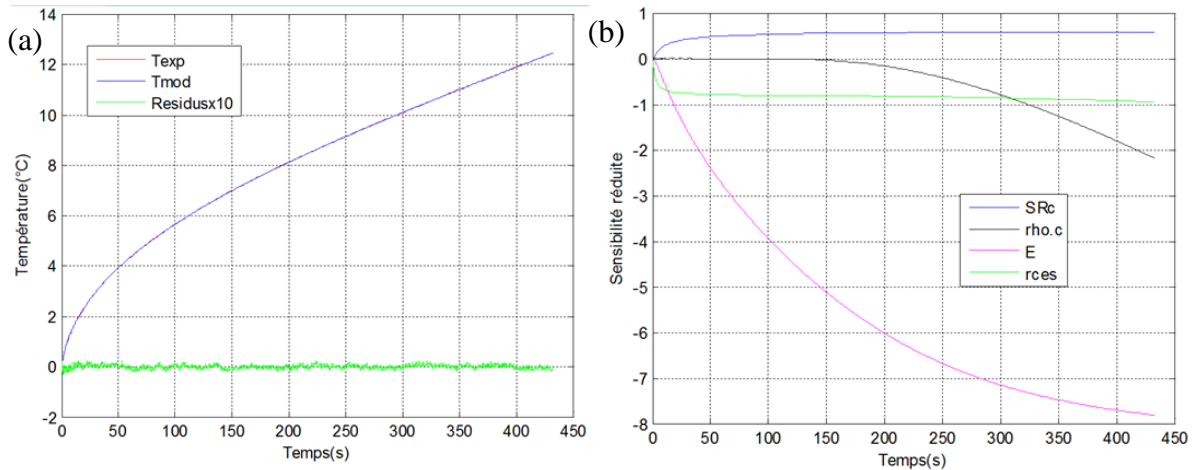


Figure 2.22: Courbes théorique et expérimentale et de résidus (x10) (a) +analyse de sensibilité réduite de la température à divers paramètres (b).

Une étude de sensibilité à la température des paramètres devant être estimés a été faite pour bien délimiter la durée d'estimation à partir du modèle complet. La Figure 2.22b présente la sensibilité réduite à la température de la résistance de contact (SRc), de l'effusivité (E), de la capacité thermique volumique ( $\rho c$ ) de l'échantillon à caractériser et de la capacité thermique de la sonde multipliée par son épaisseur ( $\rho_s c_s e$ ).

Il apparaît clairement que la température commence à être sensible à la capacité thermique volumique de l'échantillon à caractériser qu'après 120 s de chauffage, approximativement. La sensibilité de la température aux autres paramètres est suffisamment élevée dès les premières secondes. La durée d'estimation doit donc être largement supérieure à 120 s.

Tableau 2.6: Valeur de l'effusivité et de la conductivité thermique du PVC estimées à partir d'un échantillon emballé dans un sachet et du même échantillon non emballé.

		Modèle simplifié			Modèle complet		
Paramètres	Unité	Durée	Valeur	Erreur	Durée	Valeur	Erreur
Echantillon emballé							
E	$\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$	20-120 s	524	< 1%	0-432 s	532	2%
$\rho c$	$10^6 \cdot \text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	380-432 s	1,42	3%		1,46	< 1%
$\lambda$	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$		0,193	4,6%		0,194	5%
Echantillon non emballé							
E	$\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$	15-120 s	519	< 1%	0-400 s	527	1%
$\rho c$	$10^6 \cdot \text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	400-463s	1,42	3%		1,44	2%
$\lambda$	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$		0,189	3%		0,195	5.6%

Le Tableau 2.6 présente les propriétés thermophysiques du PCV (échantillon emballé et échantillon non emballé) obtenues à partir du modèle simplifié et du modèle complet.

Nous notons que le fait d'emballer l'échantillon dans un sachet de polyuréthane de 0,05 mm d'épaisseur n'affecte pratiquement pas les propriétés thermophysiques de l'échantillon. De plus, on constate que l'erreur relative est plus importante sur la conductivité thermique qui est obtenue dans ce travail par simple calcul à partir des paramètres mesurés directement. La plus grande valeur de l'erreur relative sur les paramètres mesurés directement (effusivité thermique et capacité thermique) est de l'ordre de 3% pour les deux modèles (simplifié et complet).

### 3.3. Résultats et discussion

Les propriétés de chaque échantillon sont mesurées pour plusieurs teneurs en eau. En fait, après chaque mesure, l'échantillon est placé dans une étuve à une température de 40°C environ. Lorsque sa perte en masse est estimée à environ 1%, il est retiré et sellé dans un sachet en polyuréthane. La prochaine mesure n'est réalisée que quelques jours plus tard pour permettre à l'eau de se répartir de façon uniforme à l'intérieur de l'échantillon. Cette action est répétée sur chaque échantillon jusqu'à ce que sa perte en masse ne soit plus significative. Il est finalement mis à l'état anhydre (en le plaçant à l'étuve à une température de 105°C pendant 48 heures) et la dernière mesure est faite. Les différentes teneurs  $w$  en eau auxquelles les mesures ont été réalisées sont obtenues à partir de la masse de l'échantillon  $m$  à l'état considéré et de sa masse à l'état sec  $m_s$  via la relation ci-dessous.

$$w = \frac{m - m_s}{m_s} \quad [2.30]$$

L'effusivité thermique  $E$  et la capacité thermique volumique  $\rho c$  des différents échantillons sont mesurées à plusieurs teneurs en eau à partir de la méthode décrite ci-dessus. Les conductivités thermiques  $\lambda$  correspondantes sont déduites des deux valeurs via la relation ci-dessous.

$$\lambda = \frac{E^2}{\rho c} \quad [2.31]$$

Pour éviter de rendre le texte touffu, seules les différentes étapes et courbes ayant permis la caractérisation thermophysique de l'échantillon E3 à la teneur en eau de 1,2% seront présentées. La Figure 2.23 (a) présente les variations de la température expérimentale au centre de l'élément chauffant en fonction de la racine carrée du temps et la droite de régression linéaire entre 150-800 s. Les résidus sont bien centrés en zéro dans cet intervalle de temps. La pente de cette droite est  $\alpha = 0,255$ . On déduit alors une première valeur de l'effusivité de ce matériau (voir Tableau 2.7). La Figure 2.23(b) présente la courbe expérimentale de la température en fonction du temps et la droite de régression linéaire au temps longs (où on suppose que le régime quasi-permanent est atteint). Le coefficient directeur de cette droite est  $\beta = 3,335 \times 10^{-3}$ . On en déduit la valeur la capacité calorifique thermique du matériau à caractériser (voir Tableau 2.7).



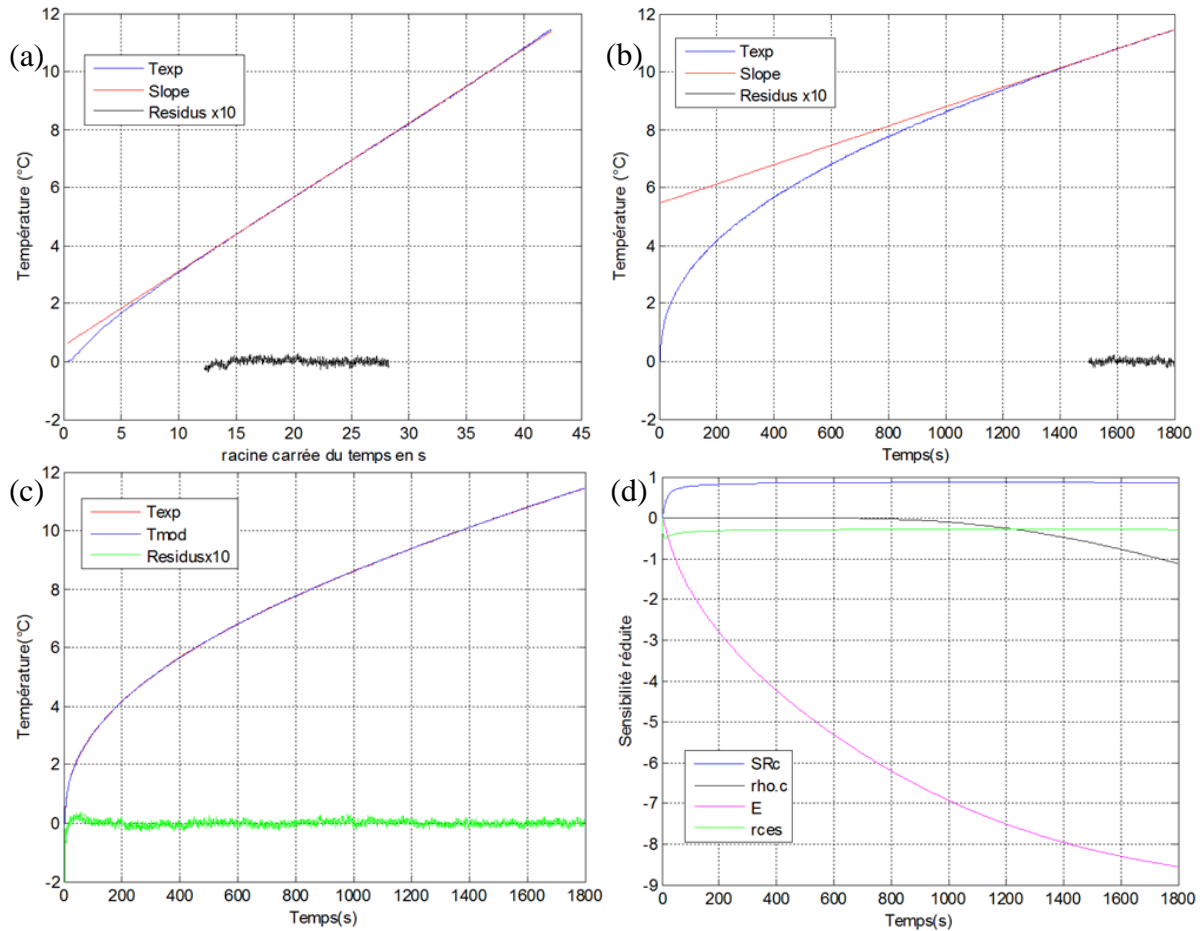


Figure 2.23: Etapes de caractérisation d'un échantillon donné.

Les valeurs précédentes obtenues par des méthodes simplifiées sont ensuite introduites comme première valeur dans le modèle complète pour l'estimation des valeurs finales (en cherchant celles qui minimisent les écarts quadratiques moyennes entre les températures expérimentales et théoriques). Ces valeurs sont consignées dans le Tableau 2.7. On constate que le décalage entre les valeurs obtenues par les deux méthodes n'est pas considérable.

Tableau 2.7: Propriétés thermophysiques de l'échantillon E3 à 1,2% de teneur en eau.

Paramètres	Unité	Modèle simplifié		Modèle complet		Décalage
		Durée	Valeur	Durée	Valeur	
E	$\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$	150-800 s	842	0-1800 s	851	1%
$\rho c$	$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}(\times 10^6)$	1500-1800 s	1,71		1,72	< 1%
$\lambda$	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$		0,415		0,422	1,56%

Ce processus est répété pour chaque échantillon et pour chaque teneur en eau et les résultats sont présentés ci-dessous.

### 3.3.1.1. Effusivité thermique

La Figure 2.24 présente les variations de l'effusivité thermique de chacun des échantillons E1, E2 et E3 en fonction de la teneur en eau. Les courbes de régressions linéaires entre les valeurs

d'effusivité thermique et les teneurs en eau de chaque échantillon sont aussi présentées sur cette figure.

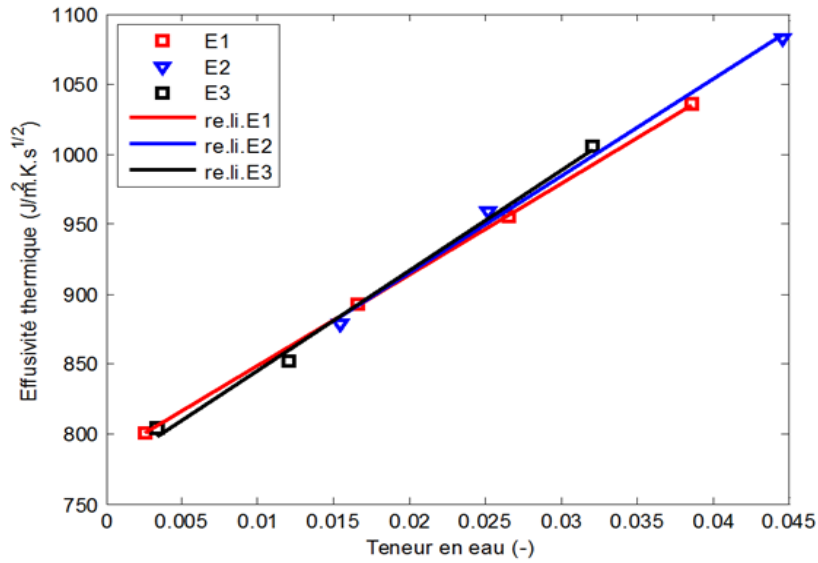


Figure 2.24: Effusivité thermique des briques de terre incorporant la pouzzolane.

On note que l'effusivité thermique augmente avec la teneur en eau. En effet, l'augmentation de la teneur en eau d'un matériau poreux se traduit par le remplacement de l'air contenu dans les pores par de l'eau. Or l'effusivité thermique de l'eau ( $E_{\text{eau}} = 1520 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$ ) est de loin supérieure à celle de l'air ( $E_{\text{air}} = 5,58 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$ ).  $E_{\text{eau}}$  et  $E_{\text{air}}$  sont calculés respectivement à partir des propriétés de l'eau à saturation et de l'air à 1 atm à une température de 20°C (Jannot, 2010). On note par ailleurs que le taux de pouzzolane (de tailles de grains comprises entre 2-2,5mm) n'influence pas significativement l'effusivité thermique de ces matériaux.

### 3.3.1.2. Capacité thermique volumique et conductivité thermique

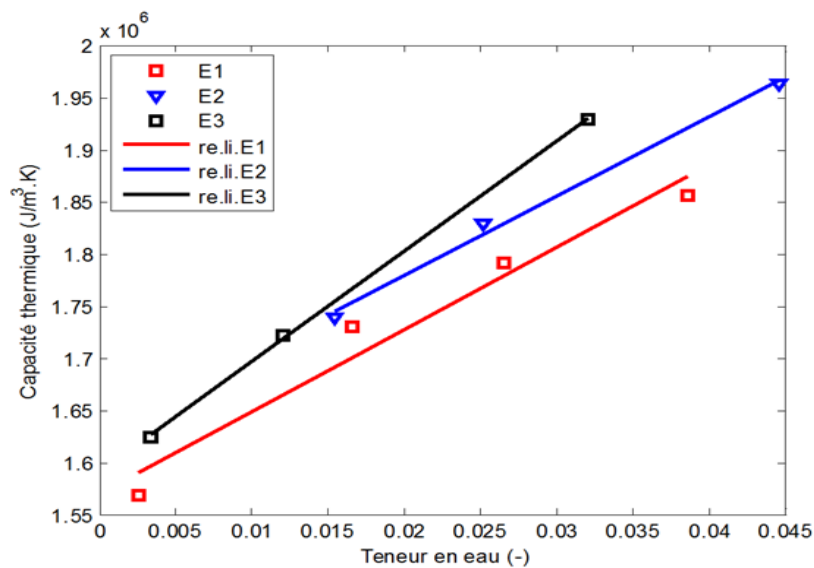


Figure 2.25: Capacité thermique volumique des briques de terre incorporant de la pouzzolane.

Les variations de la capacité thermique volumique des échantillons des matériaux étudiés en fonction de la teneur en eau sont présentées à la Figure 2.25. On note que la capacité thermique volumique augmente avec la teneur en eau. Les raisons sont celles présentées au paragraphe précédent pour expliquer l'augmentation de l'effusivité thermique avec la teneur en eau. Comme l'effusivité thermique, la capacité thermique volumique des blocs de latérite incorporant de la pouzzolane n'est pas notablement influencée lorsque le taux de pouzzolane de granularité 2/2,5 augmente.

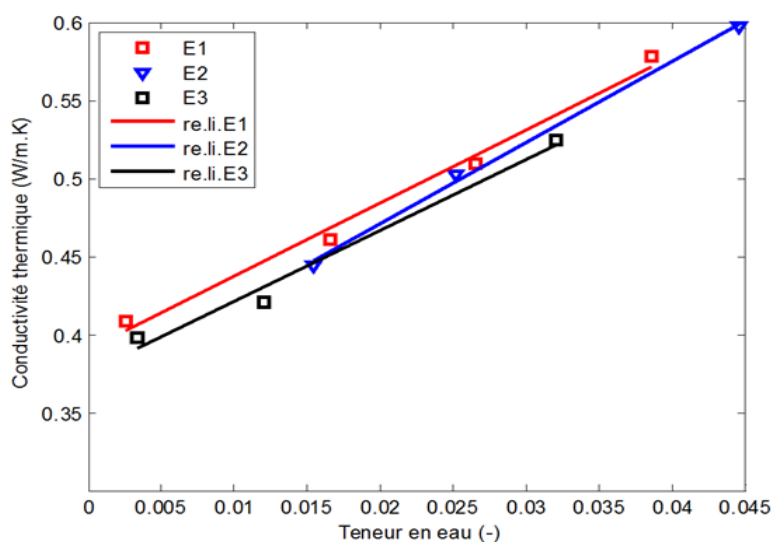


Figure 2.26: Conductivité thermique des briques de terre incorporant de la pouzzolane.

Les variations de la conductivité thermique de chaque échantillon en fonction de sa teneur en eau sont présentées à la Figure 2.26. On constate que pour chaque matériau étudié, la conductivité thermique augmente avec sa teneur en eau ; ce qui est un résultat classique dans les matériaux poreux. Cette augmentation de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en eau du matériau s'explique simplement par le fait que l'eau remplace l'air à l'intérieur des pores accessibles. Avec une conductivité thermique de l'ordre de  $3 \times 10^{-2} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , l'air est un bon isolant par rapport à l'eau qui a une conductivité thermique de l'ordre  $0,60 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  à  $20^{\circ}C$  (Jannot, 2007). On constate aussi que l'augmentation de la teneur en pouzzolane dont la taille des particules est comprise en 2 et 2,5 mm réduit très faiblement la conductivité thermique des briques.

#### 4. Etude de l'impact de la taille des grains de pouzzolane sur les propriétés thermophysiques des BTSP

##### 4.1. Préparation des échantillons

Les éprouvettes sont obtenues par compactage statique des différents mélanges de latérite, de ciment, d'eau et éventuellement de la pouzzolane au moyen d'une presse hydraulique.

#### 4.1.1. Préparation des mélanges à compacter



Figure 2.27: Différentes étapes de confection de certains échantillons.

La latérite prélevée sur le site de Mvog-Betsi est tamisée avec un tamis dont les diamètres des mailles sont égaux à 2 mm. Les passants et la pouzzolane sont placés dans une étuve où la température est fixée à 105°C pendant 24 h environ.

La masse sèche de chaque échantillon est fixée à 1,2 kg. Pour chaque éprouvette, la masse requise de latérite est initialement introduite dans une assiette. 96 g de ciment sont ensuite incorporés dans la latérite et un malaxage est fait à la main. Une fois bien homogénéisé, une masse d'eau donnée est introduite dans le mélange précédent et le malaxage est poursuivi. La pouzzolane est incorporée dans le mélange à la fin. Les différentes étapes décrites ci-dessus sont illustrées par les photos présentées sur la Figure 2.27.

Le Tableau 2.8 présente les compositions massiques des différentes éprouvettes.  $x\%G_y$  désigne l'échantillon contenant  $x\%$  d'eau (initiale) et la pouzzolane de fraction granulaire  $G_y$  ( $G_1$ ,  $G_2$  et  $G_3$  désignent respectivement les fractions granulaires 0/2,5 mm ; 2,5/5 mm et 5/10 mm).



Tableau 2.8: composition de quelques échantillons des matériaux à caractériser.

Désignation	$m_{lat.} (g)$	$\omega_{lat.} (%)$	$m_{eau} (g)$	$\omega_{eau} (%)$	$m_{pouz.} (g)$	$\omega_{pouz.} (%)$	$m_{ci.} (g)$	$\omega_{ci.} (%)$
6% $G_1$	564	47	72	6	540	45	96	8
9% $G_1$	564	47	108	9	540	45	96	8
12% $G_1$	564	47	144	12	540	45	96	8
15% $G_1$	564	47	180	14	540	45	96	8
6% $G_2$	564	47	72	6	540	45	96	8
9% $G_2$	564	47	108	9	540	45	96	8
12% $G_2$	564	47	144	12	540	45	96	8
15% $G_2$	564	47	180	14	540	45	96	8
6% $G_3$	564	47	72	6	540	45	96	8
9% $G_3$	564	47	108	9	540	45	96	8
12% $G_3$	564	47	144	12	540	45	96	8
15% $G_3$	564	47	180	14	540	45	96	8

#### 4.1.2. Compactage



Figure 2.28: Compactage statique des éprouvettes.

Une presse hydraulique automatique conçue à la base pour la fabrication des briques a été utilisée. Son moule, fait en acier, a une épaisseur importante pour supporter de très fortes pressions sans risque de se déformer. Cette presse est conçue pour exercer des pressions jusqu'à 50 bars. Elle comporte deux pistons. Le piston supérieur presse le mélange introduit à une vitesse fixée par le constructeur alors que le piston inférieur est utilisé pour démouler le bloc pressé. Sur la Figure 2.28 est présentée quelques photos de ce dispositif lors de la manipulation.

La lubrification du moule, le système de démoulage très sophistiqué et le papier placé à la tête du piston supérieur (pour éviter que de la terre ne se colle à ce dernier) ont permis d'obtenir des blocs de formes régulières ( $21 \times 9 \times e \text{ cm}^3$ ). Une photo de quelques-unes de ces éprouvettes est présentée à la Figure 2.29.



Figure 2.29: Quelques échantillons après compactage.

Par simple observation, on s'aperçoit que la répartition de la pouzzolane dans les blocs contenant 6% d'eau est significativement irrégulière. En effet, à cette teneur en eau, le mélange à compacter n'est pas bien malléable. Ainsi, au cours du malaxage, les particules les plus lourdes ont une propension à descendre au fond du récipient au détriment des plus légères qui, par contre, montent. La différence de malléabilité entre deux mélanges contenant 6% et 15% d'eau juste avant le compactage est illustrée à la Figure 2.30.



Figure 2.30: Mélange contenant 6% d'eau (à gauche) et celui contenant 15% d'eau (à droite).



### 4.1.3. Séchage

Les éprouvettes ont été séchées à température ambiante. Pour permettre la bonne prise du ciment, elles ont été emballées dans des sachets imperméables à l'air (voir Figure 2.31).



Figure 2.31: Séchage des éprouvettes.

## 4.2. Mesure des propriétés thermophysiques

Pour chaque série d'échantillons (qui ne diffèrent que par la teneur initiale en eau), seul celui présentant la plus grande masse volumique sera caractérisé. On aura ainsi à caractériser les échantillons 15%G<sub>1</sub>, 15%G<sub>2</sub> et 12%G<sub>3</sub>.

La méthode du ruban chaud utilise les éléments chauffants de très faibles largeurs (de l'ordre de 1,2 cm comme celles que nous disposons au niveau du laboratoire L3E) et n'est par conséquent pas appropriée à la caractérisation des matériaux relativement diffusifs tels que les BTS. En effet, le temps pendant lequel le transfert de chaleur dans le système reste unidirectionnel n'est pas assez long pour permettre une estimation de l'effusivité thermique des BTS. Pour pallier à cette difficulté, l'effusivité thermique est préalablement estimée par la méthode du plan chaud. Par la suite, la méthode du ruban chaud est utilisée pour estimer la conductivité thermique (l'effusivité thermique étant déjà connue).

Les méthodes symétriques exigeant deux échantillons identiques du matériau à caractériser, chaque échantillon de dimensions  $20,4 \times 9,2 \times e$  cm<sup>3</sup> a été sectionné à l'aide d'une scie de sorte à avoir deux échantillons de dimensions  $10,2 \times 9,2 \times e$  cm<sup>3</sup> chacune. Une photo de quelques échantillons sectionnés en deux est présentée à la Figure 2.32. Ces échantillons sont mis à l'étuve, à 105°C, pendant 24 heures puis ensacher hermétiquement à l'aide des plastiques en polyuréthane.



Figure 2.32: Quelques échantillons du matériau à caractériser, coupés en deux parties quasi-égales.

#### 4.2.1. Mesure de la surface utile des éléments chauffants

Un élément chauffant est un résistor de résistance connue. Sa surface utile permet d'estimer avec précision la densité de flux de chaleur qu'il dégage connaissant l'intensité de courant électrique qui le traverse. Cette valeur est celle qui permet de retrouver l'effusivité thermique d'un échantillon de PVC, connue au préalable, à partir de la méthode du plan chaud asymétrique utilisant un échantillon de polystyrène d'effusivité aussi connue. Notons que ces deux matériaux (PVC et polystyrène) ont été caractérisés au LEMTA (France) avec les méthodes flash et du plan chaud (d'élément chauffant très fin).

La Figure 2.33 présente les variations de températures au centre de l'élément chauffant obtenues expérimentalement et celles obtenues par modélisation utilisant l'aire de l'élément chauffant recherchée. On note, pour chaque élément chauffant, que la courbe des résidus est bien centrée en zéro.



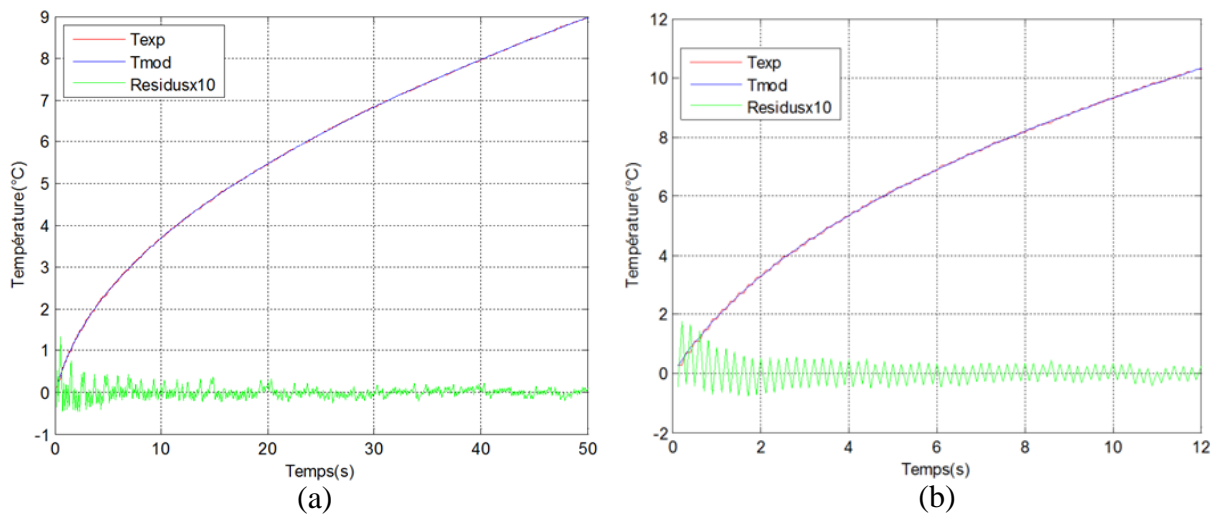


Figure 2.33: Thermogrammes expérimentaux et théoriques calculés avec les surfaces utiles des éléments chauffants des méthodes du plan chaud (a) et du ruban chaud (b).

Les valeurs des surfaces utiles des éléments chauffants sont consignées dans le Tableau 2.9. L'élément chauffant du modèle plan chaud étant carré, la longueur utile du côté s'obtient simplement en faisant la racine carrée de la surface utile. Par contre, les dimensions (largeur et longueur) utiles du ruban (de forme rectangulaire) ne peuvent pas être déduites directement de sa surface utile. A l'aide d'un pied à coulisse, nous avons mesuré sa largeur qui a été ensuite utilisée pour estimer la longueur à partir de la surface utile. Quelques paramètres utiles des deux éléments chauffants qui seront utilisés lors de la caractérisation thermophysique sont présentés dans le Tableau 2.9.

Tableau 2.9: Quelques paramètres utiles de certains éléments chauffants utilisés.

Élément chauffant	Essai	Flux (W)	Densité de flux estimée (W/m <sup>2</sup> )	Surface utile (cm <sup>2</sup> )	Largeur (cm)	Longueur (cm)
Plan chaud	1	2,500	657,68	38,012	6,165	6,165
	2	2,500	659,00	37,936	6,159	6,159
	3	2,500	649,27	38,504	6,205	6,205
	Moyenne		655,32	<b>38,151</b>	<b>6,177</b>	<b>6,177</b>
Ruban chaud	1	1,728	1540,31	11,219	1,2*	9,349
	2	1,200	1054,07	11,384	1,2*	9,487
	3	1.200	1045,99	11,472	1,2*	9,560
	Moyenne		1213,56	<b>11,358</b>	<b>1,2*</b>	9,465

\* valeur obtenue par mesure à l'aide d'un pied-à-coulisse

#### 4.2.2. Méthode de mesure, résultats et discussions

La méthode du plan chaud symétrique avec des échantillons supposés semi-infinis est utilisée pour mesurer l'effusivité thermique des échantillons. La Figure 2.34a présente les thermogrammes expérimental et simulé (avec la valeur de l'effusivité thermique estimée) pour

l'échantillon 12%G<sub>1</sub>. La courbe de résidus montre que les deux thermogrammes sont assez analogues. La Figure 2.34b présente les sensibilités de SR<sub>c</sub>, rho.c et E à la température.

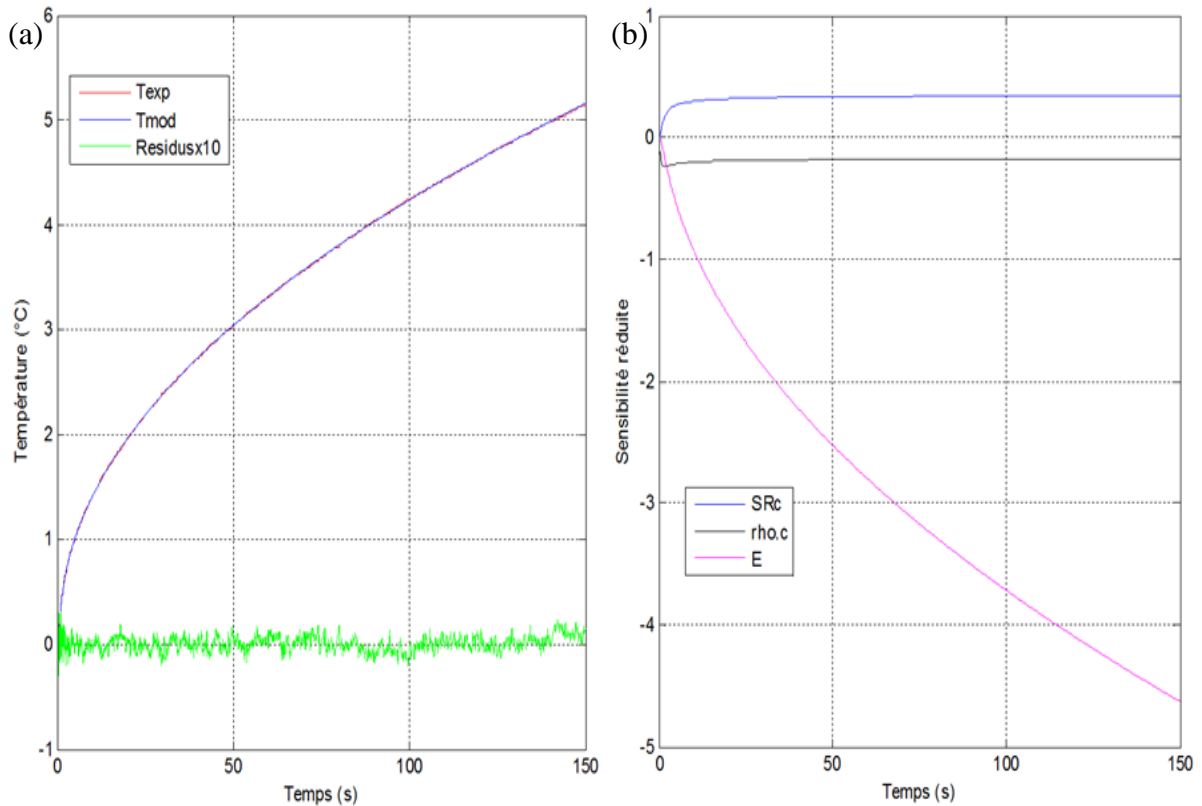


Figure 2.34: courbe expérimentale et courbe simulée à partir du modèle plan chaud symétrique (à gauche) et sensibilités de SR<sub>c</sub>, rho.c et E à la température (à droite).

Il ressort de ces courbes que la sensibilité de l'effusivité thermique à la température est suffisamment importante et décorrélée de celle de SR<sub>c</sub> et rho.c pour permettre une estimation précise de SR<sub>c</sub>, rho.c et E. La valeur de l'effusivité thermique obtenue par la méthode précédente est consignée dans le Tableau 2.10.

Pour chaque échantillon, une première valeur de la conductivité thermique est obtenue avec un modèle simplifié. Ce modèle rudimentaire est celui qui suppose qu'aux temps longs, les thermogrammes ruban chaud et fil chaud sont conformes. La méthode utilisée pour estimer la conductivité thermique avec la méthode du fil chaud est alors appliquée. En effet, après un temps suffisamment long, la courbe donnant les variations de températures en fonction du logarithme népérien du temps est assimilable à une droite dont la pente  $\beta$  s'exprime par la relation :

$$\beta = \frac{2b\phi}{4\pi\lambda} \quad [2.32]$$

où  $\phi$  est la densité de flux de chaleur dissipée par l'élément chauffant,  $\lambda$  la conductivité thermique de l'échantillon et  $b$  la moitié de la largeur de l'élément chauffant (0,6 cm).

La mesure de  $\beta$  permet de calculer la conductivité thermique  $\lambda$  via la formule ci-dessus. Pour l'échantillon 12%G<sub>1</sub>, la courbe  $T_{exp} = f(\ln t)$  et la droite de régression linéaire de  $T_{exp}$  et de  $\ln t$  (pour  $t$  suffisamment élevé) du thermogramme ruban chaud sont données à la Figure 2.35. On note que la droite de régression linéaire et  $T_{exp} = f(\ln t)$  sont presque confondues aux temps longs (au-delà de 120 s), condition nécessaire à une estimation précise de la conductivité thermique.

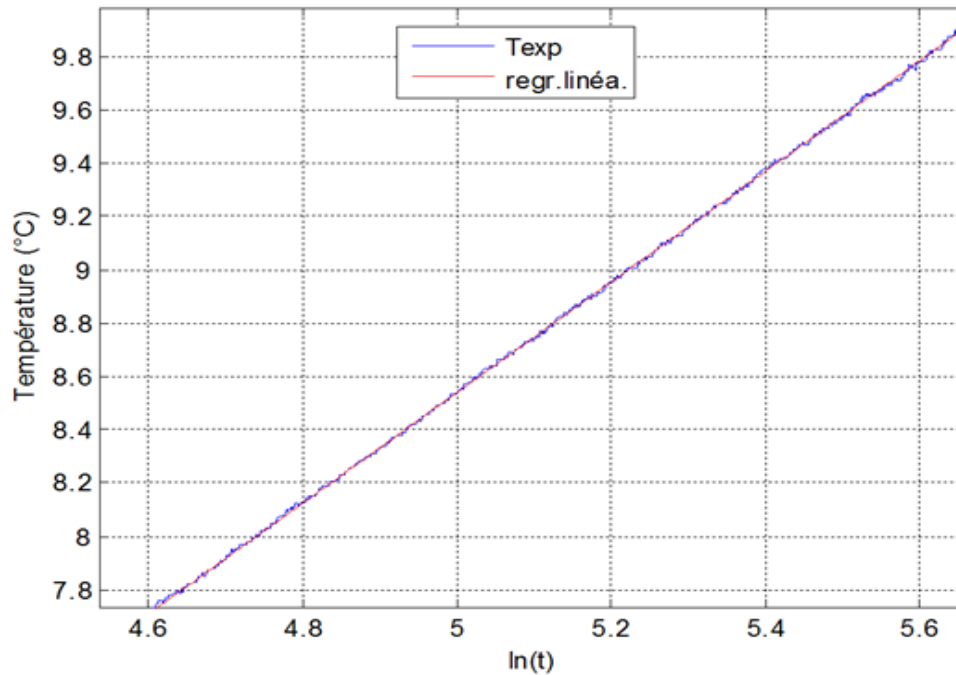


Figure 2.35: courbe  $T_{exp}=f(\ln(t))$  et droite de régression linéaire de  $T_{exp}$  et de  $\ln(t)$ .

La conductivité thermique de l'échantillon 12%G<sub>1</sub> évaluée avec cette méthode est de 0,618 W/m<sup>2</sup>K. Celles des autres échantillons sont consignées dans le Tableau 2.10.

La méthode du ruban chaud complète est ensuite utilisée pour déterminer la conductivité thermique de l'échantillon considérée. La Figure 2.36(a) présente la courbe expérimentale, la courbe simulée avec les paramètres estimés et la courbe de résidus du ruban chaud appliqué à l'échantillon 12%G<sub>1</sub>. Une bonne concordance entre les thermogrammes expérimental et théorique est observée. Les courbes de sensibilité de  $\lambda$ ,  $SR_c$  et  $\rho_c$  à la température au centre du ruban sont présentées à la Figure 2.36 b. Le temps pendant lequel la sensibilité de la conductivité thermique  $\lambda$  à la température reste nulle est très faible (environ 6s) montrant que l'estimation de l'effusivité thermique à partir du thermogramme du ruban chaud (dans le cas d'espèce : élément chauffant de largeur 1,2 cm et échantillon en BTS) est irréalisable. C'est la raison pour laquelle l'effusivité thermique a été estimée en amont via la méthode du plan chaud.

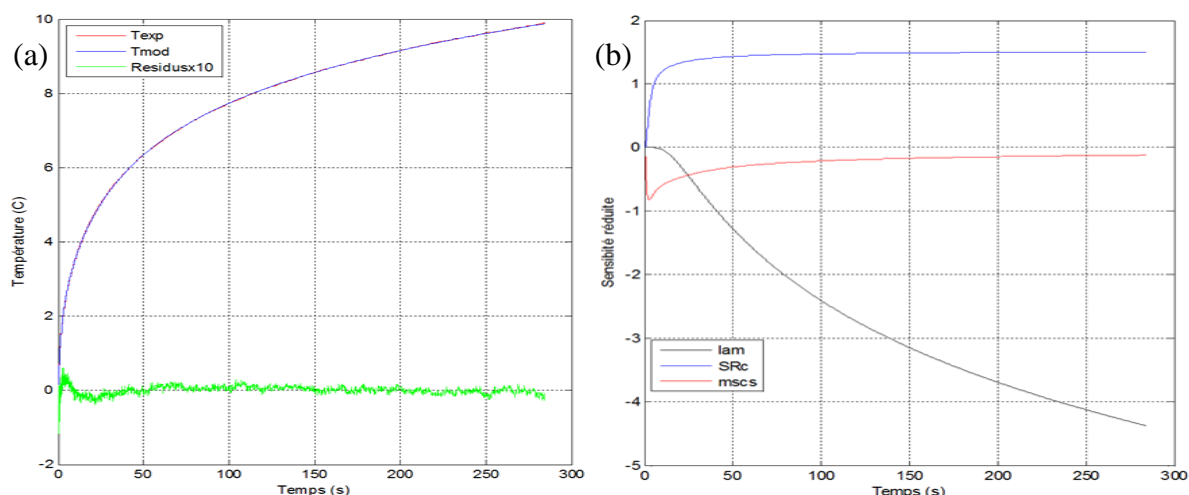


Figure 2.36: courbe expérimentale et courbe simulée par le modèle ruban chaud symétrique (à gauche) et sensibilités de  $SR_c$ ,  $\rho.c$  et  $\lambda$  à la température (à droite).

Les sensibilités des paramètres  $SR_c$ ,  $\rho.c$  et  $\lambda$  à la température sont suffisamment élevées et il n'existe pas de corrélation entre elles. Une estimation de ces paramètres en cherchant leurs valeurs qui minimisent la somme des écarts quadratiques entre les températures expérimentales et théoriques s'est donc faite avec précision. La valeur de la conductivité thermique de l'échantillon 12%G<sub>1</sub> ainsi obtenue est consignée dans le Tableau 2.10.

La même méthodologie est appliquée aux autres échantillons à caractériser et les résultats de l'effusivité thermique et de la conductivité thermique sont consignés dans le Tableau 2.10. Dans ce tableau se trouvent également les valeurs de la conductivité thermique des échantillons obtenues avec le modèle simplifié (celui qui suppose qu'aux temps longs, le thermogramme ruban chaud et le thermogramme fil chaud sont conformes).

Tableau 2.10: Conductivité thermique et effusivité thermique des échantillons.

Paramètres		$\rho$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	E ( $Jm^{-2}K^{-1}s^{-1/2}$ )	$\lambda_1$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$\lambda_2$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Déviaton $\frac{ \lambda_2 - \lambda_1 }{\lambda_2}$
Méthode de mesure		Produit $L \times l \times e$	Plan chaud symétrique	Ruban chaud symétrique : modèle simplifié	Ruban chaud symétrique: modèle complet	
L	15%L	1568	841	0,555	0,559	0,76%
G1	12%G <sub>1</sub>	1761	907	0,615	0,625	1,6%
G2	15%G <sub>2</sub>	1630	817	0,554	0,569	2,63%
G3	15%G <sub>3</sub>	1481	771	0,505	0,528	4,36%

On note que les conductivités thermiques obtenues via les deux modèles sont assez proches (déviaton inférieure à 5%). On note également que la conductivité thermique des BTS décroît avec la taille des grains de pouzzolane qui y est incorporée. Lorsque la taille de particule de pouzzolane passe de 0/2,5 à 5/10, la conductivité thermique des BTS résultant peut diminuer

de 17%. L'incorporation de la pouzzolane de dimensions de grains relativement faible (0/2,5) dans les BTS dans l'optique d'améliorer leurs propriétés isolantes est déconseillée.

## 5. Propriétés thermophysiques du parpaing de pouzzolane

La pouzzolane peut être utilisée comme matériau de base à la confection des parpaings, au lieu du sable. Dans cette partie, les propriétés thermophysiques des parpaings de pouzzolane sont mesurées et comparées à celles du parpaing de sable (parpaing conventionnel).

### 5.1. Préparation des échantillons

Les échantillons des matériaux à caractériser sont obtenus par moulage dans les moules de dimensions  $10 \times 10 \times 3 \text{ cm}^3$ . Une fois le mélange (ciment+pouzzolane/ciment) introduit dans le moule, l'ensemble est vibré 15 s durant (via une table de vibration) et conservé dans le moule. Après 24 heures, l'échantillon est démoulé, pesé et emballé dans un sachet en polyuréthane et exposé aux conditions de l'ambiance pendant 28 jours. La composition des mélanges est donnée dans le Tableau 2.11. La Figure 2.37 présente une photo de ces échantillons.

Tableau 2.11: Composition des mortiers de pouzzolane noire, de pouzzolane rouge et de sable.

Matériaux	Ci (g)	PZ(g)	Sable (g)	Eau (l)	Eau/Ci
PZN 1mm	100	500	-	0,1	1
PZR 1mm	100	500	-	0,1	1
Sable 1 mm	100	-	375*+125**	0.1	1

Ci : ciment ; PZN : pouzzolane ; PZR : pouzzolane rouge ; \* : sable « gros grains » ; \*\* : sable « fin »



Figure 2.37: Echantillon de parpaing de sable (à gauche), de pouzzolane noire (au centre) et de pouzzolane rouge (à droite).

La méthode du plan chaud asymétrique est utilisée pour mesurer les propriétés thermophysiques de ces matériaux. Les différentes étapes de la mesure sont celles décrites à la section 3.

## 5.2. Résultats et discussion

La Figure 2.38 présente les variations de la capacité thermique volumique des parpaings de pouzzolane et de sable en fonction de leur teneur en eau. Il apparaît que la capacité thermique volumique ( $\rho c_p$ ) de chacun des échantillons augmente avec la teneur en eau comme dans le cas des matériaux étudiés ci-dessus. Par ailleurs on note que pour toutes les teneurs en eau,  $\rho c_p$  du parpaing de pouzzolane (« PZN1mm ou PZR1mm ») est supérieur à celui du parpaing de sable (« Sand 1mm »). A l'état anhydre par exemple, la valeur de  $\rho c_p$  de « PZN1mm » est supérieure à celle de « Sand 1mm » d'environ 7%. A épaisseurs égales, les murs de parpaings de pouzzolane présenteront une inertie thermique plus importante que celle des murs de parpaings de sable.

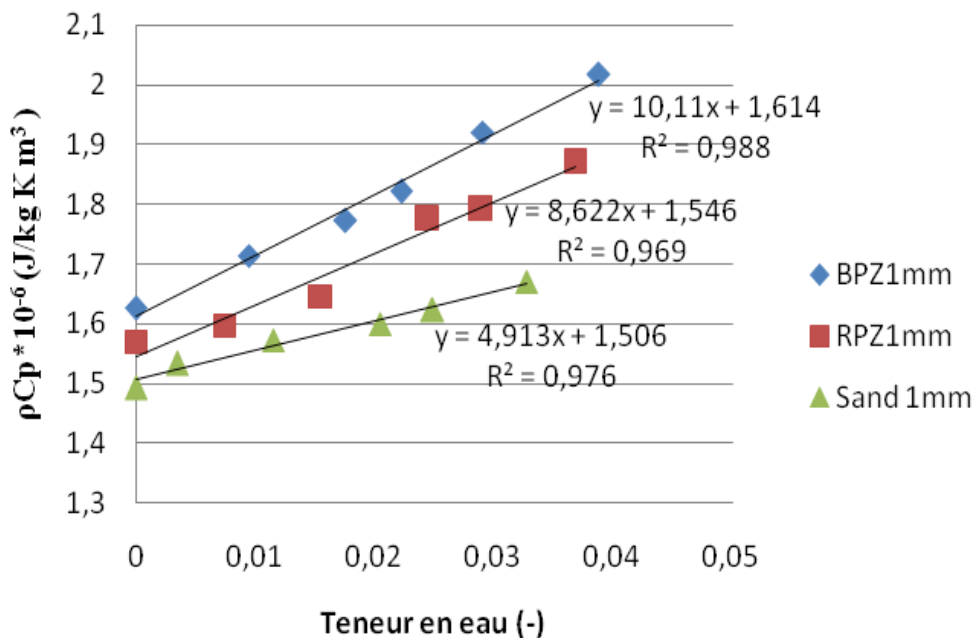


Figure 2.38: Capacité thermique volumique des parpaings de sable et de pouzzolane en fonction de la teneur en eau.

La Figure 2.39 montre l'évolution de la conductivité thermique des deux matériaux étudiés dans cette section en fonction de leur teneur en eau. Il apparaît que le parpaing de pouzzolane est significativement plus isolant que le parpaing de sable, matériau conventionnel couramment utilisé dans la construction des maisons modernes au Cameroun et dans la plupart de pays subsaharien. A une teneur en eau de 2% par exemple, un mur de parpaings de pouzzolane noire de 15 cm d'épaisseur présentera une résistance thermique de 0,22  $m^2K/W$  soit 1,53 fois plus grande que celle présentée par un mur de parpaings de sable de même épaisseur.

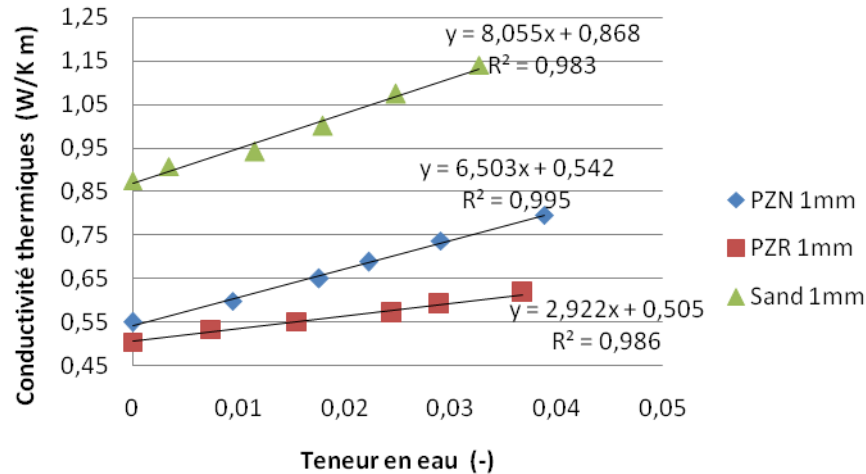


Figure 2.39: Conductivité thermique des parpaings de pouzzolane et de sable en fonction de la teneur en eau.

L'utilisation des parpaings de pouzzolane en lieu et place de parpaings de sable dans un bâtiment contribuerait à la réduction de la charge de climatisation.

### Conclusion

Le but de ce chapitre était de faire une brève revue de littérature sur les différentes méthodes de caractérisation thermophysique des matériaux solides afin de choisir, en fonction du matériel disponible au niveau de notre laboratoire, les méthodes les mieux adaptées à l'étude de l'influence de la granularité et de la teneur de la pouzzolane incorporée dans les briques en latérite compressée et stabilisée au ciment sur leurs propriétés thermophysiques. La méthode du plan chaud asymétrique complète a été choisie pour l'étude de l'influence de la teneur en pouzzolane en fonction de la teneur en eau. L'étalonnage a été faite en retrouvant les propriétés du PCV connues à l'avance avec une erreur relative de 1%, 2% et 5.6% respectivement sur la mesure de l'effusivité, de la capacité thermique volumique et de la conductivité thermique. Si la teneur en eau influence considérable la conductivité et l'effusivité thermique des matériaux, l'impact de la teneur en pouzzolane sur ces propriétés n'est pas significatif. Les méthodes du plan chaud symétrique et ruban chaud symétrique ont été utilisées pour l'étude de l'impact de la fraction granulaire de la pouzzolane sur les propriétés thermophysiques des briques à l'état anhydre. Les résultats montrent que la conductivité thermique des BTSP peut diminuer de 17% lorsque la taille des grains de pouzzolane passe de 0/2,5 à 5/10. Pour profiter significativement du caractère cavernueux et par conséquent isolant de la pouzzolane intégrée dans les briques de terre, la taille des grains de pouzzolane doit être relativement grande (5-10mm). L'étude comparative des propriétés thermophysiques du parpaing de pouzzolane et du parpaing de sable (matériau conventionnel) a été faite. Les résultats ont montré entre autres que la conductivité thermique du parpaing de pouzzolane est plus faible que celle du parpaing conventionnel de 42% (à une teneur en eau de 0%). Dans le chapitre suivant, la performance thermique de quelques murs multicouches contenant ou non une couche en blocs de latérite incorporant de la pouzzolane est étudiée.



## **Chapitre 3 : Modélisation du comportement thermique dynamique d'un local et études numériques**

### **Introduction**

L'enveloppe de bâtiment est l'interface entre les ambiances intérieure et extérieure. Le milieu extérieur est sujet aux variations climatiques alors que la température, l'humidité, etc. du milieu interne doivent rester dans certaines limites afin d'assurer le confort thermique des occupants. L'enveloppe de bâtiment est ainsi le siège des transferts de chaleur et de masse qui influencent le niveau de confort interne ou la quantité d'énergie consommée pour garantir ce confort thermique. Le mur le plus performant est celui qui contribue le mieux à l'amélioration du confort thermique ou à la réduction de la consommation énergétique du bâtiment. Dans ce chapitre, une investigation est menée pour déterminer la distribution et les positions relatives des différentes couches d'un mur composite qui contribuent le mieux à la réduction de la consommation d'énergie du bâtiment. Les protections solaires et certains objets environnants permettent de réduire le flux de rayonnement solaire (principalement la composante directe) qui pénètre à l'intérieur du bâtiment (à travers les ouvertures) ou tombe sur la surface externe de l'enveloppe. L'impact des ombres portées de ces objets environnants qui obstruent le rayonnement solaire (direct et/ou diffus) sur le dimensionnement du niveau d'isolation des murs est aussi analysé dans ce chapitre. Les paramètres climatiques externes utilisés dans cette étude numérique sont ceux des villes de Garoua et Douala au Cameroun.

### **1. Présentation de l'outil de simulation utilisé**

#### **1.1. Généralité sur HAM-tools**

HAM-tools (Heat, Air and Moisture Toolbox) consiste en une bibliothèque de composants développés dans l'environnement de simulation Matlab-Simulink. Le bâtiment est décrit comme un assemblage de différents composants (parois, zones, systèmes, etc.), chacun étant composé de modules plus élémentaires. Une paroi se décompose en plusieurs couches. Chaque couche, constituée d'un matériau unique, comporte plusieurs nœuds. La bibliothèque d'HAM-tools permet d'utiliser aussi bien ces modules élémentaires que les composants plus complexes.

Le modèle est de type intermédiaire à fin. Les parois sont décrites en une dimension. Plusieurs zones peuvent être définies. Les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité (vapeur et liquide) sont déterminés, en conditions dynamiques, et en prenant en compte des propriétés de matériaux dépendant des conditions de température et/ou d'humidité.

Différents modèles de parois prédéfinies existent (cloison, mur extérieur, vitrage), chacune ayant une composition et un maillage particulier. Une bibliothèque de matériaux est disponible, issue principalement des travaux de l'annexe 24 de l'AIE, et peut être étendue ou modifiée par l'utilisateur. Les propriétés des matériaux sont :



- la densité sèche ;
- la capacité thermique volumique sèche ;
- la conductivité thermique en fonction de la température et de l'humidité ;
- la perméabilité à la vapeur en fonction de l'humidité ;
- la courbe de sorption;
- la conductivité liquide en fonction de l'humidité ;
- l'émissivité thermique ;
- l'absorptivité solaire.

La conductivité est définie comme une fonction linéaire de la température et/ou de l'humidité  $\lambda(T, w) = \lambda_0 + aT + bw$  ; les caractéristiques hygriques sont tabulées, et interpolées linéairement entre deux valeurs connues.

Des charges internes (dégagement de chaleur et de vapeur), dues à une occupation du bâtiment, à son éclairage, au fonctionnement des appareils, etc. peuvent être prises en compte dans le bilan thermique de la zone d'air. La bibliothèque de systèmes (chauffage/refroidissement, renouvellement d'air) est relativement réduite : seuls quelques systèmes simples sont définis. Le système de chauffage/refroidissement est un régulateur PI (action proportionnelle-intégrale) qui est une combinaison d'un régulateur P et d'un régulateur I

Un module de lecture de données climatiques permet à l'utilisateur de définir ses propres sollicitations ; les données requises sont :

- la température d'air ;
- la température de rosée (éventuellement) ;
- la densité de flux de rayonnement global sur une surface horizontale ;
- la densité de flux de rayonnement diffus sur une surface horizontale ;
- la densité de flux de rayonnement direct sur une surface normale à l'incidence solaire;
- la densité de flux de rayonnement grandes longueurs d'ondes sur une surface horizontale;
- la vitesse et la direction du vent (éventuellement).

A l'aide de ces données, HAM-tools dispose d'un module qui calcule le rayonnement reçu sur les parois du bâtiment, en fonction de la latitude et de la longitude du site, de l'heure, de l'inclinaison et de l'orientation de chaque paroi.

En effet, le rayonnement global sur une surface inclinée est donné par l'expression suivante :

$$I_t = R_b I_b + R_d I_d + R_r I \cdot \rho_r \quad [3.1]$$

où  $I_b$ ,  $I_d$  et  $I$  sont respectivement le rayonnement solaire direct, diffuse et global sur une surface horizontale ;  $\rho_r$  est le coefficient de réflectivité du sol pris égale 0,2 dans ce travail ;

$R_b$  et  $R_r$  sont les facteurs de conversion des rayonnements direct et réfléchi. Ils sont donnés tant pour le modèle isotrope qu'anisotrope par les relations suivantes :

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad [3.2]$$

et

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [3.3]$$

où  $\theta$  est l'angle d'incidence des rayons solaires directs sur la surface considérée ;  $\theta_z$  est l'angle zénithal et  $\beta$  est l'angle d'inclinaison de la surface en question.  $\beta$  est égale à  $90^\circ$  pour les murs verticales.

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad [3.4]$$

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad [3.5]$$

où  $\delta$ ,  $\phi$  et  $\omega$  sont respectivement la déclinaison, la latitude et l'angle horaire ;  $\gamma$  est l'angle azimutal de la surface considérée. Les valeurs de  $\gamma$  sont  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $180^\circ$  respectivement pour les murs est, sud, nord et ouest.

Le facteur de conversion de la radiation diffuse diffère selon le type de modèle utilisé (isotrope ou anisotrope). Le modèle anisotrope de Perez est utilisé dans cette étude pour déterminer la fraction diffuse du rayonnement solaire sur les parois. Les détails sur ce modèle se trouvent dans Perez et al. (1990).

L'expression du rayonnement total reçu par une paroi oblique obtenue ci-dessus ne tient pas compte des ombres portées des objets environnants. Ceux-ci interceptent une portion relativement importante de rayonnement solaire, surtout la fraction directe. Ce phénomène est pris dans cette étude de façon simplifiée. En effet,  $I_t$  est tout simplement multiplié par un facteur  $f$  tel que :

$$f = 1 - \frac{sd}{100} \quad [3.6]$$

$sd$  désigne le pourcentage du rayonnement solaire global obstrué. Le facteur  $f$  peut aussi être appliqué uniquement sur la composante directe du rayonnement solaire.

Le choix de cet outil de simulation est motivé par le fait que :

- c'est un logiciel ouvert, c'est-à-dire que l'ensemble des chercheurs est appelé à contribuer à son développement, pourvu que le but poursuivi soit la recherche ou l'éducation. Il est disponible au téléchargement à l'adresse [http : //www.ibpt.org](http://www.ibpt.org). Sa structure permet ainsi à l'utilisateur de modifier ou d'étendre le modèle à sa guise ;
- sa structure modulaire en fait un outil très souple d'utilisation ;
- l'écriture du modèle est « transparente », c'est-à-dire que l'utilisateur a accès à la fois aux équations de base utilisées, à la description du maillage des parois, ou encore à la définition des échanges surfaciques ;
- la documentation, à la fois sur ses principes de fonctionnement et son utilisation pratique, est détaillée et accessible aisément (Kalagasidis cité par Piot, 2009).

## 1.2. Transfert de chaleur dans la paroi

Le transfert de masse n'est pas pris en compte dans cette étude. Quelques hypothèses simplificatrices retenues pour l'écriture de H-tools et l'équation de transfert de chaleur dans une paroi sont présentées ci-dessous :

- le modèle est écrit en supposant le transfert de chaleur unidirectionnel ;
- le contact entre deux matériaux est supposé parfait (c'est-à-dire qu'il ne présente aucune résistance au transfert de chaleur);
- pour une épaisseur élémentaire  $dx$ , la variation spatiale de conductivité est supposée négligeable :

$$\frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \ll \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad [3.7]$$

Ainsi, dans H-tools, l'équation régissant le transfert de chaleur dans la couche  $j$  d'une paroi multicouche (comme schématisée à la Figure 3.1) s'écrit :

$$c_j \rho_j \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda_j \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad [3.8]$$

où  $c_j$ ,  $\rho_j$  et  $\lambda_j$  désignent respectivement la chaleur massique, la masse volumique et la conductivité thermique de la  $j^{\text{ième}}$  couche du mur.

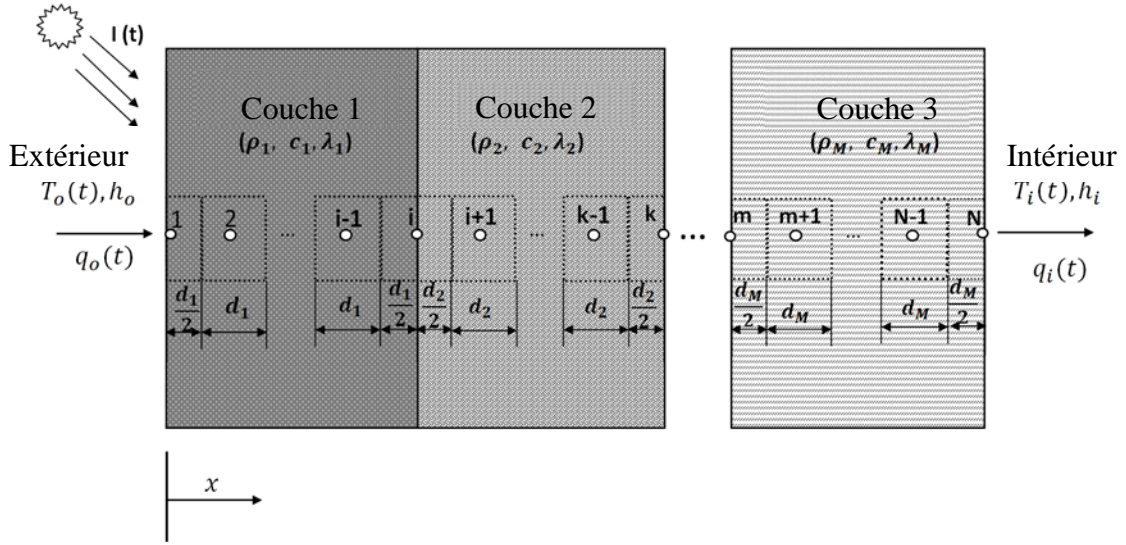


Figure 3.1: Mur multicouche avec les conditions aux limites et le maillage.

La densité de flux radiatif incident sur la surface extérieure s'écrit :

$$q_{ext} = \alpha I_t + \epsilon(E_{GLO} - \sigma_0 T_{x=0}^4) \quad [3.9]$$

où  $E_{GLO}$  est la densité du flux du rayonnement de grandes longueurs d'ondes sur la surface considérée,  $\sigma_0$  la constante de Stefan-Boltzmann,  $\alpha$  et  $\epsilon$  désignent respectivement absorptivité solaire et émissivité de la surface.

Le bilan des flux thermiques à la surface extérieure s'écrit alors :

$$-\lambda_1 \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x_1=0} = h_{c,ext}(T_0 - T_{x=0}) + \alpha I_t + \epsilon(E_{GLO} - \sigma_0 T_{x=0}^4) \quad [3.10]$$

où  $\lambda_1$  est conductivité thermique de la couche externe du mur,  $h_{c,ext}$  le coefficient d'échange convectif sur la face extérieure.

La densité de flux radiatif sur la face intérieure du mur  $i$  est donnée par :

$$q_{int,i} = h_{r,int}(\overline{T_{surf}} - T_{x=L}) \quad [3.11]$$

où  $\overline{T_{surf}}$  représente la température moyenne de l'ensemble des surfaces en présence,  $h_{c,int}$  est le coefficient d'échange convectif sur la surface intérieure,  $h_{r,int}$  est le coefficient d'échange radiatif. Il est pris constant et égal à  $6 \text{ W/m}^2\text{K}$  dans cette étude (Kalagasidis, 2003).

Le bilan des flux de chaleur à la surface intérieure s'écrit alors :

$$-\lambda_M \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h_{c,int} (T_{int} - T_{x=L}) + h_{r,int} (\overline{T}_{surf} - T_{x=L}) \quad [3.12]$$

En l'absence des données sur le rayonnement de grandes longueurs d'ondes, la forme simplifiée de l'équation [3.12] est utilisée. Elle est donnée par la relation :

$$-\lambda_1 \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x_1=0} = h_o (T_o - T_{x=0}) + \alpha I_t \quad [3.13]$$

où  $h_o$  désigne le coefficient d'échange radiatif et convectif combiné à la surface extérieure. Dans cette étude,  $h_o = 22 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Daouas, 2011).

Dans le cas où le bâtiment est continuellement climatisé, nous avons supposé que la température moyenne de l'ensemble des surfaces délimitant la zone est égale à la température de l'air interne. Ainsi, la condition limite à la surface interne du mur s'écrit :

$$-\lambda_M \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h_i (T_{int} - T_{x=L}) \quad [3.14]$$

où  $h_i$  désigne le coefficient d'échange radiatif et convectif combiné à la surface intérieure. Dans cette étude,  $h_i$  est considéré constant et égale à  $9 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Daouas, 2011).

Le schéma de résolution est de type explicite, la résolution est faite par l'un des solveurs de Matlab, à pas de temps variable. Le modèle est écrit aux volumes finis. Pour une maille intérieure au matériau de largeur  $d_i$  (Figure 3.1), le bilan thermique (numérique) au nœud  $i$  s'écrit :

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{1}{\rho_i c_i d_i} \left( \frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{R_{i-1} + R_i} + \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{R_{i+1} + R_i} \right) \quad [3.15]$$

Les résistances thermiques  $R_i$  sont données par la relation :

$$R_i = \frac{d_i}{2\lambda_i} \quad [3.16]$$

où  $\lambda_i$  est la conductivité thermique de la couche du mur dans laquelle la maille considérée se trouve.

Les bilans thermiques (numériques) aux nœuds de surfaces extérieure et intérieure sont donnés respectivement par les relations suivantes :

$$\frac{T_1^{n+1} - T_1^n}{\Delta t} = \frac{1}{\rho_i c_i d_{out}} \left( \frac{T_2^n - T_1^n}{R_2 + R_1} + q_{ext} \right) \quad [3.17]$$

$$\frac{T_N^{n+1} - T_N^n}{\Delta t} = \frac{1}{\rho_i c_i d_{in}} \left( \frac{T_{N-1}^n - T_N^n}{R_{N-1} + R_N} + q_{int} \right) \quad [3.18]$$

### 1.3. Modèle de zone

La zone est définie comme un volume d'air homogène en pression et en température fermé par des parois. Elle est modélisée par un nœud de calcul où les bilans énergétiques, hydriques et aérodynamiques sont faits. En cas d'absence de charges internes et de ventilation, la température de ce volume d'air vérifie l'équation suivante.

$$\rho_a c_{p_a} V \frac{dT_{in}}{dt} = \sum_i h_{c_i} (T_{s_i} - T_a) \quad [3.19]$$

avec :

- $V$  : le volume de l'air de la zone ;
- $\rho_a$  : la masse volumique de l'air ;
- $c_{p_a}$  : la chaleur massique de l'air ;
- $h_{c_i}$  : le coefficient d'échange convectif ;
- $T_{s_i}$  : la température de la surface  $i$  ;
- $T_a$  : la température de l'air.

## 2. Modélisation du local

Un simple local est utilisé pour étudier la performance thermique des murs. Un seul mur est ouvert à l'extérieur et les autres sont supposés être les murs de partition. Ces murs de partition, le plafond et le plancher sont adiabatiques car les températures de l'air dans les zones adjacentes sont supposées être égales à celle de l'air dans la zone étudiée.

A l'aide des composantes de H-tools, un modèle thermique du local décrit ci-dessus à été réalisé dans l'environnement de simulation des systèmes dynamiques Simulink. Il se compose au total d'une zone, de 6 parois, d'un système de chauffage/refroidissement et du module de traitement des paramètres climatiques. La Figure 3.2 présente une capture de l'écran de l'ordinateur montrant le modèle obtenu pour le cas où le mur extérieur est orienté dans la direction sud.

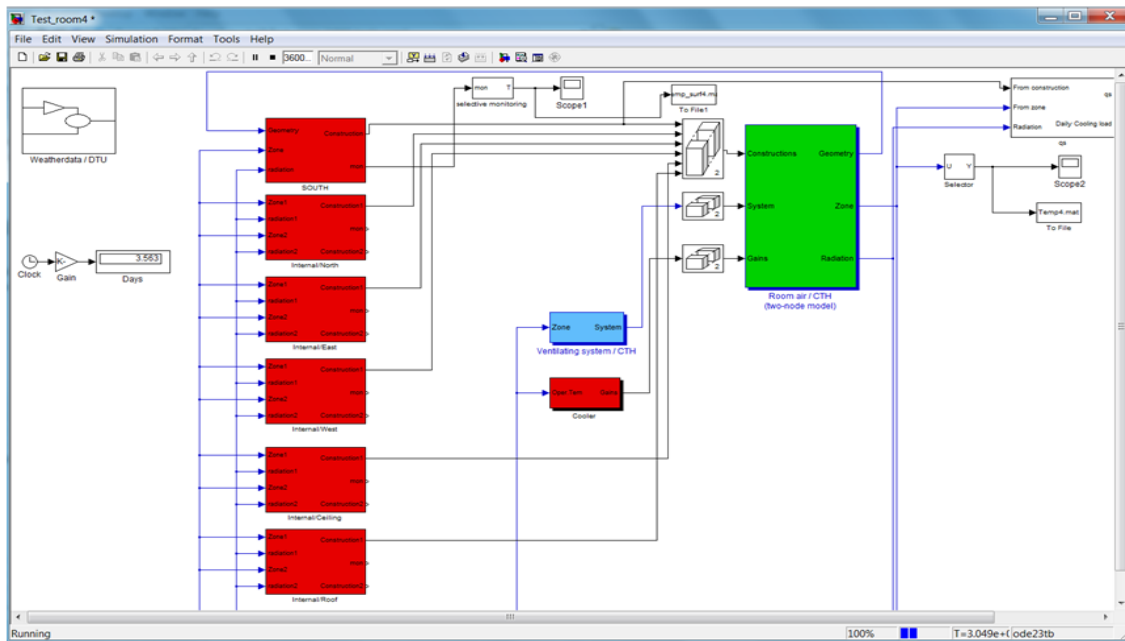


Figure 3.2: Capture de l'écran de l'ordinateur lors d'une simulation.

### 3. Validation du modèle

#### 3.1. Validation à l'échelle de la paroi

La validation de ce modèle de transfert de chaleur dans une paroi a été faite par comparaison des résultats à ceux de Match, modèle déjà validé. Avec les mêmes conditions aux limites et initiale, les variations de température en plusieurs points de deux murs (l'un en béton et l'autre en laine minérale) simulées à partir des deux codes (Simulink et Match) sont présentées à la Figure 3.3 (Nielsen et al., 2002).

Il ressort de ces figures qu'il y a une bonne concordance entre les résultats de calcul de Match et ceux de Simulink.

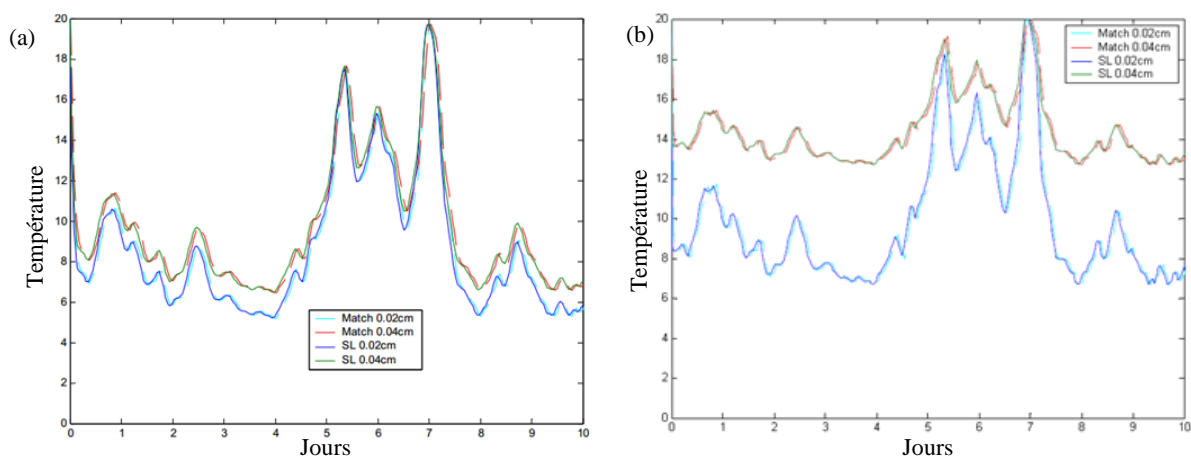


Figure 3.3: Variations de température à l'intérieur de la paroi en béton (a) et en laine de roche (b). Comparaison des résultats obtenus avec Match et Simulink (Nielsen et al., 2002).

### 3.2. Validation à l'échelle du bâtiment

Les résultats du modèle de bâtiment construit dans l'environnement de simulation des systèmes dynamiques, Matlab/Simulink à partir des composantes de la library H-tools sont confrontés dans cette étude à ceux obtenus numériquement à partir d'EnergyPlus et expérimentalement par Samri (2008). Les calculs sont faits dans les conditions climatiques de Garoua et les conditions limites sont identiques. Il importe de donner une brève description d'EnergyPlus.

#### 3.2.1. EnergyPlus : description

Le choix d'EnergyPlus pour la validation du modèle construit dans Matlab/Simulink a été motivé par le fait qu'il est gratuit au téléchargement et donc facilement accessible au grand public. Dans EnergyPlus, Il est possible de résoudre numériquement les équations régissant le transfert de chaleur dans les parois avec la méthode des différences finies ou la méthode des fonctions de transfert. Dans ce travail, notre choix s'est porté sur la méthode des différences finies. En effet, il a été démontré que la méthode des fonctions de transfert n'est pas appropriée lorsque les parois sont faites en matériaux massifs (Collet et al., 2006) ; ce qui est le cas dans cette étude.

Le bilan énergétique de la zone permet d'écrire :

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{\theta}_i + \sum_{i=1}^{N_{surf}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad [3.20]$$

où :

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{\theta}_i$  est la somme des flux de chaleur provenant des charges internes (occupation, systèmes de chauffage et/ou de refroidissement, éclairage, fonctionnement de tout autre appareils, etc.) ;

$\sum_{i=1}^{N_{surf}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  est le bilan des flux convectifs échangés entre les parois et la zone ;

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$  est la bilan enthalpique des différentes infiltrations ;

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  est la quantité d'énergie stockée par unité de temps par l'air contenu dans la zone ;

$\dot{Q}_{sys}$  est la différence entre les enthalpies d'air entrant et sortant à travers le système de ventilation.

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{four} - T_z) \quad [3.21]$$

avec  $T_{four}$  la température de l'air fourni à la zone,  $\dot{m}_{sys}$  le débit d'air échangé par le système de ventilation.

L'équation différentielle régissant le transfert de chaleur dans une paroi est résolue numériquement en utilisant la méthode des différences finies. Le schéma de résolution est de type implicite dans les récentes versions d'EnergyPlus (à partir de la version 7) comme celle utilisée dans cette étude.



Quatre types de nœud sont définis dans EnergyPlus : le nœud de surface intérieure, le nœud interne (à l'intérieur d'une couche de mur), le nœud de l'interface (à la surface de contact entre deux couches du mur composite) et le nœud de surface extérieure (Figure 3.4).

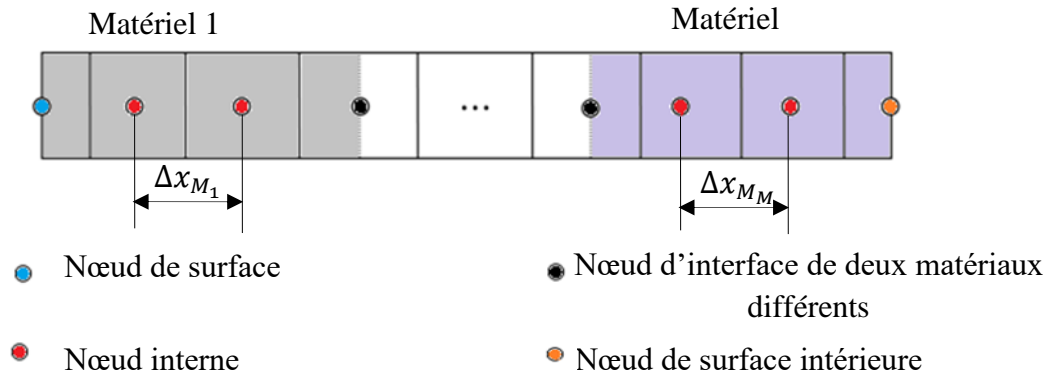


Figure 3.4: Maillage dans EnergyPlus.

La formulation implicite pour un nœud interne  $i$  est donnée par l'équation suivante :

$$C_P \rho \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left\{ \lambda_W \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + \lambda_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right\} + \lambda_W \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} + \lambda_E \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \quad [3.22]$$

où  $T$  est la température;  $i$ ,  $i + 1$  et  $i - 1$  désignent respectivement le nœud considéré, les nœuds adjacents du côté interne et externe;  $j + 1$  et  $j$  désignent respectivement le nouveau temps (à la fin du pas de temps) et l'ancien temps;  $\Delta t$  est le pas de temps;  $\Delta x$  est le pas d'espace (inférieur à l'épaisseur de la couche du mur);  $C_P$  est la chaleur spécifique et  $\rho$  est la masse volumique du matériau en question.

L'équation précédente est accompagnée d'une autre équation qui relie l'enthalpie à la température.

$$h_i = HTF(T_i) \quad [3.23]$$

où  $HTF$  est la fonction qui relie enthalpie et température.

Le pas d'espace  $\Delta x$  est calculé automatiquement à partir du pas de temps  $\Delta t$ , de la diffusivité thermique  $\alpha$  du matériau et de l'inverse du nombre de Fourier notée  $C$  via la relation :

$$\Delta x = \sqrt{C \alpha \Delta t} \quad [3.24]$$

$C = 1/F_o = \Delta x^2 / \alpha \Delta t$  est pris égale à 3 dans ce travail.

### 3.2.2. Confrontation des résultats

Les paramètres climatiques utilisés dans cette partie sont ceux de la ville de Garoua. Le coefficient d'échange combiné (convectif et radiatif) sur la face extérieure est pris constant et égal à  $22 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Sur la face interne, le coefficient d'échange convectif est également supposé constant et égal à  $3 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Les résultats sont présentés pour le 15 Janvier, supposé être le jour représentatif de ce mois.

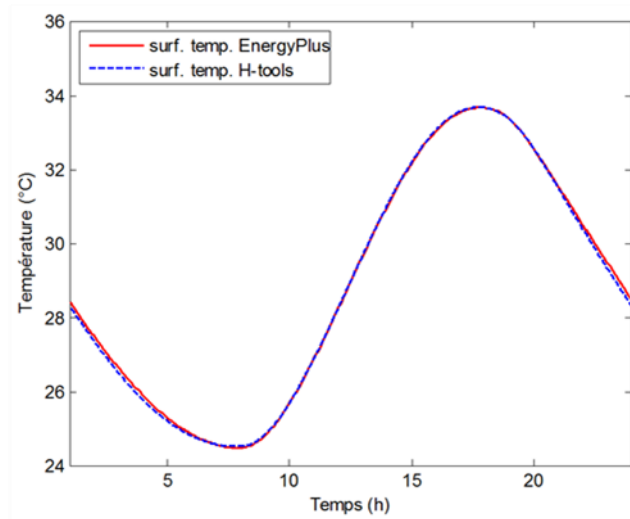


Figure 3.5: Variations de la température de la surface intérieure du mur sud données par H-tools et EnergyPlus lorsque le local est continuellement climatisé.

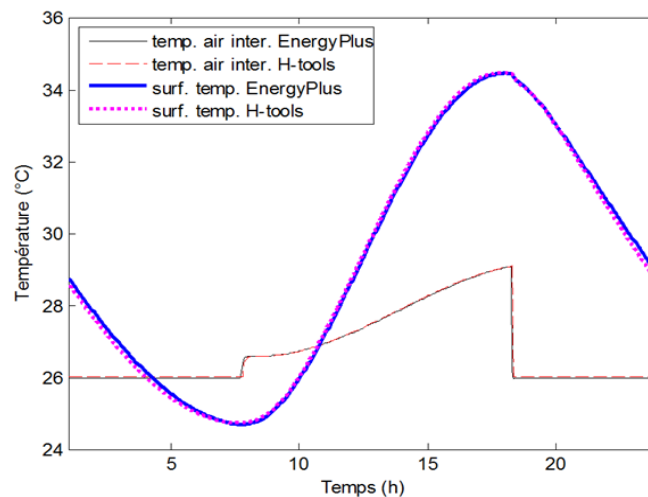


Figure 3.6: Variations de la température de l'air interne et de la température de la surface intérieure du mur sud données par H-tools et EnergyPlus lorsque le local est climatisé de façon intermittente.

Figure 3.5 et Figure 3.6 montrent les variations de la température de l'air interne et de la température de la surface intérieure du mur sud en fonction du temps. Dans le premier cas, le local est continuellement climatisé alors que dans le second cas, il est climatisé de façon

intermittente. Une bonne concordance est observée pour les résultats issus des deux modèles. Le modèle construit dans Simulink sera utilisé dans la suite du travail. Seul le mur extérieur changera de configuration et d'orientation selon la performance thermique recherchée.

Le modèle Simulink construit précédemment est utilisé pour simuler les températures en certains points du dispositif expérimental monté par Samri (Figure 3.7a). Les résultats des simulations numériques sont alors comparés à ceux obtenus expérimentalement par cet auteur (Figure 3.7b). On constate que l'amplitude des variations de températures expérimentales est légèrement supérieure à celle des températures simulées. En effet, dans le modèle numérique, la température du laboratoire est supposée constante alors qu'en réalité, elle varie légèrement. Malgré la négligence du transfert de masse, les variations de températures aux points C et C<sub>2</sub> obtenues numériquement sont assez proches de celles obtenues expérimentalement.

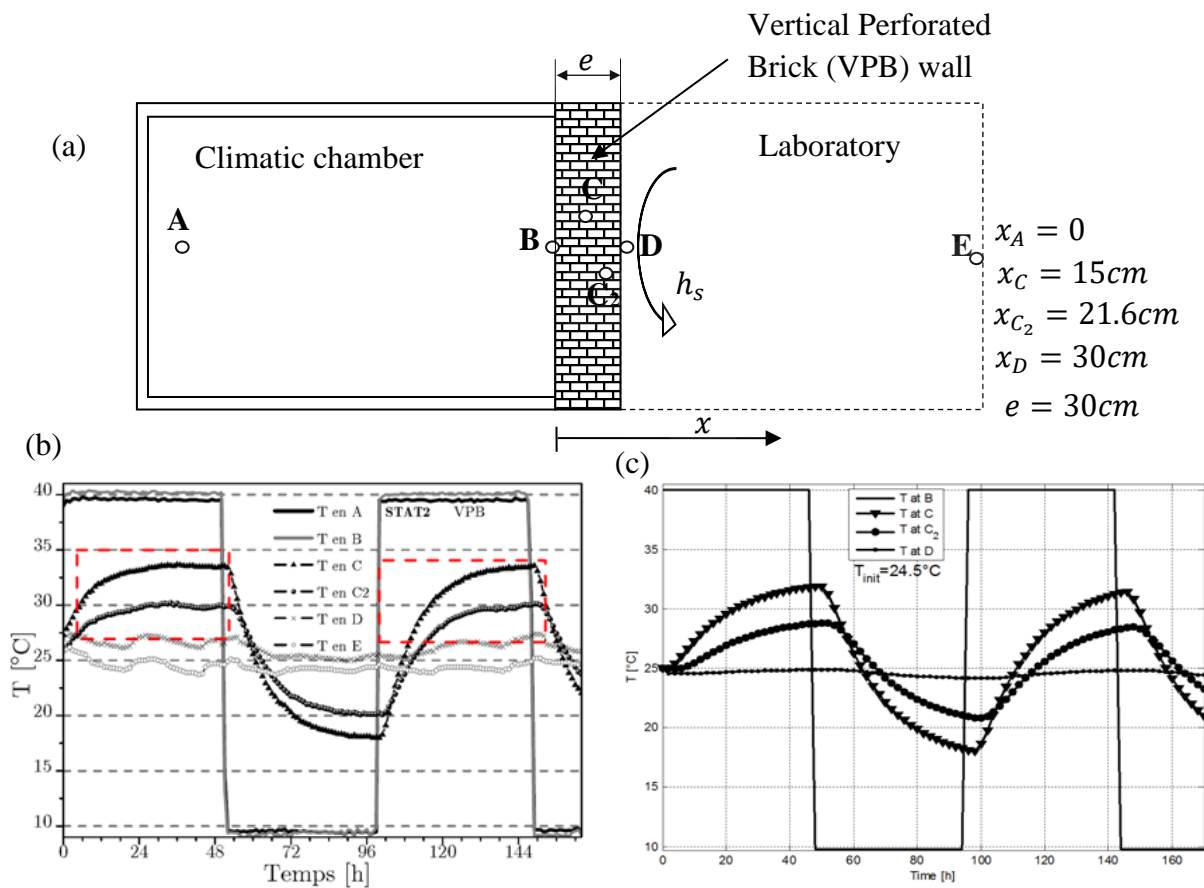


Figure 3.7: Dispositif expérimentale (a), variations de températures expérimentales obtenues par Samri (b) et variations de températures simulées obtenues à partir du modèle Simulink utilisé dans cette étude (c).

#### 4. Indicateurs de performance thermique des murs

La performance thermique d'un mur donnée dépend du mode d'utilisation du bâtiment. Pour un régime de fonctionnement du système de climatisation donné, un ou plusieurs indicateurs de performances ont été utilisés.

##### 4.1. Bâtiment continuellement climatisé

Dans le cas où la température de l'air interne du local est artificiellement maintenue constante et de manière continue, nous avons choisi quatre indicateurs de performance thermique des murs externes.

- La charge de refroidissement

Il s'agit de la quantité d'énergie transmise vers l'intérieur du local à travers l'unité de surface du mur pendant une durée donnée (jour, mois ou année). Dans les zones proches de l'équateur (cas du Cameroun) où les niveaux de température et de radiation solaire sont suffisamment élevés pour que le bâtiment n'exige aucun chauffage actif toute l'année durant, un mur est d'autant plus performant que la charge de refroidissement est plus petite. Elle s'obtient en intégrant sur le temps les valeurs positives de la densité de flux de chaleur ( $q$ ) sur la face interne du mur.

$$Q = \sum q \Delta t = \sum h_i (T_{x=L} - T_{in}) \Delta t \quad [3.25]$$

- Le déphasage

Le déphasage est le temps nécessaire pour que la température intérieure atteigne son maximum à partir du moment où a lieu le pic de température extérieure tel qu'illustré à la Figure 3.8.

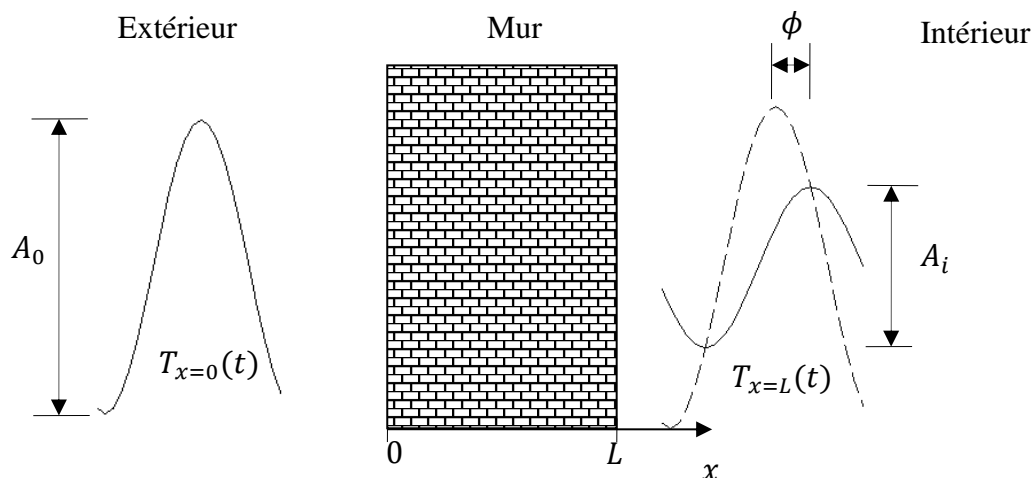


Figure 3.8: Représentation schématique du déphasage et du décrétement logarithmique.

Le déphasage  $\phi$  est calculé à partir de l'équation ci-dessous.

$$\phi = \begin{cases} t_{T_{x=L}(max)} - t_{T_{x=0}(max)} & \text{si } t_{T_{x=L}(max)} > t_{T_{x=0}(max)} \\ t_{T_{x=L}(max)} - t_{T_{x=0}(max)} + 24 & \text{si } t_{T_{x=L}(max)} < t_{T_{x=0}(max)} \\ 24 & \text{si } t_{T_{x=L}(max)} = t_{T_{x=0}(max)} \end{cases} \quad [3.26]$$

La performance d'un mur s'améliore avec l'augmentation du déphasage  $\phi$ . En effet, pour un déphasage important, les pics de température sur les faces extérieures des murs, observés en journée (comme le montre la Figure 3.9 représentant les variations de la somme de la température de l'air et de la température équivalente aux rayonnements solaires globales), atteignent leurs faces intérieures tard dans la nuit où la demande globale en électricité est généralement faible (heures creuses). Le mur Est où le maximum de température sur sa face extérieure s'obtient un peu plutôt dans la journée (autour de 10 heures le 15 janvier dans la ville de Douala par exemple) exige un déphasage plus important. Par ailleurs, la performance du système de climatisation s'améliore avec le déphasage des murs. En effet, pour un déphasage important, le pic de température à la surface intérieure des murs se réalise tard dans la soirée, au moment où la température extérieure est plus faible que celle de l'intérieur rendant le refoulement de la chaleur de la zone (par le système de climatisation) plus efficace.

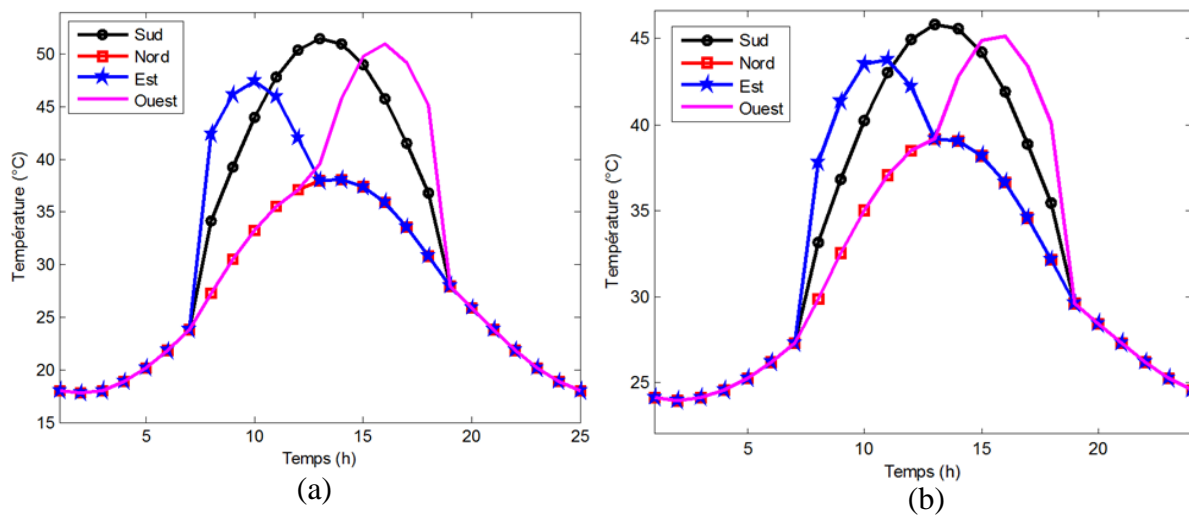


Figure 3.9: Somme de la température de l'air et de la température équivalente aux rayonnements solaires sur les faces externes des murs verticaux le 15 Janvier dans les conditions climatiques des villes de Garoua (a) et de Douala (b).

- Le facteur d'amortissement

Le facteur d'amortissement est le rapport des amplitudes de la température intérieure et de la température extérieure. Plus le facteur d'amortissement est faible plus les températures intérieures sont amorties et plus la paroi est performante. Elle est donnée par la relation ci-dessous.

$$f = \frac{T_{x=L}(max) - T_{x=L}(min)}{T_{x=0}(max) - T_{x=0}(min)} \quad [3.27]$$

- Le pic du flux de chaleur transmise

La valeur maximale du flux de chaleur à la surface intérieure d'un mur dont l'autre face est exposée aux variations des conditions climatiques du site est un paramètre d'évaluation de la performance thermique des enveloppes de bâtiments. La capacité du système de climatisation requise est d'autant plus faible que ce pic est moins élevé. Le surdimensionnement du système de climatisation le rend moins performant et augmente les coûts d'installation et de maintenance.

#### 4.2. Bâtiment climatisé de façon intermittente

Dans ce cas, l'indicateur de performance est la quantité de chaleur transmise à l'intérieur du local durant les heures d'occupation (lorsque le système de climatisation est allumé). L'énergie électrique consommée par le système de climatisation est directement lié à cette valeur. Un mur d'un local refroidi est d'autant plus performant que la quantité de chaleur qui le traverse vers l'intérieur est faible.

### 5. Optimisation de la distribution des différentes couches d'un mur composite

En zone tropicale, la plupart des murs de bâtiments modernes sont faits en béton ou en parpaing. Ces matériaux présentent une faible résistance thermique. Leurs coûts élevés ne permettent pas toujours de construire les murs épais en vue d'améliorer leurs résistances thermiques pourtant importantes comme moyens passifs de réduction de la consommation d'énergie et/ou d'amélioration du confort thermique des occupants. Certains matériaux locaux de bâtiments présentent, en plus de leur faible impact environnemental, une inertie et un niveau d'isolation adéquat. L'utilisation de ces matériaux en vue de réduire l'épaisseur de l'isolant conventionnel nécessaire à l'isolation est envisagée dans ce travail. La détermination de la distribution optimale de ces nouvelles couches autour du mur existant constitue un objectif de ce travail.

#### 5.1. Description des configurations de murs étudiées

Douze configurations de mur illustrées à la Figure 3.10 sont étudiées dans ce travail. X désigne une couche en briques de terre compressée avec incorporation soit de la sciure de bois (ES) soit de la pouzzolane noire (EP). Pour X donné, les douze configurations de mur ont la même résistance thermique et sont constituées d'un volume égal de chaque type de matériau. La différence entre elles se situe uniquement au niveau de la localisation et de la distribution des différents types de matériau qui les constituent.

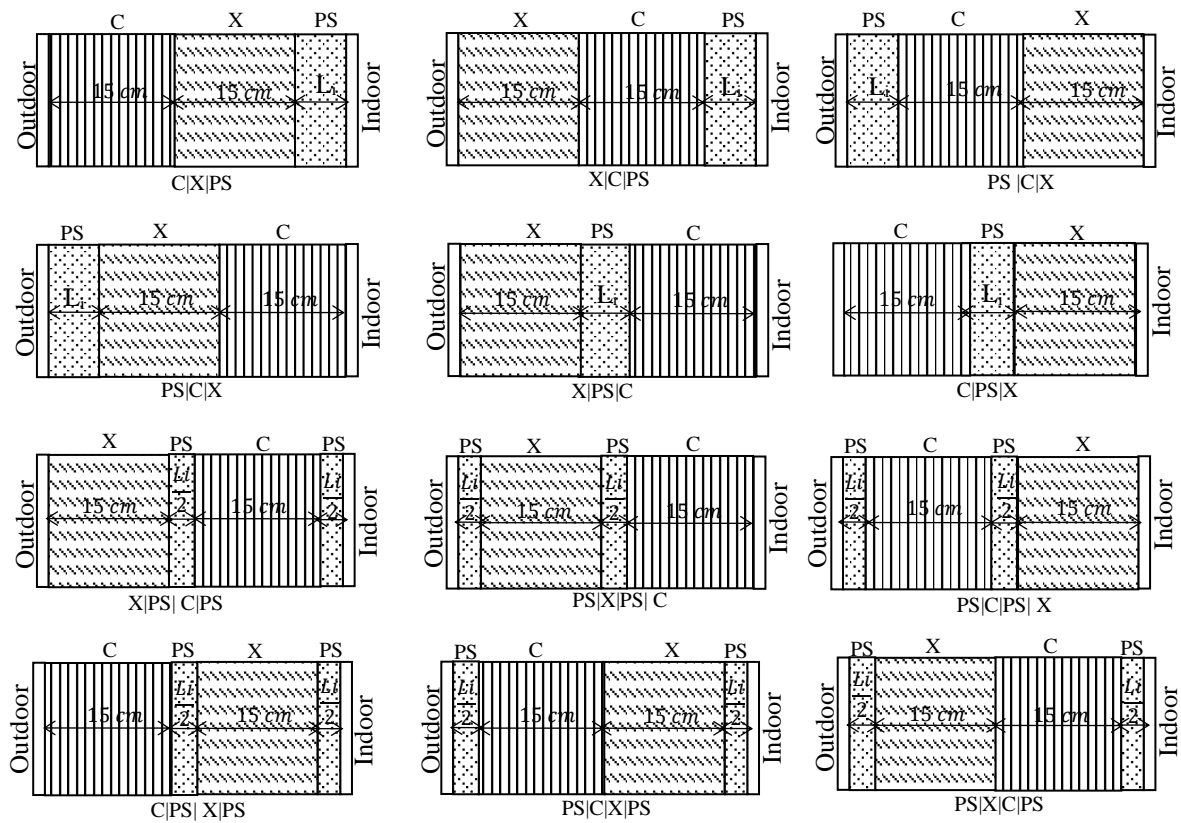


Figure 3.10: Différentes configurations de murs étudiés.

Les propriétés thermiques des différents matériaux utilisés dans ce travail sont données dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1: Propriétés thermiques des matériaux utilisés.

Matériau	Masse volumique $\text{kg/m}^3$	Conductivité thermique $\text{W/m K}$	Chaleur massique $\text{J/kg K}$
EB*	1942	0,897	1000
ES*	1200	0,417	878
EP*	1716	0,503	943
Parpaing**	1250	0,67	880
Béton**	2000	1,7	1000
Enduit de mortier**	1950	1,15	880
Béton armé**	2300	2,3	1000
Polystyrène**	24	0,034	1400

\* (Meukam et al., 2004) ; \*\* (Claessens et al.<sup>4</sup>).

<sup>4</sup> [www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/ee\\_tome1.pdf](http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/ee_tome1.pdf)

## 5.2. Bâtiment continuellement climatisé

La température interne du local est supposée constante et égale à 26°C alors que la face extérieure est exposée aux variations climatiques de la ville de Garoua ou Douala.

### 5.2.1. Caractéristiques thermiques des murs non isolés

Les caractéristiques thermiques telles que le déphasage et le facteur d'amortissement des murs en BTS (« EB »), BTS+sciure (« ES »), BTS+pouzzolane (« EP ») et béton (« C ») sont premièrement étudiées. La Figure 3.11 présente les moyennes annuelles du déphasage de ces murs. Les paramètres météorologiques sont ceux de la ville de Garoua.

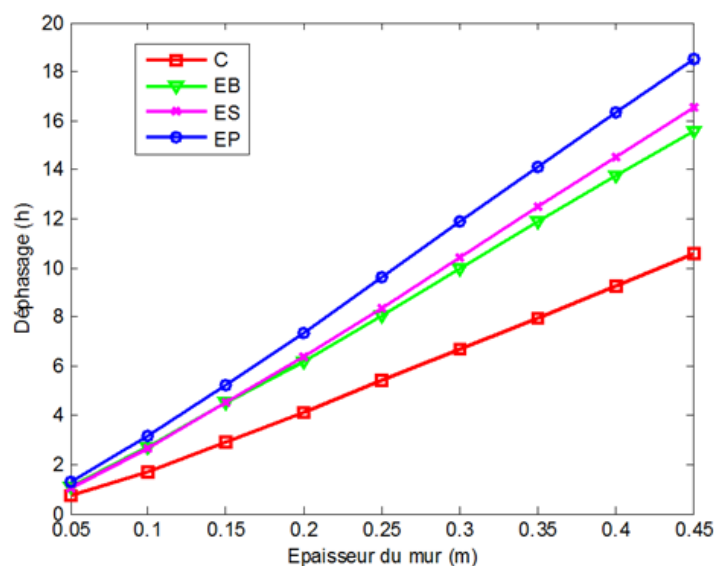


Figure 3.11: Déphasage des murs non isolés en fonction de leurs épaisseurs.

Il ressort de cette figure que le déphasage augmente avec l'épaisseur de la paroi ; ce qui est un résultat classique. De plus, les matériaux ayant une chaleur massique et une conductivité thermique relativement importantes présentent un déphasage moins élevé. C'est par exemple le cas de la paroi en béton dans cette étude avec une chaleur massique de 1000 kg/m<sup>3</sup>K et une conductivité thermique de 1,7 W/mK. Ces résultats sont en harmonie avec ceux obtenus par Asan (2006). Il ressort également que l'ajout d'agréats tels que la sciure de bois (à hauteur de 10 % par exemple) ou la pouzzolane noire (à hauteur de 45 %) dans le cas d'espèce a pour effet d'accroître considérablement le déphasage des parois. Ainsi, les déphasages que présentent les murs « ES » et « EP » de 30 cm d'épaisseur sont respectivement plus importants de 7,6% et de 18% par rapport à celui présenté par un mur « E » de même épaisseur.

La Figure 3.12 présente la moyenne annuelle du facteur d'amortissement de chacun des murs étudiés en fonction de leurs épaisseurs.



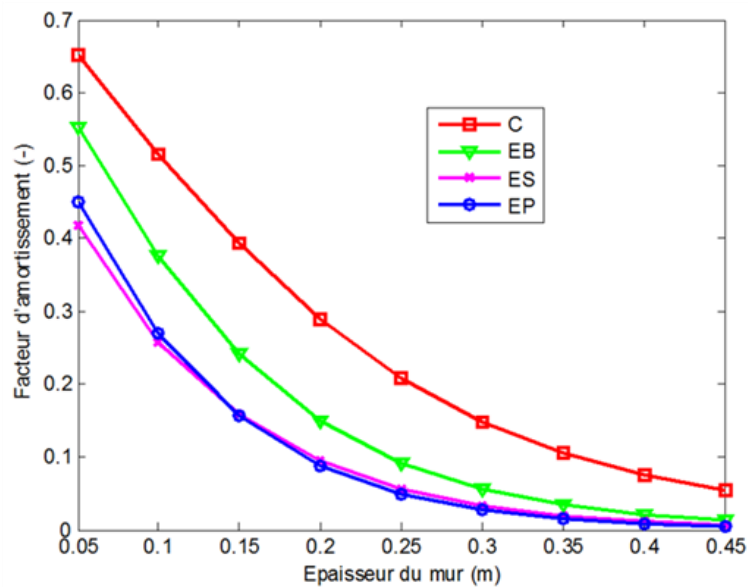


Figure 3.12: Facteur d'amortissement de différentes parois non isolées en fonction de leurs épaisseurs.

On observe que pour chaque type de matériaux, le facteur d'amortissement décroît lorsque l'épaisseur de la paroi augmente. Ce résultat est en accord avec celui obtenu par Asan (2006). Le mur « C » (paroi en bloc de béton) est le moins performant car il présente le plus grand facteur d'amortissement. Pour différentes épaisseurs des parois, la différence de facteur d'amortissement que présente les murs « EP » et « ES » n'est pas significative. L'addition des fibres végétales ou d'un stabilisant (la pouzzolane dans le cas d'espèce) en plus du liant hydraulique (le ciment) a pour effet la diminution considérable du facteur d'amortissement. En effet, l'incorporation de 10% de sciure de bois (bois léger) comme fibres végétales ou de 45% de pouzzolane noire comme stabilisant dans le cas d'espèce permet de réduire le facteur d'amortissement d'environ 39.70% et 54.22% respectivement pour les parois de 15 cm et de 30 cm d'épaisseurs.

### 5.2.2. Influence de la configuration du mur sur le déphasage

Les valeurs moyennes du déphasage de chaque structure de mur sont représentées à la Figure 3.13. On observe que pour les murs de mêmes configurations, ceux faits à base de « EP » présentent des déphasages plus importants que ceux faits à base de « ES ». Cela est dû au fait que l'inertie thermique de « EP » est plus importante que celle de « ES » comme montré à la section précédente. On note également que le fait de permuter les couches X et C influence considérablement le déphasage de certaines structures de mur ; notamment celles n'ayant pas de couche d'isolant sur leur face externe. Il apparaît aussi que le déphasage croît avec le nombre de couche d'isolant. Ce dernier résultat est en harmonie avec ceux trouvés dans la littérature (Al-Sanea et al., 2011 ; Ozel et Pihtili, 2007).

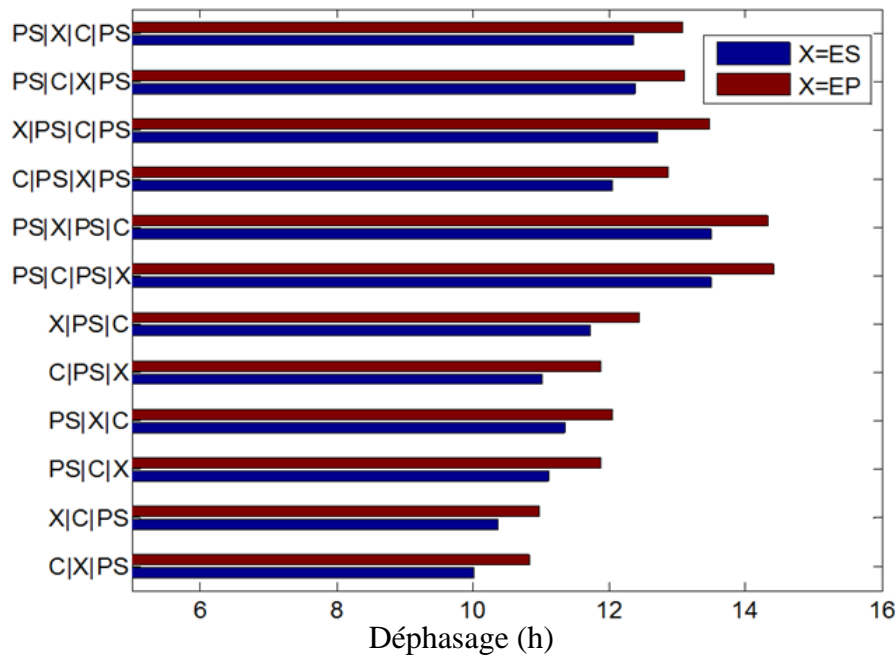


Figure 3.13: Impact de la structure de mur sur le déphasage.

Les murs ayant les configurations d'isolant « mid/int » (deux couches d'isolant dont l'une se trouve au milieu du mur et l'autre sur la face intérieure), « ext/int » (deux couches d'isolant dont l'une se trouve au milieu du mur et l'autre sur la face intérieure) et « int » (une seule couche d'isolant sur la face intérieure du mur) présentent un faible déphasage par rapport à ceux de configuration d'isolant « ext/mid » (couche d'isolant sur la face externe et au milieu du mur) et « mid » (une seule couche d'isolant au milieu du mur). En bref, les murs ayant sur leur face interne une couche de matériau massif sont plus performants (déphasage plus important). La structure de mur la plus performante est PS|C|PS|X avec un déphasage de 14,4 heures pour X=EP et 13,5 heures pour X=ES. De toutes les configurations de murs étudiées, la structure de mur la moins performante est C|X|PS qui présente un déphasage de 10,8 heures pour X=EP ou 10 heures pour X=ES.

### 5.2.3. Influence de la configuration du mur sur le facteur d'amortissement

Les facteurs d'amortissement des différentes structures de murs présentées précédemment sont donnés à la Figure 3.14. Il apparaît clairement que les murs faits à base de « ES » sont plus performants que ceux de même configuration qui sont faits à base de « EP ». On note aussi que le fait de permuter les positions de couches X et C a un impact significatif sur le facteur d'amortissement. Pour des configurations d'isolant « mid/int », « ext/mid » et « int », placer la couche X à la face intérieure ou extérieure du mur entraîne une performance meilleure que placer la couche C à la même position. Par exemple,  $f_{C|ES|PS} = 2.36 f_{ES|C|PS}$ . Il apparaît par ailleurs que pour la configuration d'isolant « mid », localiser la couche X à la face extérieure du mur fournit une performance meilleure que la placer à la face intérieure. Permuter les positions des couches X et C dans les structures de configuration d'isolant « ext/int » n'a pratiquement pas

d'effet sur le facteur d'amortissement. De toutes les structures de murs étudiées, PS|C|PS|X est la structure la plus performante (présente le facteur d'amortissement le moins important).

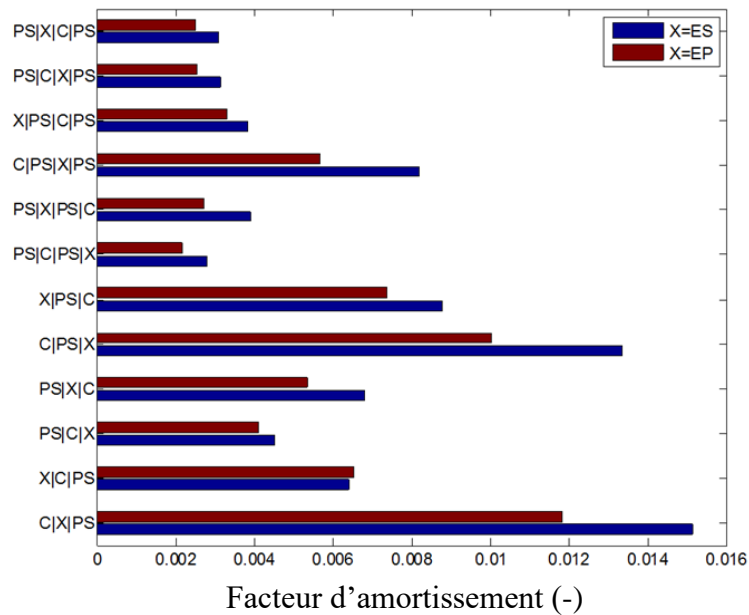


Figure 3.14: Moyenne annuelle du facteur d'amortissement des différentes structures de mur.

#### 5.2.4. Influence de la configuration du mur sur le pic du flux de chaleur à la surface interne du mur

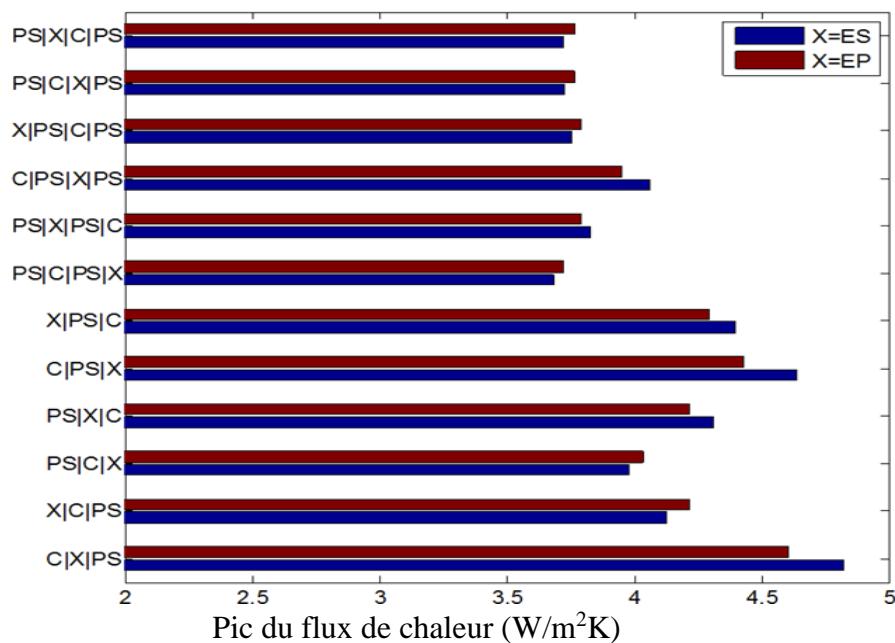


Figure 3.15: Pic du flux de chaleur à la surface interne des différentes structures.

La Figure 3.15 présente le pic de la densité du flux de chaleur à la surface intérieure des différentes structures de murs durant le 15<sup>e</sup> jour du mois de Janvier, supposé être le jour représentatif dudit mois. On note l'influence significative de l'effet des différentes configurations de mur sur le pic journalier du flux de chaleur transmise à l'intérieur du bâtiment. La configuration de mur PS|C|PS|ES est la plus performante avec un pic de densité du flux sur sa face interne de 3.68 W/m<sup>2</sup> alors que le mur de structure C|ES|PS présente la pire performance avec un pic de densité de flux de chaleur sur sa face interne égale 4.82 W/m<sup>2</sup>. Ces résultats sont compatibles à ceux présentés à la section précédente.

### 5.3. Bâtiment climatisé de façon intermittente

On suppose que le bâtiment est climatisé uniquement durant la période d'occupation. On suppose également que le temps d'occupation se situe entre 17 h et 6 h (cas des chambres à coucher). Les paramètres d'évaluation de la performance des murs sont la charge de refroidissement et le pic de la densité de flux de chaleur sur la face interne du mur.

#### 5.3.1. Effet de la configuration du mur sur l'énergie transmise à l'intérieur

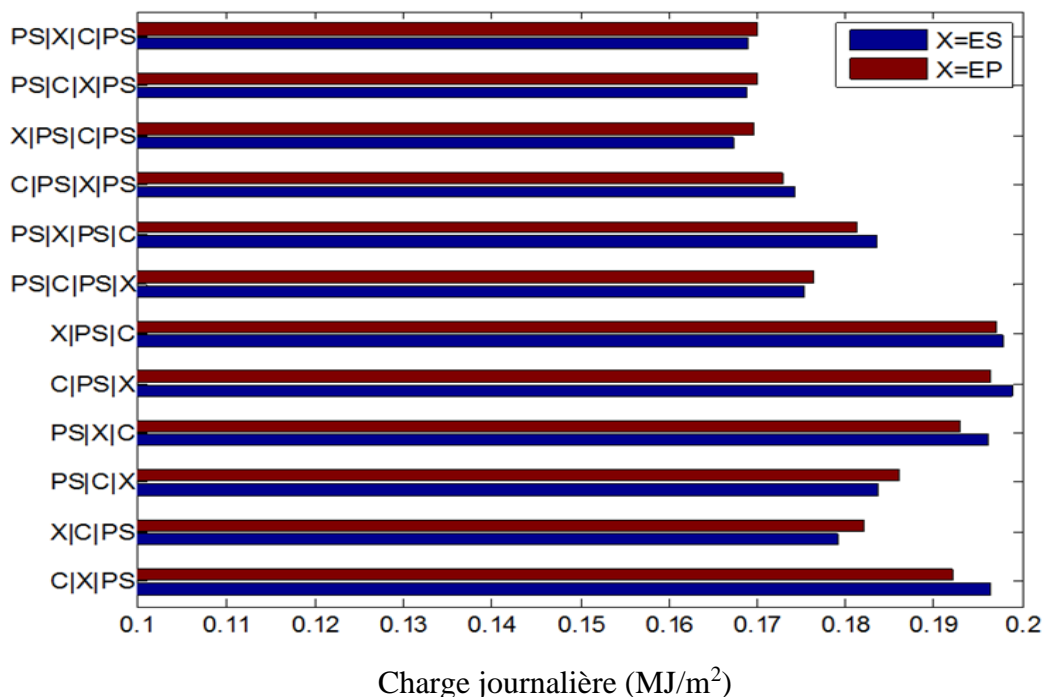


Figure 3.16: Quantité de chaleur transmise à l'intérieur du bâtiment à travers l'unité de surface du mur en fonction des différentes configurations de mur.

La Figure 3.16 présente les quantités d'énergie transmises vers la zone en fonction des différentes configurations de murs. Ces quantités sont obtenues pendant les heures d'occupation du jour représentatif du mois de Janvier. Il est clairement observé que, de toutes les configurations de mur, placer l'isolant au milieu du mur présente une pire performance (entraîne

la plus importante consommation d'énergie). Par contre, placer les couches X et PS (isolant) respectivement à la surface externe et interne du mur constitue la configuration la plus performante (c'est-à-dire celle qui entraîne la faible consommation d'énergie). De toutes les configurations de mur possédant une seule couche d'isolant placée sur la face externe (respectivement interne), placer la couche X à la face interne (respectivement externe) présente la meilleure performance. Par exemple, les murs PS|C|ES et ES|C|PS fournissent une réduction en consommation d'énergie de 6.12% et 8.67% par rapport aux murs PS|ES|C et C|ES|PS respectivement. On note par ailleurs que de toutes les configurations de mur ayant la couche C à la face interne ou externe, celles faites à base de la couche « EP » sont plus performantes que celles faites à base de la couche « ES ». Pour les murs de configuration d'isolant « ext/int », la permutation des couches X et C n'a pas d'influence notable sur la consommation d'énergie.

### 5.3.2. Effet de la configuration du mur sur le pic de chaleur (iCA)

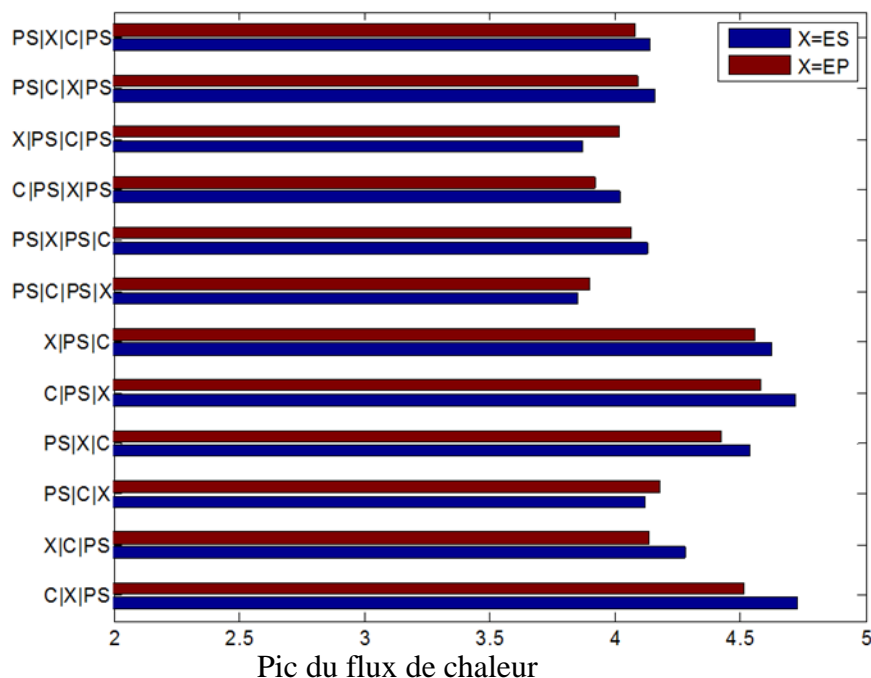


Figure 3.17: Pic de densité de flux à la face intérieure du mur durant les heures d'occupation pour différentes configurations de mur.

Les pics de densité de flux de chaleur à la surface interne des différentes configurations de mur étudiées sont donnés par la Figure 3.17. Ces valeurs sont obtenues uniquement durant les heures d'occupation du local. On note que la structure de mur présentant la meilleure performance thermique est PS|C|PS|X tandis que celle qui présente la pire performance thermique est C|X|PS. Ceci est conforme au résultat obtenu avec le local continuellement climatisé. Cela est dû au fait que toutes les configurations de mur étudiées présentent des déphasages supérieurs à 10 heures. Par conséquent, le pic de la densité de flux à la surface interne du mur se produit aux heures où le local est occupé (système de climatisation en mode ON) soit au-delà de 17 heure.

### 5.3.3. Influence de l'épaisseur de l'isolant sur la performance thermique des différentes configurations de mur

L'étude comparative des performances des différentes configurations présentées à la section précédente est faite avec l'épaisseur totale de l'isolant constante et égale à 4 cm. Il importe dans cette partie de vérifier si ces résultats sont vrais quel qu'en soit l'épaisseur totale de l'isolant.

Les variations de la quantité de chaleur transmise vers l'intérieur du bâtiment à travers l'unité de surface de chaque configuration de mur en fonction de l'épaisseur totale de l'isolant sont présentées à la Figure 3.18. Pour une configuration donnée, l'épaisseur totale de l'isolant est la somme des épaisseurs de toutes les couches d'isolant qu'elle comporte. Les résultats sont présentés uniquement pour les murs de configuration d'isolant « ext/int », « mid/int » et « int » qui sont les configurations les plus performantes pour les bâtiments climatisés de façon intermittente.

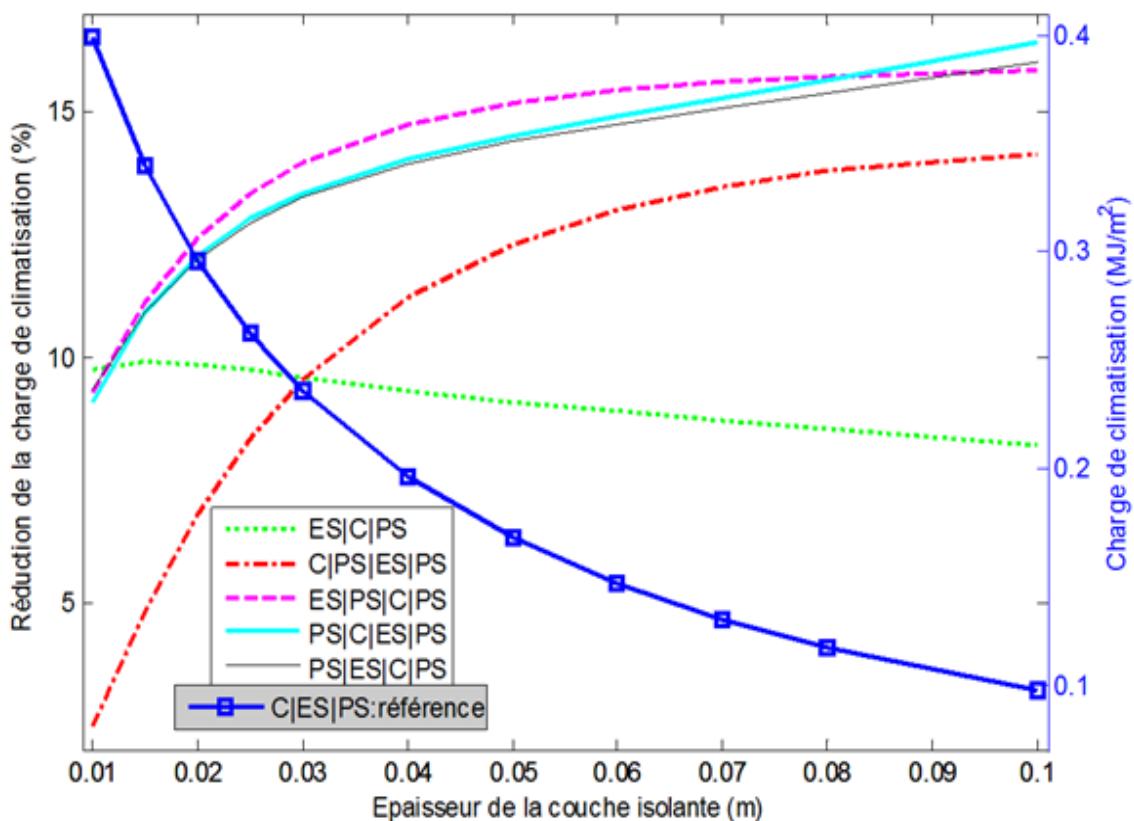


Figure 3.18: Influence de l'épaisseur de l'isolant sur la performance des différentes configurations de mur.

La consommation d'énergie du cas le plus défavorable C|ES|PS est choisie comme référence. On observe que la transmission des charges de climatisations décroît avec l'épaisseur de l'isolant. Ce résultat est en harmonie avec ceux trouvés dans la littérature. On constate aussi que la réduction en énergie consommée (par rapport au cas de référence) augmente avec

l'épaisseur totale des couches de matériau isolant exception faite du mur ES|C|PS où cette réduction décroît progressivement. On note de surcroît que la performance comparative de certaines configurations de mur dépend de l'épaisseur de l'isolant. Ainsi, pour une épaisseur totale de l'isolant inférieure à 30 mm approximativement, le mur C|PS|ES|PS est plus performant que le mur ES|C|PS alors pour une épaisseur totale de l'isolant supérieure à 30 mm, on a la situation inverse. De toutes les configurations étudiées, ES|PS|C|PS est la plus performante lorsque l'épaisseur totale des couches isolantes est inférieure à 80 mm. Au-delà de 80 mm, le mur PS|C|ES|PS présente une réduction en quantité d'énergie transmise (par rapport au cas de référence) légèrement plus importante.

### 6. Influence de l'orientation du mur sur la densité de flux de chaleur à la surface interne des murs

Dans cette partie, deux modèles de mur (non isolés) désignés par HB et EB sont utilisés. HB est un mur composite composé de 2 cm d'enduit de ciment sur chacune des faces d'une paroi de 20 cm d'épaisseur faite en parpaings creux. EB est semblable à HB à la seule différence que la paroi en parpaing creux est remplacée par celle de 30 cm, faite en brique de terre compressée et stabilisée au ciment. Les faces extérieures des deux modèles de mur sont soumises aux conditions climatiques des villes de Garoua (climat tropical) et Douala (climat équatorial) alors que la température de la zone est maintenue à 25°C. On suppose que le coefficient d'absorption de ces murs est constant et égal à 0.6.

Les calculs sont faits pour le 15<sup>e</sup> jour du mois le plus chaud dans chacun des deux climats soient Mars et Janvier respectivement pour les conditions climatiques des villes de Garoua et Douala. Figure 3.19 et Figure 3.20 présentent les variations de la densité de flux de chaleur sur les faces internes des deux modèles de mur étudiés.

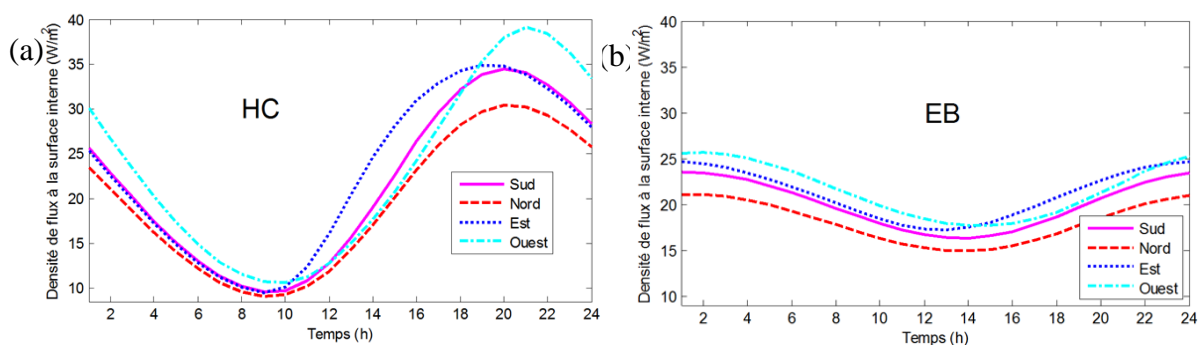


Figure 3.19: Influence de l'orientation du mur sur les variations horaires de la densité de flux sur sa face interne (15 Mars).

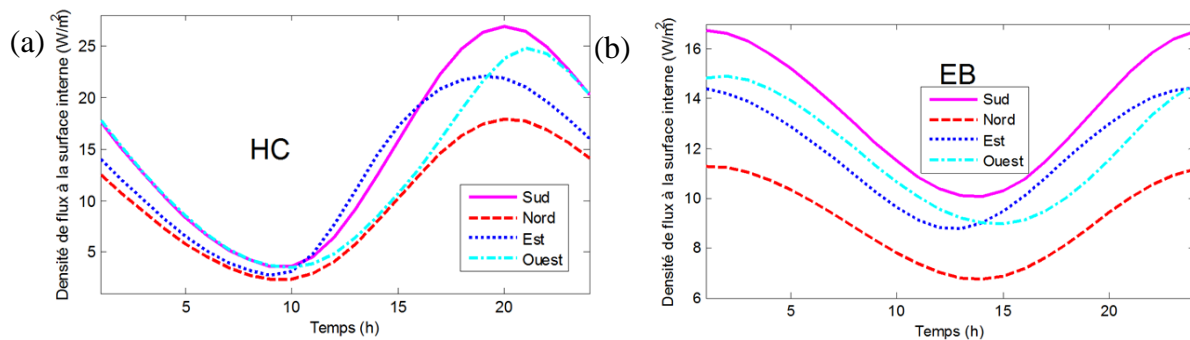


Figure 3.20: Influence de l'orientation du mur sur les variations horaires de la densité de flux sur sa face interne (15 Janvier).

On note que les pics de densité de flux sur la surface interne des murs « HB » et « EB » sont plus élevés lorsqu'ils sont orientés vers l'ouest dans les conditions climatiques de la ville de Garoua durant le jour représentatif du mois de Mars (Figure 3.18a). Cela est dû au fait que cette face est celle qui reçoit plus de rayonnements de courte longueur d'onde au moment où la température extérieure atteint sa valeur maximale (autour de 14 heures). Ces maximums de densité de flux de chaleur sur les faces intérieures des murs sont observés autour de 20 heures pour le « HB » et 24 heures environ pour le mur « EB ». La différence d'inertie et de conductance thermique entre les deux types de mur est à l'origine de cette différence.

Durant le jour représentatif du mois de Janvier dans les conditions climatiques de la ville de Douala, la valeur la plus élevée de la densité de flux de chaleur sur la face interne de chaque type de mur est observée lorsque ces derniers sont orientés vers le sud (comme le montre la Figure 3.20). Cela est dû au fait que la face sud reçoit plus d'énergie solaire que les faces est, ouest et nord au moment où la température de l'ambiance extérieure atteint sa valeur maximale. Comme précédemment, la différence entre les heures où se manifestent ses pics de la densité de flux et leurs valeurs sont dues à la différence d'inertie thermique et de conductance thermique entre les deux types de mur.

Dans tous les cas, la densité de flux de chaleur sur la face interne du mur est plus faible lorsqu'il est orienté vers le nord que lorsqu'il est orienté vers le sud, l'est ou l'ouest. Cela est dû fait que le mur nord reçoit très peu d'énergie solaire dans les deux climats considérés durant les jours choisis pour notre investigation. L'orientation d'un mur a une influence significative sur le flux de chaleur à la surface interne des murs. Ces résultats sont en harmonie avec ceux trouvés dans la littérature (Daous, 2009 ; Ozel, 2011).

### 7. Influence des ombres portées sur le pic de la densité de flux de chaleur à la surface interne du mur

Dans cette section, on suppose que les protections solaires et objets environnants interceptent principalement le rayonnement direct. Les études sont faites sur les murs nord et sud. La Figure 3.21 présente l'influence de l'obstruction de la composante directe du rayonnement solaire sur



le pic de la densité de flux sur la face interne des murs durant le jour représentatif de chaque mois de l'année dans les conditions climatiques des villes de Douala et de Garoua.

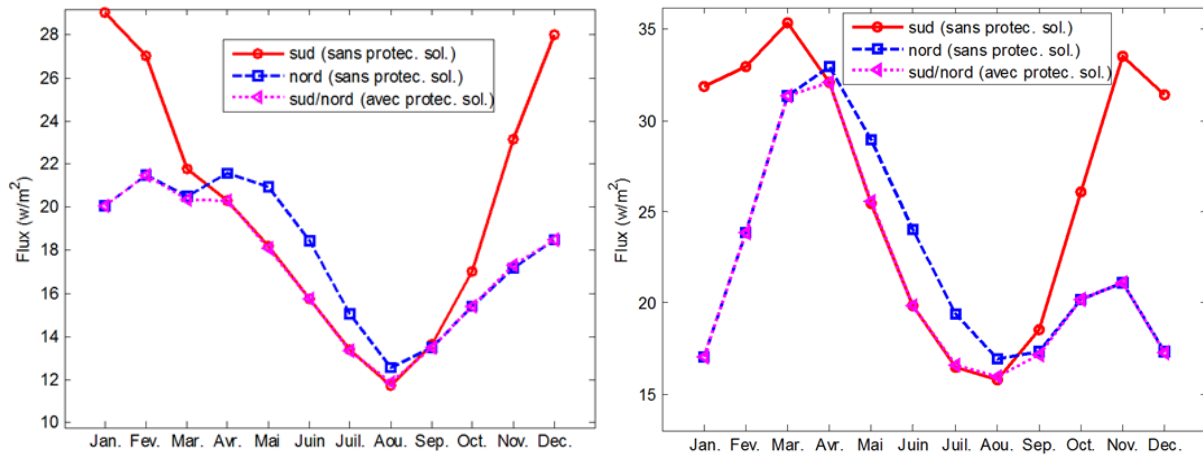


Figure 3.21: Influence de l'interception du rayonnement direct sur le pic de la densité du flux de chaleur sur la face interne des murs dans les villes de Douala (a) et Garoua (b).

Il ressort de cette figure que l'obstruction du rayonnement solaire direct peut entraîner une réduction du pic de la densité de flux de chaleur à la surface interne à hauteur de 33,95% (46,59%) et 14,68% (17,59%) respectivement pour les murs sud et nord dans les conditions climatiques de Douala (Garoua). On note aussi que l'influence de l'interception de la composante directe du rayonnement solaire sur la densité de flux de chaleur à la face interne du mur est plus significative durant le jour représentatif du mois de Décembre (le 15<sup>e</sup> jour du mois, proche du solstice d'hiver) lorsque le mur est orienté vers le sud et durant le jour représentatif du mois de Juin (proche du solstice d'été) lorsqu'il est orienté vers le nord.

### 8. Influence des ombres portées sur l'énergie thermique transmise à l'intérieur

L'intégration des valeurs positives de la densité de flux de chaleur à la surface intérieur d'un mur sur une période de 24 heures permet d'obtenir la quantité de chaleur transmise vers l'intérieure de bâtiment à travers l'unité de surface du mur, durant un jour.

$$Q_j = \int_1^{24} h_i(T_{x=L} - T_i) dt \quad [3.28]$$

Le gain thermique annuel  $Q$  s'obtient finalement par sommation sur toute l'année des gains thermiques journaliers.

La Figure 3.22 présente les gains thermiques journaliers à travers l'unité de surface de mur durant les jours représentatifs de chaque mois dans les conditions climatiques de Douala.

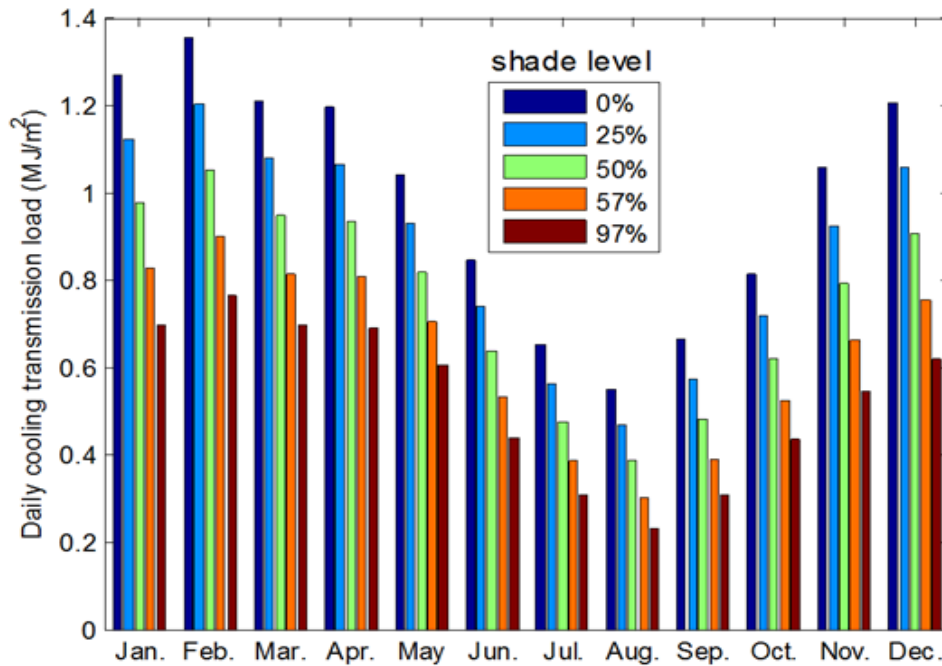


Figure 3.22: Gain thermique journalier à travers l'unité de surface du mur orienté vers l'est/ouest dans les conditions climatiques de la ville de Douala.

Les résultats sont présentés pour le mur est/ouest. Il ressort de cette figure que la plus grande valeur du gain thermique journalier est obtenue au mois de Février tandis que la plus petite valeur est obtenue au mois d'Août. Ces résultats montrent également que le gain thermique journalier diminue considérablement avec le taux de rayonnement solaire intercepté. Aucune charge de chauffage n'est enregistrée, même à 97% de radiations solaires bloquées dans les conditions climatiques de la ville de Douala. Cela est dû au fait que le niveau des températures est suffisamment élevé au point que, même en l'absence du soleil, le bâtiment n'exige aucun chauffage actif.

Les gains thermiques journaliers ou annuels à travers une paroi dépendent de la résistance thermique. L'insertion d'une couche d'isolant dans un mur augmente sa résistance thermique. Cette augmentation est fonction, entre autres, de l'épaisseur de l'isolant. La Figure 3.23 présente les variations des gains thermiques annuels à travers l'unité de surface du mur en fonction de l'épaisseur de l'isolant inséré. Le mur considéré est constitué d'une couche de parpaings de 20 cm d'épaisseur, d'une couche d'isolant et de deux couches d'enduit de mortier de ciment de 2 cm d'épaisseur.

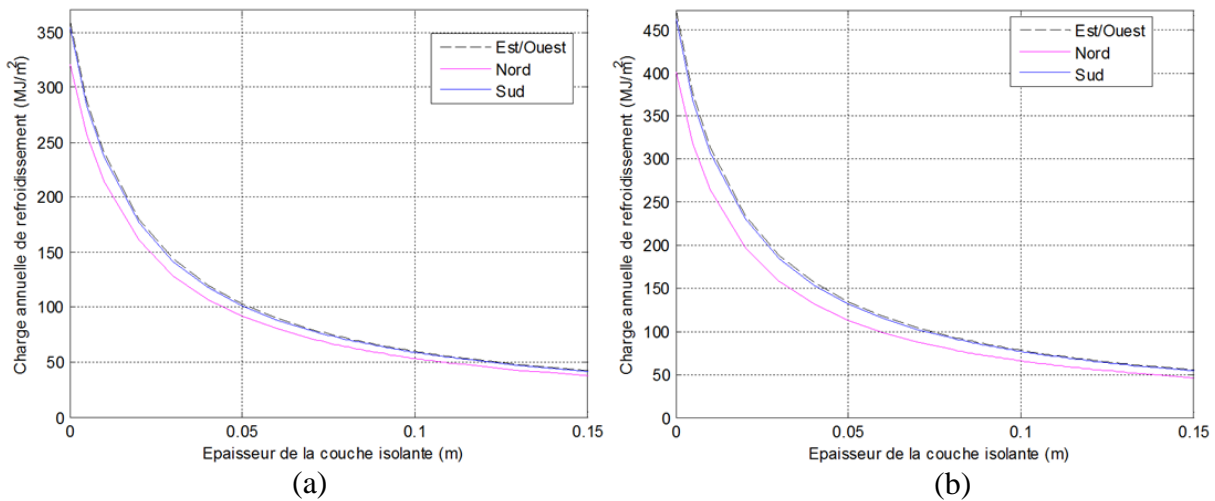


Figure 3.23: Variation de la charge annuelle de refroidissement en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans les conditions climatiques de Douala (a) et Garoua (b).

Il ressort clairement de ces courbes que la quantité de chaleur transmise vers l'intérieur du bâtiment à travers l'unité de surface d'un mur durant une année dépend de l'orientation de ce dernier. Elle décroît significativement avec l'épaisseur de l'isolant. Ces charges de refroidissement sont plus importantes pour le mur orienté vers l'est/ouest et moins important lorsque le mur est orienté vers le nord. Les résultats précédents sont en conformité avec ceux trouvés dans la littérature (Daouas, 2010 ; Ozel, 2011). Pour chaque orientation du mur, la charge annuelle de refroidissement est plus importante dans les conditions climatiques de Garoua que dans celles de Douala. Cela est dû au fait que les niveaux de température et de rayonnement solaire sont plus élevés à Garoua qu'à Douala.

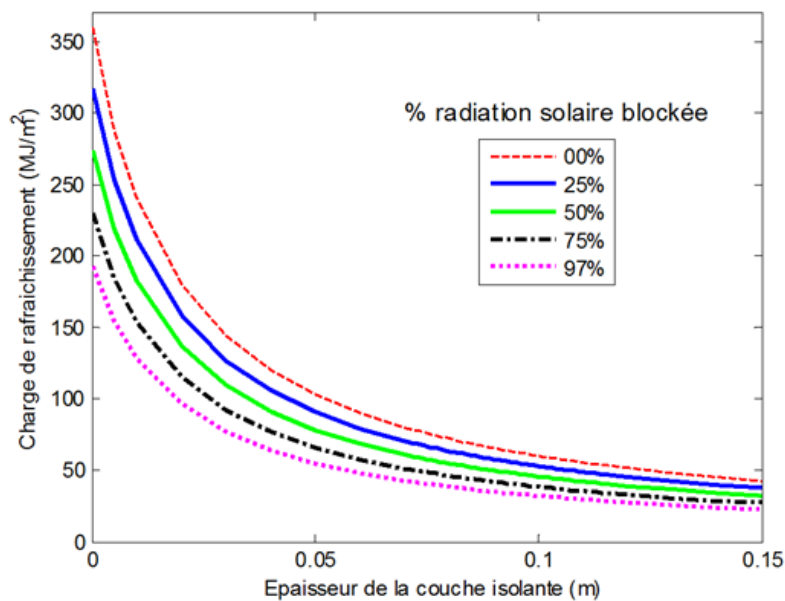


Figure 3.24: Variations du gain thermique annuel en fonction de l'épaisseur de l'isolant pour plusieurs taux d'obstruction de rayonnement solaire.

La Figure 3.24 présente les variations du gain thermique annuel à travers le mur est/ouest en fonction de l'épaisseur de l'isolant et en prenant en compte plusieurs taux d'obstruction du rayonnement solaire.

Il ressort de ces courbes que pour toutes les épaisseurs de l'isolant, le gain thermique annuel décroît considérablement avec le taux du rayonnement solaire obstrué. Cette décroissance diminue avec l'épaisseur de l'isolant.

La Figure 3.25 présente les variations du gain thermique annuel en fonction du taux de radiation solaire intercepté pour plusieurs niveaux d'isolation du mur.

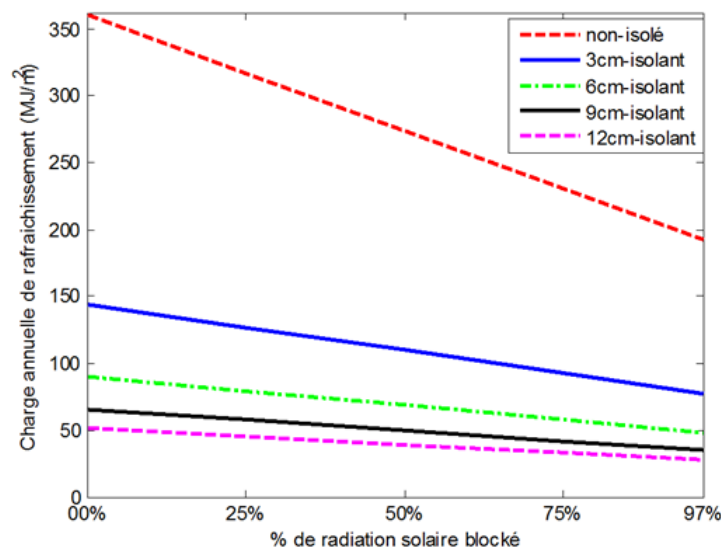


Figure 3.25: Variations de gain thermique annuel en fonction du pourcentage de radiation obstrué et pour plusieurs niveaux d'isolation du mur.

Il apparaît clairement que le gain thermique annuel décroît linéairement avec la proportion de rayonnement de courtes longueurs d'ondes bloquées. Pour le mur non-isolé et ceux isolé avec 3, 6, 9 et 12 cm d'épaisseur de polystyrène, le taux de décroissance est respectivement de 1.73, 0.69, 0.43, 0.31 et 0.25 MJ. m<sup>-2</sup> par pourcentage de radiation bloquée. Selon ce dernier résultat, on peut noter que l'impact des protections solaires sur les charges de climatisation décroît considérablement avec le niveau d'isolation du mur. Ces charges de refroidissement influencent notablement le coût de la climatisation.

## 9. Considérations économiques

### 9.1. Modèle économique

L'insertion d'une couche d'isolant dans un mur augmente ses capacités isolantes et par conséquent réduit la quantité de chaleur qui la traverse. Il s'en suit une réduction du coût de la climatisation pour les bâtiments où la température interne est contrôlée. Cette réduction est

d'autant plus importante que l'épaisseur de l'isolant est considérable. Toutefois, l'installation d'une couche d'isolant augmente le coût initial de la maison. De ce fait, une analyse économique permettrait de trouver l'épaisseur de l'isolant qui minimise le coût total. Le coût total étant la somme des coûts de l'installation de l'isolant et de la climatisation durant la vie du bâtiment. Il est donné par la relation suivante :

$$C_t = C_{enr}PWF + C_{ins}L_{ins} \quad [3.29]$$

où  $C_t$  est le coût total,  $C_{ins}$  le coût de l'unité de volume du matériau isolant ( $\$/m^3$ ),  $L_{ins}$  l'épaisseur du matériau isolant inséré et  $C_{enr}$  le coût de l'énergie électrique nécessaire pour neutraliser les charges de climatisation reçue à travers l'unité de surface du mur.

$$C_{enr} = \frac{Q_c C_{el}}{COP} \quad [3.30]$$

où  $Q_c$  est la charge de refroidissement ayant traversé l'unité de surface du mur considéré pendant une année en  $kWh \cdot m^{-2}$ ,  $C_{el}$  est le coût de l'énergie électrique ( $\$. kWh^{-1}$ ),  $COP$  est le coefficient de performance thermique du système de climatisation.

$$PWF = \frac{(1+r)^n - 1}{r(r+1)^n} \quad [3.31]$$

où  $n$  est la durée de vie du bâtiment,  $r$  est un paramètre dépendant des taux d'inflation  $g$  et d'intérêt  $i$  et donné par les relations suivantes (Arıcı et Karabay, 2009).

$$r = \frac{i-g}{1+g} \quad \text{pour } i > g$$

$$r = \frac{g-i}{1+i} \quad \text{pour } i < g.$$

$$\text{pour } i = g, PWF = \frac{n}{1+i}$$

La période de retour sur investissement  $p_b$  est calculée en résolvant l'équation suivante :

$$\frac{C_{ins}L_{op}}{A_s} = PWF(p_b) \quad [3.32]$$

où  $L_{op}$  est l'épaisseur optimale de l'isolant recherchée,  $A_s$  est le gain énergétique annuel réalisé.

Les paramètres économiques utilisés dans cette étude sont donnés dans la Tableau 3.2.

Tableau 3.2: Paramètres économiques utilisés dans les calculs.

Paramètres	Valeurs
Paramètres électriques	
Coût COP	0.16 \$/kWh 2,5
Polystyrène expansé	
Coût	164.32 \$/m <sup>3</sup>
Taux d'inflation, $g$	2.9% <sup>5</sup>
Taux d'intérêt, $i$	5% <sup>6</sup>
Durée de vie du bâtiment, $n$	30 ans

La valeur de COP prise dans cette étude est conforme à celles utilisées dans le guide d'efficacité énergétique de la climatisation des bâtiments en région tropicale<sup>7</sup>. La valeur prise pour la durée de vie du bâtiment est celle communément trouvée dans la littérature (Daouas, 2011 ; Al-Sanea and Zedan, 2011).

L'optimisation de l'épaisseur de l'isolant se fera dans les cas où le local est continuellement climatisé et dans le cas où il est climatisé de manière intermittente (uniquement pendant la période d'occupation considérée dans le cadre de ce travail entre 19 h et 7 h).

## 9.2. Local continuellement climatisé

### 9.2.1. Optimisation de l'épaisseur de l'isolant

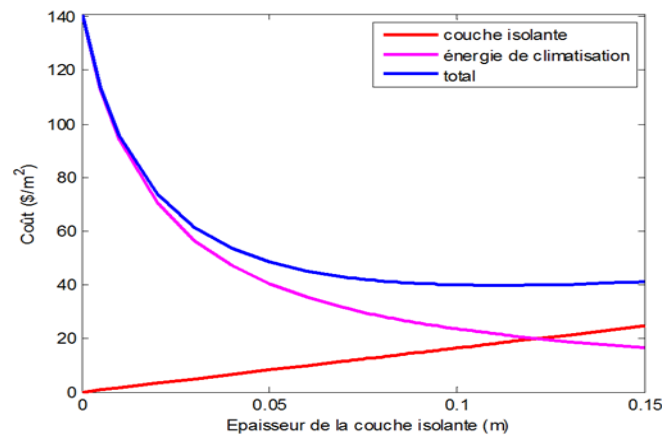


Figure 3.26: Evolution des coûts de l'isolant, de l'électricité et de leur somme en fonction de l'épaisseur de la couche d'isolant.

La Figure 3.26 montre les variations des coûts de l'isolant, de l'électricité et de leur somme en fonction de l'épaisseur de la couche de l'isolant.

<sup>5</sup> Inflation, consumer prices (annual %). <<http://data.worldbank.org/indicator/FP.CPI.TOTL.ZG>> ; [visité le 29.08.14].

<sup>6</sup> Prêt Foncier Epargne Logement Ordinaire. <<http://www.creditfoncier.com/index.php/fr/pre-foncier-epargne-logement/pre-foncier-epargne-logement-ordinaire>>; [visité le 29.08.14].

<sup>7</sup> <[www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME1.PDF](http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME1.PDF)>; [visité le 20.09.14].

Il ressort de ces courbes que le coût de l'isolant croît linéairement avec son épaisseur. Cela est dû au fait que son volume (et par conséquent son coût) est proportionnel à son épaisseur lorsque les dimensions transversales sont fixes. On note par ailleurs que la variation du coût de l'énergie électrique en fonction de l'épaisseur de l'isolant a la même allure que celle du gain thermique annuel. En effet, dans le modèle économique adopté, ces quantités sont proportionnelles. Le coût total en fonction de l'épaisseur de l'isolant présente une valeur minimale. L'épaisseur de l'isolant correspondant à cette valeur constitue l'épaisseur optimale recherchée. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés dans la littérature (Ozel, 2013 ; Al-Sanea, et al., 2011 ; Comakli, et al., 2003 ; Ozkahraman, 2006).

### 9.2.2. Influence des ombres portées sur l'épaisseur optimale de l'isolant

L'influence des ombres portées sur l'épaisseur optimale est analysée dans cette étude. Il a été supposé que la procuration des protections solaires ne nécessite pas de coût supplémentaire. C'est par exemple le cas des maisons adjacentes dont la disposition et parfois la hauteur dépend du plan d'urbanisation. La Figure 3.27 présente les variations du coût total (le coût de l'investissement initial et le coût de la climatisation relative à l'unité de surface du mur considéré durant la vie du bâtiment) en fonction de l'épaisseur de l'isolant.

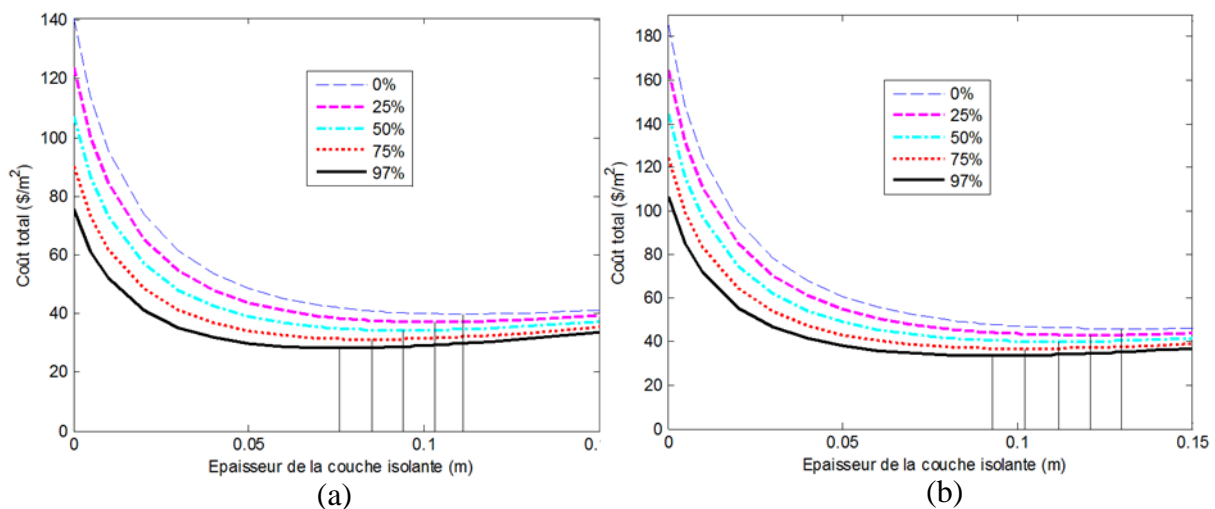


Figure 3.27: Variations du coût total en fonction de l'épaisseur de la couche de l'isolant à Douala (a) et Garoua (b).

On constate que le coût total décroît avec le pourcentage de radiations bloquées quel que soit le niveau de l'isolation. Ceci est dû au fait que le coût de la climatisation qui est proportionnel à la charge annuelle de refroidissement relative à l'unité de surface du mur décroît avec le taux de rayonnement solaire bloqué, comme montré précédemment. Par ailleurs, pour chaque niveau d'exposition au rayonnement solaire, l'évolution du coût total avec l'épaisseur de l'isolant présente un minimum. L'épaisseur de l'isolant à ce minimum constitue son épaisseur optimale recherchée. On peut aussi noter que le coût total est globalement plus élevé dans les conditions climatiques de la ville de Garoua. Cela est dû au fait que les niveaux de température et rayonnement solaire dans cette ville sont plus élevés que ceux de la ville de Douala. Les Tableaux

3.3 et Tableau 3.4 présentent les épaisseurs optimales de l'isolant et leur taux de décroissance en fonction du taux de radiations solaires bloquées dans les conditions climatiques des villes de Douala et de Garoua.

Tableau 3.3: Epaisseurs optimales de l'isolant et taux de décroissance en fonction du taux de radiations solaires bloquées dans la ville de Douala.

taux de radiation bloquée (%)	épaisseur optimale de la couche isolante (cm)			taux de décroissance (cm par pourcentage de radiation solaire bloquée)		
	sud	nord	est/ouest	Sud	Nord	est/ouest
<b>0</b>	11,0	10,4	11,1			
<b>25</b>	10,2	09,7	10,3	0,032	0,028	0,032
<b>50</b>	09,4	09,0	09,4	0,032	0,028	0,036
<b>75</b>	08,5	08,3	08,5	0,036	0,028	0,036
<b>97</b>	07,6	07,6	07,6	0,040	0,032	0,041
<b>moyennes</b>				0,035	0,029	0,036

Tableau 3.4: Epaisseurs optimales de l'isolant et taux de décroissance en fonction du taux de radiations solaires bloquées dans la ville de Garoua.

taux de radiation bloquée (%)	épaisseur optimale de la couche isolante (cm)			taux de décroissance (cm par pourcentage de radiation solaire bloquée)		
	sud	nord	est/ouest	Sud	Nord	est/ouest
<b>0</b>	12,8	11,7	13,0			
<b>25</b>	12,0	11,1	12,1	0,032	0,024	0,036
<b>50</b>	11,1	10,5	11,2	0,036	0,024	0,036
<b>75</b>	10,1	09,8	10,2	0,040	0,028	0,040
<b>97</b>	09,2	09,2	09,0	0,041	0,027	0,041
<b>moyennes</b>				0,037	0,026	0,038

Il ressort des deux tableaux que pour  $sd = 0\%$ , la plus grande valeur de l'épaisseur optimale de l'isolant est obtenue pour le mur orienté vers l'est/ouest, soit 13 cm et 11,1 cm respectivement dans les conditions climatiques de Garoua et de Douala. On peut aussi noter que l'augmentation de  $sd$  entraîne une décroissance de l'épaisseur optimale avec un taux de 0.035, 0.029 and 0.036 cm par pourcentage de radiation solaire bloquée respectivement pour les murs sud, nord et est/ouest dans les conditions climatiques de la ville de Douala. A Garoua, ces taux sont de 0,37 ; 0,26 et 0,38 cm par pourcentage de radiation solaire bloquée respectivement pour les murs sud, nord et est/ouest. On peut aussi constater que pour  $sd = 97\%$ , l'épaisseur optimale devient pratiquement indépendante de l'orientation du mur dans les conditions climatiques de la ville de Douala.



Les variations des économies d'énergie notées  $As$  en fonction de l'épaisseur de l'isolant sont données par la Figure 3.28. Les résultats sont présentés pour le cas du mur orienté vers l'est ou l'ouest.

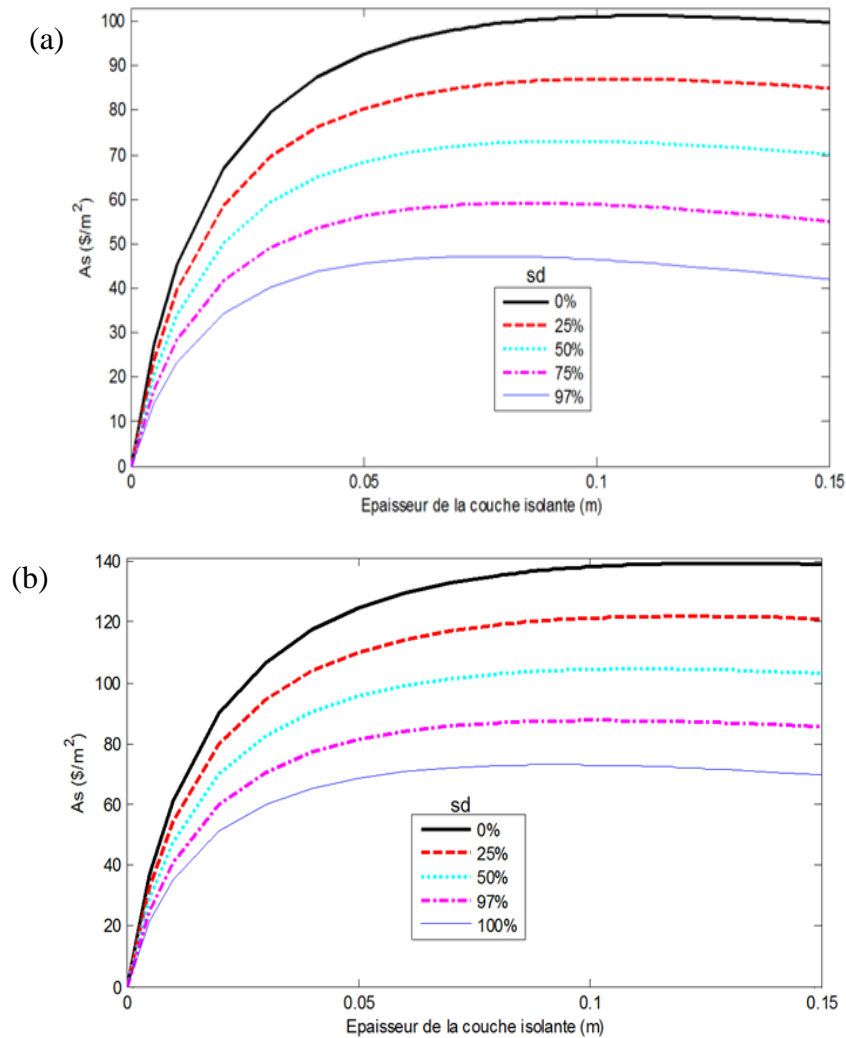


Figure 3.28: Economies d'énergie relative à l'unité de surface du mur calculées dans les conditions climatiques de Douala (a) et Garoua (b).

On peut noter que les économies d'énergie décroissent avec le taux de radiation de courtes longueurs d'ondes obstrué quel que soit le niveau d'isolation du mur. On observe en outre que la variation des économies d'énergie en fonction de l'épaisseur de la couche de l'isolant dans le mur présente un pic lorsque l'épaisseur de l'isolant est égale à sa valeur optimale calculée ci-dessus. Le Tableau 3.5 présente les économies d'énergie lorsque l'épaisseur du matériau est égale à sa valeur optimale pour différente orientation du mur et pour plusieurs degrés d'obstruction de radiation de courtes longueurs d'ondes.

Tableau 3.5: Coût de l'énergie économisée pour différent degré d'obstruction de radiations solaires.

sd (%)	Coût de l'énergie économisée (\$. m <sup>-2</sup> )					
	Douala			Garoua		
	sud	nord	est/ouest	sud	nord	est/ouest
0	99,37	88,38	101,29	135,96	114,98	139,37
25	85,61	77,47	87,08	119,17	103,82	121,86
50	72,04	66,68	73,04	102,71	92,77	104,59
75	58,69	56,05	59,18	86,65	81,84	87,63
97	47,20	46,89	47,25	72,89	72,33	73,00

Pour tous les taux d'obstruction de radiations solaires, les économies d'énergie sont plus élevées dans les conditions climatiques de Garoua que dans celles de Yaoundé. Par ailleurs elles sont plus importantes pour les murs orientés en direction de l'est/ouest. Elles sont moins importantes pour les murs orientés en direction du nord. On peut conclure qu'à niveau d'ombre égale, il faut préférentiellement isoler les murs est ou ouest. L'isolation du mur nord est alors moins rentable. Le Tableau 3.6 présente la période de retour sur investissement pour différentes orientations du mur et pour plusieurs niveaux d'ombre. Dans ce tableau sont aussi présentées les charges de refroidissement relatives à l'unité de surface du mur contenant une couche d'isolant d'épaisseur égale à sa valeur optimale.

Tableau 3.6: Période de retour sur investissement et charge annuelle de refroidissement obtenue à partir d'un mur isolé de façon optimale et pour différents niveaux d'obstruction de radiations solaires.

	sd (%)	Temps de retour sur investissement (année)			Charge annuelle de refroidissement (MJ. m <sup>-2</sup> )		
		Sud	Nord	Est/Ouest	Sud	Nord	Est/Ouest
Douala	0	3,59	3,79	3,56	54,62	51,88	55,08
	25	3,82	4,00	3,80	51,35	49,26	51,66
	50	4,14	4,26	4,09	47,61	46,31	48,16
	75	4,53	4,61	4,49	43,73	42,96	44,03
	97	4,95	4,97	4,94	40,16	39,95	40,20
Garoua	0	3,11	3,33	3,08	62,38	62,38	62,66
	25	3,30	3,48	3,26	59,18	55,09	59,18
	50	3,51	3,66	3,49	54,95	52,27	55,09
	75	3,76	3,84	3,75	51,09	49,61	51,07
	97	4,02	4,05	4,06	47,30	46,98	46,95

Les résultats montrent que lorsque le degré d'obstruction des radiations solaires augmente, la période de retour sur investissement croit tandis que la charge annuelle de climatisation relative à l'unité de surface du mur considéré décroît. Ces valeurs deviennent proches pour  $sd = 97\%$ . La période de retour sur investissement est plus importante pour les murs orientés en direction du nord tandis que les plus petites valeurs sont obtenues pour les murs orientés en direction de l'est/ouest. On obtient un argument de plus qui plaide en faveur de l'isolation prioritaire des murs orientés dans la direction de l'est ou ouest lorsque le niveau d'obstruction des rayonnements solaires est équitable sur tous les murs. Isolée avec une couche d'isolant d'épaisseur optimale, la face nord reste celle qui contribue moins aux apports d'énergie à la zone tandis que les faces est et ouest contribuent plus à cet apport. Regardant la période de retour sur investissement, l'isolation des murs de bâtiments avec les couches d'isolant d'épaisseur optimale est plus efficace dans les conditions climatiques de la ville de Garoua que dans celle de Douala.

En général, l'influence des protections solaires doit être prise en compte lors du dimensionnement du niveau d'isolation des murs d'un bâtiment continuellement climatisé en zone tropicale. Notons que les valeurs obtenues précédemment dépendent fortement de paramètres économiques choisis. Dans d'autres localités où ces paramètres sont différents, la méthodologie présentée ci-dessus peut être appliquée avec des paramètres propres à la région considérée.

### 9.3. Local climatisé de façon intermittente

Al-Sanea (2011) a étudié l'influence de la localisation et de la distribution de l'isolant dans un mur sur son épaisseur optimale. Cette étude a été réalisée dans le cas des bâtiments continuellement climatisés avec une température de consigne constante. Les conditions climatiques de la ville de Riyadh sont utilisées dans son étude. Les résultats ont montré que la position et la distribution de l'isolant dans le mur n'ont pas d'influence sur leur épaisseur optimale. Une étude similaire dans le cas des bâtiments climatisés de façon intermittente mérite une attention. En effet, nombre important de pièces d'une maison sont occupées et climatisées de façon intermittente durant toute la vie du bâtiment. La procédure d'optimisation de l'épaisseur de l'isolant à appliquer aux murs extérieurs de ces pièces devrait prendre en compte le mode réel de climatisation.

Figure 3.29 présente les variations des coûts d'isolant, de l'énergie et de leur somme en fonction de l'épaisseur totale de toutes les couches d'isolant pour deux configurations de mur. Le coût de l'énergie est calculé à partir de la charge annuelle de refroidissement transmise à travers l'unité de surface du mur du bâtiment durant les périodes d'occupation (lorsque le système de climatisation est allumé). Pour chaque type de mur, la courbe montrant les variations du coût total (énergie et isolant) présente un minimum dont l'épaisseur de l'isolant correspondant est la valeur optimale recherchée.

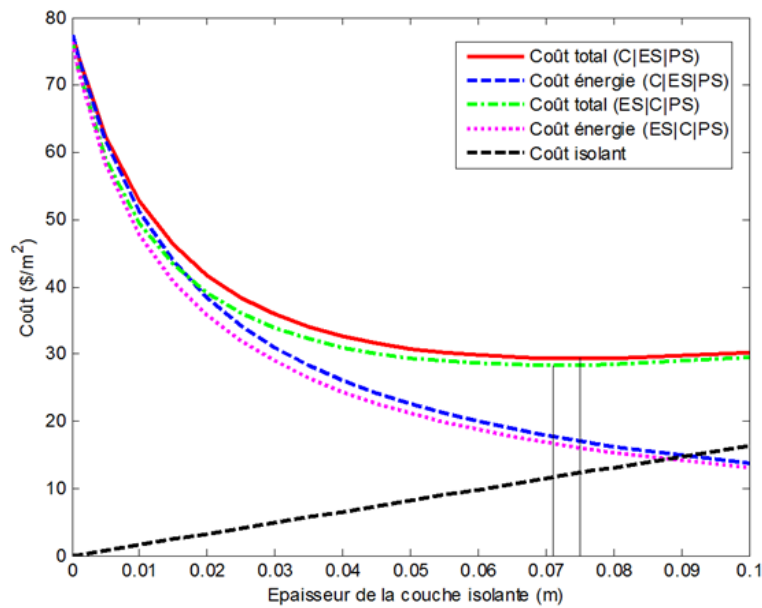


Figure 3.29: Variations des coûts de l'isolant, d'énergie et de leur somme en fonction de l'épaisseur totale de l'isolant.

Pour une épaisseur d'isolant donnée, il est possible de calculer les économies d'énergie susceptibles d'être réalisées à la fin de vie du bâtiment. La Figure 3.30 présente les variations de ces économies d'énergie en fonction de l'épaisseur de l'isolant appliqué. Il apparaît qu'elles atteignent leur pic pour une épaisseur d'isolant égale à sa valeur optimale.

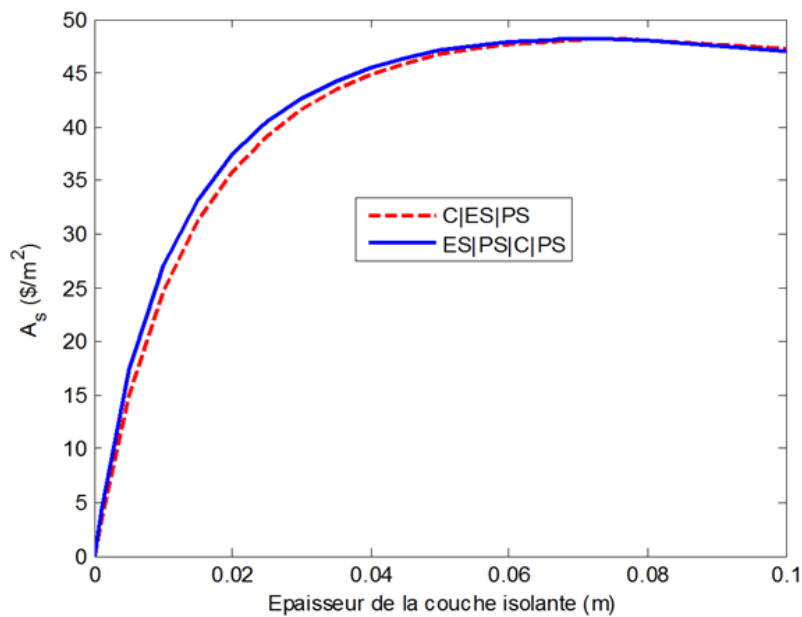


Figure 3.30: Economies d'énergie susceptibles d'être réalisées à la fin de vie du bâtiment en fonction de l'épaisseur totale des couches d'isolant.

On note également que pour une épaisseur d'isolant inférieure à 66 mm approximativement, les économies d'énergie sont plus importantes pour le mur ES|PS|C|PS que pour le mur C|ES|PS alors que la situation inverse est obtenue pour une épaisseur d'isolant supérieure à 66 mm environ.

Le Tableau 3.7 présente l'épaisseur optimum de l'isolant, les économies d'énergie envisageable dues à l'application de l'isolant, la période de retour sur investissement et la charge annuelle de refroidissement relative à l'unité de surface du mur isolé de façon optimale. On observe que la couche de l'isolant à appliquer sur le mur C|ES|PS doit être plus épaisse de 6 mm comparativement à celle qui doit être appliquée au mur ES|PS|C|PS. Les économies d'énergie envisageable et la période de retour sur investissement obtenues avec les deux structures de mur sont significativement proches. Par ailleurs, on note que la quantité de chaleur transmise dans la zone pendant une année, à travers l'unité de surface du mur isolé de façon optimale, obtenue avec le mur ES|PS|C|PS est 5,7 % moins élevée que celle obtenue avec le mur ES|C|PS.

Tableau 3.7: Epaisseur optimum, économies d'énergie, période de retour sur investissement et charge annuelle de refroidissement.

Structure du mur	Epaisseur optimale de l'isolant (cm)	Economies d'énergie ( $\$. m^{-2}$ )	Temps de retour sur investissement (année)	Charge annuelle de refroidissement ( $MJ. m^{-2}$ )
C ES PS	0,076	47,60	4,91	40,27
ES C PS	0,072	46,72	4,77	39,46
ES PS C PS	0,071	47,47	4,65	37,97
C PS ES PS	0,073	49,11	4,63	37,68
PS C ES PS	0,071	48,82	4,54	38,07
PS ES C PS	0,071	47,42	4,65	38,07
PS C PS ES PS	0,070	49,04	4,47	38,04
PS ES PS C PS	0,070	47,59	4,58	38,07

### Conclusion

Trois objectifs étaient poursuivis dans ce chapitre : (1) proposer une méthodologie d'optimisation des épaisseurs des isolants à intégrer dans les murs extérieurs de bâtiment en prenant en compte le taux de radiation solaire intercepté par les protections solaires et les objets environnants, (2) trouver la distribution optimale des différentes couches d'un mur composite en fonction du mode d'utilisation du local (continuellement climatisé et climatisé de façon intermittente) et (3) étudier l'influence de la position de l'isolant sur son épaisseur optimale lorsque le local est climatisé de façon intermittente. Les murs étudiés comprennent une ou plusieurs couches de polystyrène et une ou deux couches de maçonnerie (béton, briques de terre incorporant de la pouzzolane ou de la sciure) aux propriétés isolantes considérablement différentes. Un modèle de bâtiment (simple local constitué d'une seule zone) a été construit dans Simulink (environnement de simulation des systèmes dynamiques intégré dans Matlab) à l'aide d'H-Tools (bibliothèque de composantes prédéfinies). Certains résultats obtenus à partir de

ce modèle ont été confrontés à ceux obtenus avec EnergyPlus. Une bonne concordance a été notée. Les résultats ont montré entre autres que la meilleure distribution et localisation de l'isolant dans le mur dépend du mode d'utilisation du bâtiment. Ainsi, dans le cas où la température de la zone est maintenue constante, la plus grande valeur du déphasage et la plus petite valeur du facteur d'amortissement sont obtenues en plaçant une moitié de l'isolant à l'extérieur et l'autre moitié entre les deux couches de maçonnerie avec celle à base de la terre à l'intérieur. Lorsque le local est climatisé de façon intermittente, la meilleure distribution et localisation de l'isolant dans le mur (du point de vue de la réduction de la consommation d'énergie) dépend de son épaisseur totale. De plus, l'épaisseur optimale de l'isolant, obtenue à partir de certaines considérations économiques et des charges de refroidissement évaluées uniquement durant les heures où le local est occupé, dépend de sa distribution dans le mur.

## Conclusion générale et perspectives

Les travaux de cette thèse qui s'inscrivent dans la promotion du développement durable dans le secteur du bâtiment avaient pour objectifs :

- l'étude de l'influence du taux et de la fraction granulaire de la pouzzolane incorporée dans les briques en latérite compressées et stabilisées au ciment sur leurs propriétés thermophysiques ;
- la détermination de l'agencement optimal des couches des murs extérieurs de bâtiments ;
- l'évaluation de l'impact des ombres portées des objets environnants du bâtiment sur sa performance thermique.

En réponse au premier objectif susmentionné, les méthodes du plan chaud asymétrique, plan chaud symétrique et ruban chaud symétrique ont été utilisées pour déterminer les propriétés thermophysiques des échantillons de briques de terre stabilisées au ciment (8%) à l'intérieur desquels de la pouzzolane a été incorporée. Trois fractions granulaires de pouzzolane (0/2,5 ; 2,5/5 et 5/10mm) ont permis d'étudier l'impact de la taille des grains de pouzzolane sur les propriétés thermophysiques des briques. L'influence de la teneur en pouzzolane a été étudiée à partir des échantillons de brique de terre incorporant 15%, 30% et 45% de pouzzolane de fraction granulaire 2/2,5mm ; dans ce cas les mesures ont été faites pour plusieurs teneurs en eau. Les propriétés thermophysiques des parpaings de pouzzolane ont été également mesurées et comparées à celles du parpaing conventionnel (parpaing de sable). Les résultats ont montré entre autres que :

- une augmentation de la teneur en pouzzolane telle que décrite ci-dessus entraîne une très faible diminution de la conductivité thermique des briques de terre ;
- lorsque la granularité de la pouzzolane varie de 0/2,5mm à 5/10mm, on observe une diminution de la conductivité thermique des briques de l'ordre de 17% pour les échantillons secs ;
- un mur de parpaings de pouzzolane noire anhydre de 15 cm d'épaisseur présente une résistance thermique 1,53 fois plus grande que celle d'un mur de parpaings de sable sec de même épaisseur.

On conclut que pour bénéficier significativement du caractère caverneux de la pouzzolane en l'incorporant dans les blocs de latérite dans l'optique de réduire sa conductivité thermique, la taille des grains de pouzzolane doit être suffisamment élevée.

Pour apporter une réponse au deuxième et au troisième objectif, une modélisation thermique d'un simple bâtiment (constitué d'une seule zone avec un seul de ses murs, exposé aux variations climatiques) a été faite sous Simulink, environnement de simulation des systèmes dynamiques intégré dans Matlab. Certains résultats de simulation numérique obtenus à partir de ce modèle ont été confrontés à ceux provenant d'EnergyPlus, logiciel (validés) de simulation du comportement hygrothermique/thermique dynamique des locaux, développé par le

département d'énergie des Etats Unis. Les calculs sont faits avec les conditions climatiques des villes de Garoua (latitude : 9°19', longitude : 13°22' et méridien standard : 15°E) et de Douala (latitude : 4°01', longitude : 9°44' et méridien standard : 15°E). Pour un jour donné, les températures horaires sont estimées à partir du maximum et du minimum de température dudit jour via le modèle de cosinus. Le 15<sup>e</sup> jour du mois est pris comme jour représentatif.

Les résultats ont montré entre autres que :

- la meilleure disposition des différentes couches du mur dépend du mode d'utilisation du bâtiment : climatisé en continu ou climatisé de manière intermittente ;
- dans le cas où la température de la zone est maintenue constante (climatisation en continu), la plus grande valeur du déphasage et la plus petite valeur du facteur d'amortissement sont obtenues en plaçant une moitié de l'isolant à l'extérieur et l'autre moitié entre les deux couches de maçonnerie avec celle à base de la terre à l'intérieur ;
- lorsque le local est climatisé de façon intermittente, la meilleure distribution et localisation de l'isolant dans le mur (du point de vue de la réduction de la consommation d'énergie) dépend de son épaisseur totale. Par exemple, pour une épaisseur totale de l'isolant inférieure à 8 cm approximativement, l'agencement optimal des couches du mur est de placer une moitié du matériau isolant sur la face interne du mur et l'autre moitié entre les deux couches de maçonnerie avec la couche à base de la terre sur la face externe ;
- l'épaisseur de l'isolant optimisée à partir de certaines considérations économiques et des charges de refroidissement évaluées uniquement durant les heures où le local est occupé dépend de sa distribution dans le mur ;
- intercepter totalement les radiations solaires susceptibles d'atteindre un mur en zone tropicale réduit significativement les charges de refroidissement et n'induit aucune charge de chauffage considérable. Ainsi, ombrager totalement les façades des bâtiments ne renfermant aucune ouverture (fenêtre, porte) est exclusivement bénéfique ;
- considérant l'impact significatif de l'obstruction des rayons solaires sur les charges de climatisation, le dimensionnement de l'épaisseur de l'isolant (compromis entre les coûts de l'investissement initiale et de la climatisation durant la vie du bâtiment) à appliquer aux murs extérieurs d'un bâtiment continuellement climatisé dans la zone tropicale doit prendre en compte les effets des ombres portées des objets environnants du bâtiment.

Cette thèse ouvre de nombreuses perspectives. En ce qui concerne les études expérimentales, il est nécessaire de :

- faire des essais mécaniques sur les échantillons des différents matériaux étudiés dans ce travail ;
- déterminer les caractéristiques hygrothermiques (isothermes de sorption et désorption, perméabilité à la vapeur d'eau) de ces matériaux afin de mieux comprendre leurs comportements aux différents taux d'humidité ;
- mesurer la porosité de certains matériaux dont la caractérisation thermophysique a été faite dans cette thèse ;



- déterminer les modèles théoriques d'estimation des différents paramètres des matériaux étudiés dans ce travail ;
- étudier l'influence de l'incorporation de différents taux et fractions granulaires de la pouzzolane dans les briques de terre compressées et stabilisées au ciment sur leur durabilité afin de juger de la nécessité d'appliquer ou non un enduit.

Pour ce qui est de l'étude numérique, il est essentiel d'étudier le comportement hygrothermique des briques de terre avec incorporation de la pouzzolane à l'échelle de la paroi et à l'échelle du bâtiment.

## Références bibliographiques

- Aguwa, J.I. (2010). Performance of Laterite-Cement Blocks as Walling Units in Relation to Sandcrete Blocks. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, Issue 16, January-June 2010 p. 189-200.
- Ahmad, Z., Othman, S.Z., Md Yunus, B. et Mohamed, A. (2011). Behaviour of masonry wall constructed using interlocking shhoil cement bricks. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 60.
- Al-Nafeez, I. et Rogers, J.S. (1990). Thermal performance of external insulation in continuous use buildings in hot arid climates. *Housing Sci*, 14:161–79.
- Al-Sanea, S.A., Zedan, M.F. (2011). Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass. *Applied Energy*, 88:3113–24.
- André, S. (2003). Hot wire method for the thermal characterization of materials: inverse problem application. *Engenharia Térmica*, 4:55–64.
- Arıcı, M., et Karabay, H. (2010). Determination of optimum thickness of double-glazed windows for the climatic regions of Turkey. *Energy and Building*, 42:1773–1778.
- Asan, H. (2006). Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. *Building and Environment*, 41:615–620.
- Bal, H., Jannot, Y., Gaye, S. et Demeurie, F. (2013). Measurement and modelisation of the thermal conductivity of a wet composite porous medium: Laterite based bricks with millet waste additive. *Construction and Building Materials*, 41:586–593.
- Bal, H., Jannot, Y., Quenette, N., Chenu, A. et Gaye, S. (2012). Water content dependence of the porosity and thermal capacity of laterite based bricks with millet waste additive. *Construction and Building Materials*, 31:144-15.
- Baldinelli, G. (2010). A methodology for experimental evaluations of low-e barriers thermal properties: Field tests and comparison with theoretical models. *Building and Environment*, 45:1016–1024.
- Bekele, D., Srinivassan, R., Parlange, J.Y. (2006). Accuracy evaluation of weather data generation and disaggregation methods at finer timescales. *Adv Water Resour*, doi:10/1016/j.advwatres.2006.11.009.
- Belhamri, A., Rebahi, K., Chikhi, A. et Bennamoun, L. (2007). Etude et caractérisation des transferts thermiques dans des matériaux de construction locaux. 13èmes Journées Internationales de Thermique, Albi, France du 28 au 30 Août 2007.

- Bohi, Z.P.B. (2008). Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : cas de la région de l'agnéby (Côte d'Ivoire). Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Côte d'Ivoire.
- Bui, Q.B. (2008). Stabilité des structures en pisé : Durabilité, caractéristiques mécaniques. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- Bui, Q.B., Morel, J.C., Venkatarama, R.B.V. et Ghayad, W. (2009). Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment*, 44:912–919.
- Cagnon, H., Aubert, J.E., Coutand, M. et Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80:208–217.
- Cerezo, V. (2005). Propriétés mécanique, thermique et acoustique d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- Chan, A.L.S. (2012). Effect of adjacent shading on the thermal performance of residential buildings in a subtropical region, *Applied Energy*, 92:516–522.
- Cherki, A., Remy, B., Khabbazi, A., Jannot, Y. et Baillis, D. (2014). Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite. *Construction and Building Materials*, 54:202–209.
- Collet, F., Serres, L., Miriel, J., Bart, M. (2006). Study of thermal behaviour of clay wall facing south. *Building and Environment*, 41:307–315.
- Daouas, N. (2011). A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads. *Applied Energy*, 88:156–164.
- Daouas, N., Hassen, Z., Aissia, B.H. (2010). Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia. *Applied Thermal Engineering*, 30:319–326.
- De Hoog, F.R. (1982). A improved method for numerical inversion of Laplace transforms. *Soc. Ind. App. Math*, 3:357–366.
- Demanou, M., Pouillot, R., Grandadam, M., Boisier, P., Kamgang, B., Hervé, J.P., Rogier, C., Rousset, D. et Paupy, C. (2014). Evidence of dengue virus transmission and factors associated with the presence of anti-dengue virus antibodies in humans in three major towns in Cameroon. *PLoS Negl Trop Dis*. 2014 Jul 10;8(7)
- Eben Saleh, M.A. (1990). Impact of thermal insulation location on buildings in hot dryclimates. *Solar Wind Technol*, 7:393–406.

- Ekici, B.B., Gulen, A.A. et Aksoy, U.T. (2012). A study on the optimum insulation thicknesses of various types of external walls with respect to different materials, fuels and climate zones in Turkey. *Applied Energy*, 92:211–217.
- El Fgaier, F., Lafhaj, Z., Brachelet, F., Antczak, E. et Chapisea, C. (2015). Thermal performance of unfired clay bricks used in construction in the north of France: Case study. *case Studies in Construction Materials*, 3:102–111.
- Ezbakhe, H., Bousad, S., EL Bakkour, A., Ajzoul, T. et EL Bouardi, A. (2001). Etude Thermique de la Terre Stabilisée au Ciment Utilisée en Construction au Nord du Maroc. *Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique*, 69–72.
- Fetra, V.R., Rahman, I.A. et Ahmad Zaidi, A.M. (2011). Possibility of Lime as a Stabilizer in Compressed Earth Brick (CEB). *Proceeding of the International Conference on Advanced Science, Engineering and Information Technology 2011*.
- Givoni, B. (1994). *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. USA, Van Nostrand Reinhold.
- Goodhew, S., Griffiths, R. (2005). Sustainable earth walls to meet the building regulations. *Energy and Buildings*, 37:451–459.
- Goodhew, S., Griffiths, R., Watson, L., Short, D. (2000). Some preliminary studies of the thermal properties of Devon cob walls. *Terra 2000, Proceedings of the 8th International Conference on the study and conservation of earthen architecture*, Torquay, Devon, UK, May 2000, pp. 139–143, 2000.
- GRET. (2009). *Etude préliminaire d'adaptation aux changements climatiques en Afrique*. Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD).
- Huovila, P., Alla-Juusela, M., Melchert, L. and Pouffary S. (2007). *Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers*. United Nations Environment Programm.
- Jannot, Y. (2008). Séminaire PER AUF " Métrologie thermique ", LEA Dakar, 12-18/11/08.
- Jannot, Y. and Meukam, P. (2004). Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a low cost hot strip. *Meas. Sci. Technol.*, 15:1932–1938.
- Jannot, Y. and Zoubir, A. (2007). A quadrupolar complete model of the hot disc. *Meas. Sci. Technol.* 18 :1229–1234.
- Jannot, Y., Degiovanni A. and Payet G. (2009). Thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52:1105–1111.

- Jannot, Y., Felix, V. and Degiovanni, A. (2010). A centered hot plate method for measurement of thermal properties of thin insulating materials. *Meas. Sci. Technol.*, 21:035106 (8pp).
- Kalagasidis, A. S. (2003). The whole model validation for HAM-Tools. Case study: hygrothermal conditions in the cold attic under different ventilation regimes and different insulating materials. Report R:03-6, 2003. Department of Building Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. Also available for free downloading on [www.ibpt.org](http://www.ibpt.org).
- Kemajou, A. et Mba, L. (2010). Matériaux de construction et confort thermique en zone chaude. Application au cas des régions climatiques camerounaises. *Revue des Energies Renouvelables*, 14(2), 239 – 248.
- Kerali, A.G. (2001). Durability of compressed and cement-stabilised building blocks. Doctorate thesis, University of Warwick, School of Engineering.
- Kossecka, E. et Kosny, J. (2002). Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building. *Energy Building*, 34:321–31.
- Lawane, A., Pantet, A., Vinai, R. et Thomassin, J.H. (2011). Caractérisation des matériaux latéritiques pour une meilleure utilisation en Afrique. 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon, 29 août au 2 septembre 2011.
- Leonelli, C., Kamseu, E., Boccaccini, D.N., Melo, U.C., Rizzuti, A., Billong, N., et Miselli, P. (2007). Volcanic ash as alternative raw materials for traditional vitrified ceramic products. *Advances in Applied Ceramics*, 106(1).
- Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C. (1962). Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. *ASHRAE J.*, 3:53–58.
- Liuzzi, S., Hall, M.R., Stefanizzi, P. et Casey, S.P. (2013). Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. *Building and Environment*, 61:82–92.
- Mazur, J. and Pustelny, B. (2007). A photoacoustic method of determining the thermal diffusivity with a reference sample. *Molecular and Quantum Acoustics*, vol. 28 (2007).
- Meukam, P. (2004). Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment. Thèse, Université de Cergy-Pontoise.
- Meukam, P., Jannot, Y., Noumowe, A., Kofane, T.C. (2004). Thermo physical characteristics of economical building materials. *Construction and Building Materials*, 18:437–443.
- Moevus, M., Fontaine, L., Anger, R. (2012). Caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre crue : bilan de la littérature. Rapport partiel du projet Béton d'Argile Environnemental.

- Nassima, S. (2010). Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation. Thèse, Université Mentouri – Constantine.
- Nguyen, T.T. (2010). Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. Thèse, Université de Bretagne Sud.
- Nielsen, T.R., Peuhkuri, R., Weitzmann, P., Gudum, C. (2002). Modelling Building Physics in Simulink, BYG·DTU SR-02-03, BYG·DTU.
- Nikoofard, S., Ugursal, V.I. et Beausoleil-Morrison I. (2011). Effect of external shading on household energy requirement for heating and cooling in Canada. *Energy and Building*, 4:1627–1635.
- Nwoke, O.A. et Ugwuishiwu, B.O. (2011). Local bamboo and earth construction potentials for provision of affordable structures in Nigeria. *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology* (ISSN: 2180-3242) Vol 2, Issue 2, December 2011.
- Ozel, M. (2011). Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method. *Applied Energy*, 88(7):2429–2435.
- Ozel, M. (2012). The influence of exterior surface solar absorptivity on thermal characteristics and optimum insulation thickness. *Renewable Energy*, 39:347–355.
- Ozel, M. (2013). Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate. *Energy Conversion and Management*, 66:106–14.
- Ozel, M. et Pihtili, K. (2007). Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations. *Building and Environment*, 42:3051–3059.
- Papadakis, G., Tsamis, P. et Kyritsis, S. (2001). An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings. *Energy and Building*, 33:831–836.
- Pepple, O., Ogbanda, C., Opara F. (2010). Thermal conductivity of reinforced cement stabilized lateritic brick. *J. Eng. Sci*, 5(2):178-180.
- Perez, R., Ineichen P., Seals, R. (1990). Modeling of daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44:271–289.
- Piot, A. (2009). Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en condition climatiques réelles et modélisation numérique. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- P'KLA, A. Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC) : application aux maçonneries "BTC-mortier de terre". Thèse, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- Profeta, C. et Thouvenin, M. Projet de mécanique 1ère année Ecole des Mines de Nancy.

- Salager, S. (2006). Influence de la température sur le comportement hydrique de milieux poreux partiellement saturés. XXIV<sup>ème</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil- Prix Jeunes Chercheurs.
- Saleh and Al-Ajlan (2006). Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Applied Thermal Engineering*, 26:2184–2191.
- Sami AL-Sanea, S.A. et Zedan, M.F. (2001). Effect of insulation location on initial transient thermal response of building walls. *Journal of Building Physics*, 24:275–300.
- Samri, D. (2008). Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- Takegoshi, E. and Sadahisa, I. (1982). A method of measuring the thermal conductivity of solid by transient hot wire of comparison. *Bulletin of the JSME*, 25:201–13.
- Tan, J.C., Tsipas, S.A., Golosnoy, I.O., Curran, J.A., Paul, S. and Clyne, T.W. (2006). A steady-state Bi-substrate technique for measurement of the thermal conductivity of ceramic coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201:1414–1420.
- Tsalefac, M., Ngoufo, R., Nkwambi, W., Djoumessi, T.E. et Fobissie, B.L. (2003). Fréquences et quantités des précipitations journalières sur le territoire camerounais. Publication de l'Association Internationale de Climatologie, Vol. 15, 2003.
- Ucar, A. et Balo, F. (2010). Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls. *Renewable Energy*, 35:88–94.
- Utz, R. (2004). Stabilisation of loess clay surfaces in the archeological excavations at the example of the Terracotta army of Qin Shihuangdi. Thèse, Ludwig-Maximilian University, Munich.
- Van der Maas, J. et Florentzos, F. (1994). Passive Cooling by Night Ventilation. European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, vol. 2, Lyon, France.
- Yu, J., Yang, C., Tian, L. et Liao, D. (2009). A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China. *Applied Energy*, 86:2520–2529.

## Annexe

### A. Génération des valeurs horaires des paramètres climatiques

Pour évaluer numériquement le confort thermique ou l'énergie nécessaire pour assurer un bon confort thermique dans les bâtiments, les valeurs horaires des paramètres climatiques sont souvent nécessaires. Cependant, dans bon nombre de pays en voie de développement, à l'instar du Cameroun, ces valeurs ne sont pas mesurées. Il est impératif de les estimer à partir des valeurs disponibles.

Dans cette étude, nous disposons des températures maximales et minimales journalières de plusieurs localités au Cameroun sur une longue période (1985-2005). Les données sur l'ensoleillement que nous disposons ne sont pas exploitables. Plusieurs techniques nous ont permis d'estimer les valeurs horaires à partir de celles disponibles.

#### A.1. Prédiction des valeurs horaires du rayonnement

Les moyennes mensuelles des rayonnements diffus et direct ont été estimées en calculant les moyennes des données d'une longue période (1985-2005) issues de Helioclim<sup>8</sup>. La corrélation proposée par Collares-Pereira et Rabl (Collares-Pereira et Rabl, 1979), donnée ci-dessous, ont permis d'estimer les valeurs horaires moyennes des rayonnements globaux ( $I$ ) à partir des valeurs journalières ( $H$ ).

$$\frac{I}{H} = (a + b \sin \omega) \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \left(\frac{\pi \omega_s}{180}\right) \cos \omega_s} \quad [A. 1]$$

où

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad [A. 2]$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad [A. 3]$$

avec  $\omega_s$  l'angle horaire au couché du soleil.

Selon Liu and Jordan (1962), les rapports  $I_d/H_d$  et  $I_0/H_0$  sont égaux et donnés par l'équation suivante:

$$\frac{I_d}{H_d} = \frac{I_0}{H_0} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad [A. 4]$$

<sup>8</sup>[http://www.sodais.com/eng/services/service\\_invoke/gui.php?xmlidescrpt!4hc1month.xml&Submit!4HC1month](http://www.sodais.com/eng/services/service_invoke/gui.php?xmlidescrpt!4hc1month.xml&Submit!4HC1month), [accessed 17.08.14].



où  $H_0$  et  $H_d$  sont les valeurs journalières des rayonnements global et diffus alors que  $I_0$  et  $I_d$  sont les valeurs horaires des rayonnements global et diffus.

Enfin, le rayonnement direct horaire est obtenu en soustrayant le rayonnement horaire diffus du rayonnement horaire global.

## A.2. Prédiction des valeurs horaires moyennes de température, d'humidité et de pression atmosphérique

Les valeurs horaires moyennes de température ( $T_0$ ) du jour représentatif de chaque mois sont estimées en interpolant les valeurs moyennes des températures maximales et minimales journalières (calculées à partir des données d'une longue période) en utilisant le modèle du cosinus exprimé comme suit :

$$T_0 = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cos\left(\frac{\pi(t - a)}{12}\right) + \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad [A.5]$$

où  $a$  est l'heure de la journée à laquelle la température de l'air est maximale (elle est prise égale à 14 dans notre étude),  $T_{max}$  et  $T_{min}$  sont respectivement les températures maximales et minimales journalières et  $t$  le est temps en heure.  $T_0$  prend les valeurs 1-24 heures.

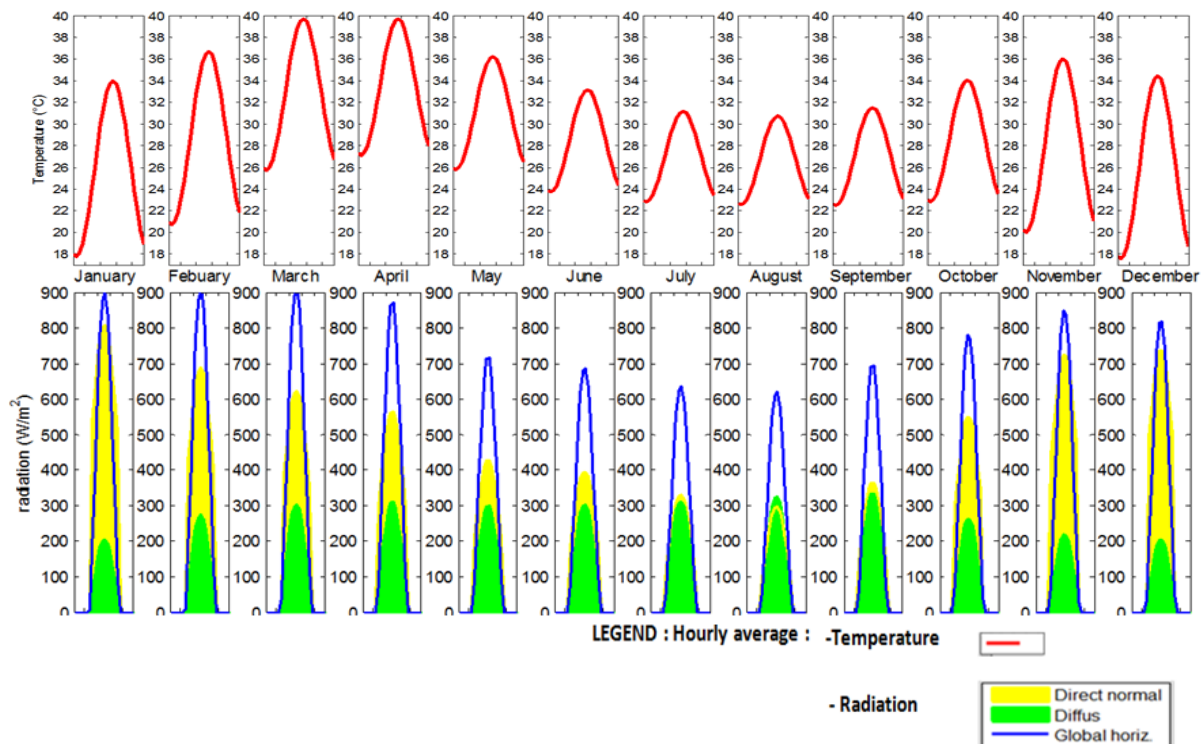


Figure A.1 : Valeurs horaires journalières de la température, des rayonnements diffus et global sur un plan horizontal et du rayonnement direct (Garoua).

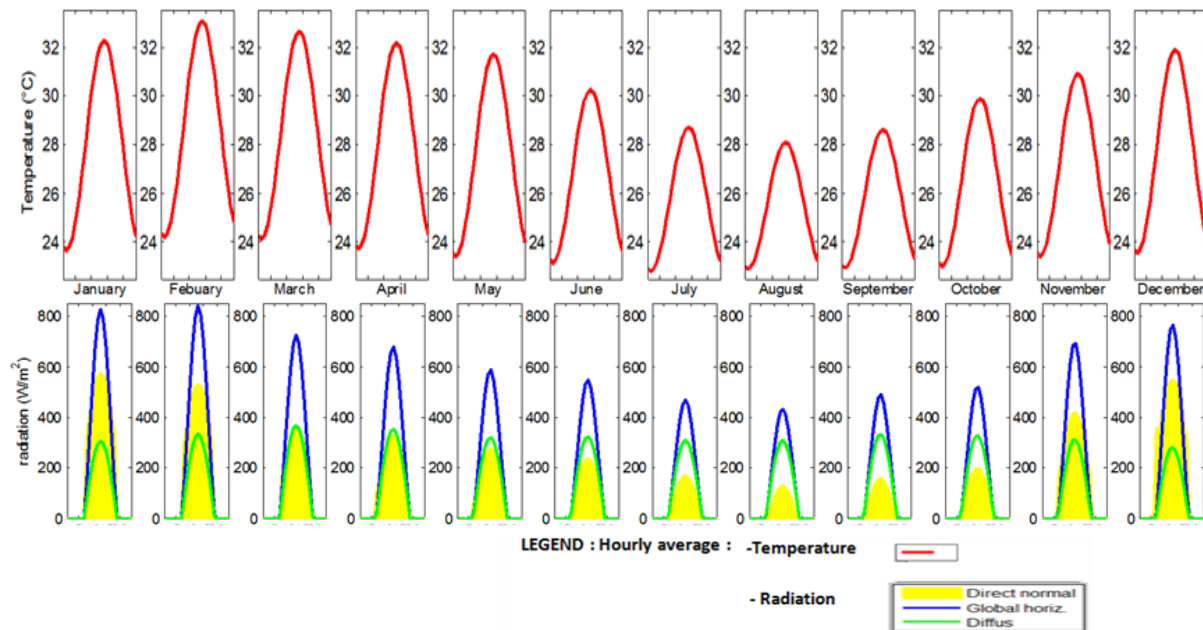


Figure A.2 : Valeurs horaires journalières de la température, des rayonnements diffus et global sur un plan horizontal et du rayonnement direct (Douala).

La pression atmosphérique est donnée en fonction de l'altitude du site par la relation :

$$P_h = P_0 \exp\left[-\frac{\rho g h}{1000 P_0}\right] \quad [A. 6]$$

où

- $P_h$  est la pression atmosphérique à l'altitude  $h$  en  $KPa$  ;
- $P_0$  est la pression atmosphérique au niveau de la mer ( $P_0 = 101325 KPa$ ) en  $KPa$  ;
- $g$  est l'accélération de la pesanteur ( $g = 9,81 m s^{-2}$ ) ;
- $\rho$  est la masse volumique de l'air en  $kg.m^{-3}$  ;
- $h$  est l'altitude du site en  $m$ .

## B. Analyse granulométrique de la pouzzolane

Pour notre étude, nous avons sélectionné et analysé dans un premier temps les latérites provenant de deux sites : la latérite de Mvog-Betsi (LMV) et la latérite de Nkolbison (LNK). Les deux localités se trouvent dans le département de Mfoundi, région du centre (Cameroun). La Figure B.1 présente l'aspect des latérites LMV et LNK.



Figure B.1: Aspect des latérites des sites de Mvog-Betsi (à gauche) et de Nkolbisson (à droite).

Les résultats des analyses des deux latérites sont donnés dans les tableaux B.1 et B.2 ci-dessous. Notons que les particules obtenues à l'aide du tamis électrique dont les diamètres  $D$  sont dans l'intervalle  $100 \leq D (\mu m) \leq 6500$  obéissent à la granulométrie sèche et celles (particules) dont les diamètres  $D$  sont dans l'intervalle  $1 \leq D (\mu m) \leq 100$  obéissent à la granulométrie par sédimentométrie.

Dans ces tableaux :

- $D$  est le diamètre des particules ;
- $t$  est le temps de passage des particules ;
- $R_f$  est le refus obtenu dans la colonne de tamis ;
- $R_c$  est le refus cumulé des particules ;
- $\%C$  est le pourcentage de cumul ;
- $A$  est la lecture au densimètre (40 g de matière+30 ml de solution défloculante+eau distillée) ;
- $B$  est la lecture au densimètre (30 ml de solution défloculante+ eau distillée) ;
- $R$  est la lecture corrigée du nombre de division ;
- $Hr$  est la profondeur moyenne de la couche de liquide ;
- $\%P$  est le pourcentage de tamisats cumulés.

Les analyses granulométriques combinées de la latérite de Mvog-Betsi nous ont donné les résultats consignés dans le Tableau B.1.

Tableau B.1 : Analyse granulométrique de la latérite de Mvog-Betsi.

$D(\mu m)$	$t(s)$	$R_f(g)$	$R_c(g)$	$A$	$B$	$R$	$H(0,01m)$	$\%P$	$\%C$
6500	—	0	0	—	—	—	—	0	100,0
4000	—	8	10	—	—	—	—	4	96,00
2000	—	10	18	—	—	—	—	7,2	92,80
800	—	16	34	—	—	—	—	13,6	86,40
500	—	20	52	—	—	—	—	20,8	79,20
400	—	8	61	—	—	—	—	24,4	75,60

315	—	12	73	—	—	—	—	36	70,80
200	—	17	90	—	—	—	—	36	64,00
100	—	21	111	—	—	—	—	44,4	55,60
67,13	30	—	—	20,5	-2,5	23	14,24	92,34	51,34
47,64	60	—	—	20,5	-2,5	22,5	14,34	90,34	50,22
33,93	120	—	—	19	-2,5	21,5	14,55	86,32	47,99
21,61	300	—	—	18	-2,5	20,5	14,76	82,31	45,76
15,44	600	—	—	16,5	-2,5	19	15,08	76,28	42,41
10,99	1200	—	—	15,5	-2,5	18	15,29	72,27	40,18
7,83	2400	—	—	14,5	-2,5	17	15,5	68,25	37,95
5,57	4800	—	—	13,5	-2,5	16	15,71	64,24	53,71
4,59	7200	—	—	12	-2,5	14,5	16,02	58,21	32,37
3,27	14400	—	—	11	-2,5	13,5	16,23	54,20	30,13
1,34	86400	—	—	10	-2,5	12,5	16,44	50,18	27,90

Les analyses granulométriques combinées de la latérite de Nkolbisson nous ont donné les résultats consignés dans le Tableau B.2.

Tableau B.2 : Analyse granulométrique de la latérite de Nkolbisson.

$D(\mu m)$	$t(s)$	$R_f(g)$	$R_c(g)$	$A$	$B$	$R$	$H(0,01m)$	%P	%C
6500	—	0	0	—	—	—	—	0	100,0
400	—	2	3	—	—	—	—	0,40	99,69
2000	—	9	11	—	—	—	—	2,20	97,80
800	—	25	36	—	—	—	—	7,20	92,80
500	—	25	61	—	—	—	—	12,20	87,80
400	—	9	70	—	—	—	—	14,00	86,00
315	—	20	90	—	—	—	—	18,00	82,00
200	—	28	118	—	—	—	—	23,60	79,40
100	—	37	155	—	—	—	—	31,00	69,00
67,13	30	—	—	20	-2,5	22,5	14,345	90,34	62,33
47,13	60	—	—	18,5	-2,5	21	14,66	84,31	58,17
33,93	120	—	—	17,5	-2,5	20	14,87	80,30	55,40
21,61	300	—	—	16	-2,5	18,5	15,18	74,28	51,25
15,44	600	—	—	15	-2,5	17,5	15,395	70,26	48,48
10,99	1200	—	—	14	-2,5	16,5	15,605	66,25	41,55
7,83	2400	—	—	12,5	-2,5	15	15,92	60,22	41,55
5,57	4800	—	—	11,5	-2,5	14	16,13	56,21	38,78
4,59	7200	—	—	10,5	-2,5	13	16,34	52,18	36,01
3,27	14400	—	—	10	-2,5	12,5	16,44	50,18	34,63
1,34	86400	—	—	9	-2,5	11,5	16,6555	46,17	31,86

Concernant la granulométrie par sèche (GSc) :

$$\%C = \frac{R}{m} \times 100 \times 100\%P = 100 - \%P \quad [B.1]$$

$$\%P = 100 - \%C \quad [B.2]$$

Et pour la granulométrie par sédimentométrie (GS) :

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot H_r}{t \cdot (\gamma_s - \gamma_\omega)}} \quad [B.3]$$

$$\%P = \frac{V \cdot \gamma_s \cdot \gamma_\omega \cdot R}{10 \cdot W \cdot (\gamma_s - \gamma_\omega)} \quad [B.4]$$

$$\%C = \frac{\%P \cdot m_f}{100} \quad [B.5]$$

où :

- $m_f = 55,6g$  est masse finale de la phase de GSc ;
- $\gamma_s = 26,5 \cdot 10^3 N/m^3$  est le poids volumique des particules solides ;
- $\gamma_\omega = 10^3 N/m^3$  est le poids volumique de l'eau ;
- $W = 10g$  masse de sol sec mis en suspension et prélevé sur le tamisat ;
- $\eta = 0,8705 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$  viscosité dynamique de la solution.

Ces résultats ont permis d'obtenir les diagrammes de texture représentés à la Figure 2.11

### C. Modélisation 3D du transfert de chaleur au sein du dispositif de la section 1.5.2 du chapitre 2

Si  $T(x, y, z, t)$  est la température au point de coordonnées  $x, y, z$  (Figure C.1) à l'instant  $t$ , l'équation qui régit le transfert de chaleur dans le dispositif s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad [C.1]$$

où  $a$  est la diffusivité thermique de l'échantillon.

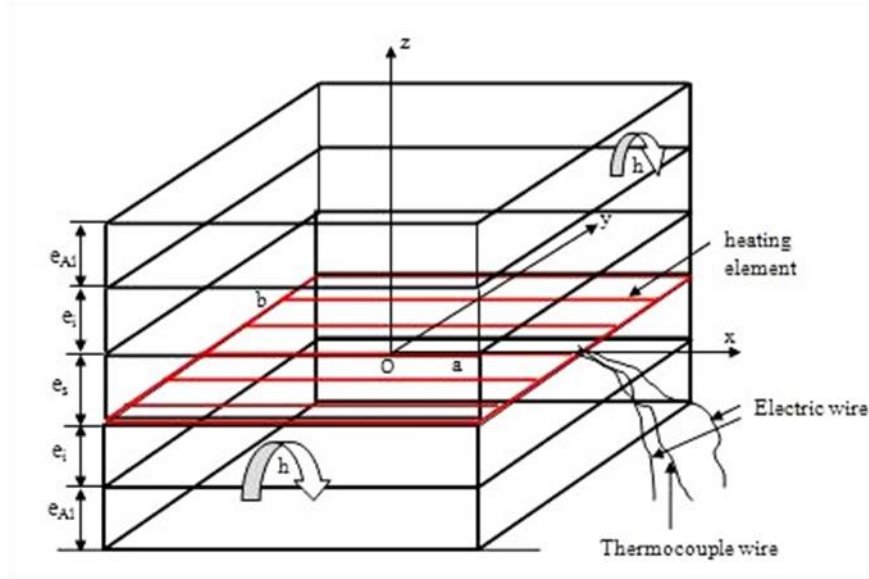


Figure C.1. Schéma de principe de la modélisation 3D.

La condition initiale est :

$$T(x, y, z, 0) = 0 \quad [C.2]$$

Les conditions aux limites sont :

$$\frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial x} = 0 \text{ si } x = 0 \quad [C.3]$$

$$\frac{\partial T(x, 0, z, t)}{\partial y} = 0 \text{ si } y = 0 \quad [C.4]$$

$$-\lambda \frac{\partial T(a, y, z, t)}{\partial z} = h(T(a, y, z, t) - T_0) \text{ si } x = a, 0 \leq z \leq e \quad [C.5]$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, b, z, t)}{\partial z} = h(T(x, b, z, t) - T_0) \text{ si } x = b, 0 \leq z \leq e \quad [C.6]$$

$$\phi_0 = \varphi_s c_s e_s \frac{\partial T_h(x, y, t)}{\partial t} - \lambda \frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial z} + \lambda_i \frac{\partial T_i(x, y, 0, t)}{\partial z} \text{ si } z = 0 \quad [C.7]$$

$$T(x, y, z_1, t) = T_0 \text{ si } z_1 = e + e_i + e_{Al} \quad [C.8]$$

où :

$\lambda$  et  $\lambda_i$  sont respectivement la conductivité thermique de l'échantillon à caractériser et celle de l'isolant (polystyrène extrudé) ;

$e$ ,  $e_i$  et  $e_{Al}$  sont respectivement les épaisseurs de l'échantillon, de l'isolant et de l'aluminium ;

$2a$  et  $2b$  sont respectivement la largeur et la longueur de l'échantillon ;

$\phi_0$  est la densité de flux de chaleur produite par l'élément chauffant ;

Les indices « s » et « i » désignent respectivement l'isolant et l'élément chauffant.

L'équation ci-dessus ne peut pas être résolue analytiquement. Seule une méthode numérique peut permettre de la résoudre.

**Liste de publications issues de cette thèse.**

- 1. Influence of external shading on optimum insulation thickness of building walls in a tropical region**  
Applied Thermal Engineering 90 (2015) 754-762
  
- 2. Modelling and experimental determination of thermal properties of local wet building materials**  
J.C. Damfeu, P. Meukam, Y. Jannot, **E. Wati**.  
Energy and Buildings 135 (2017) 109-118
  
- 3. Modeling thermal performance of exterior walls retrofitted from insulation and modified laterite based bricks materials**  
**Elvis Wati**, Pierre Meukam, Jean Claude Damfeu  
Heat Mass Transfer DOI 10.1007/s00231-017-2059-7